

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬНАЙ АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2025. Т. 70, №4

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2025. Т. 70, №4

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

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

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

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

Г л а в н ы й р е д а к т о р

Сергей Антонович Чижик –

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

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

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

И. А. Старостина (ведущий редактор журнала)

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. Ласковиц** – 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 металлокомпозитных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь
- Нгуен-Ву Тронг** – Национальный институт прикладной механики и информатики Вьетнамской академии наук и технологий, Хошимин, Социалистическая Республика Вьетнам
- С. В. Панин** – Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Российская Федерация
- О. Г. Пенязьков** – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Л. Танович** – Белградский университет, Белград, Республика Сербия
- В. М. Федосюк** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларусь 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. 2025. Т. 70, № 4

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *И. А. Старостина*
Компьютерная верстка *Л. И. Кудерко*

Подписано в печать 19.12.2025. Выход в свет 29.12.2025. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 50 экз. Заказ 259.

Цена номера: индивидуальная подписка – 15,16 руб., ведомственная подписка – 34,53 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

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2025, vol. 70, no. 4

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

Issued four times a year

Founder is the National Academy of Sciences of Belarus

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

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

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

Sergei A. Chizhik – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute 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 St., room 118, 220072, Minsk, Republic of Belarus.
Tel.: +375 17 374-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru
vestft.belnauka.by

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.
Physical-technical series, 2025, vol. 70, no. 4
Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor I. A. Starostina
Computer imposition L. I. Kudzerko

It is sent of the press 19.12.2025. Appearance 29.12.2025. Format $60 \times 84 \frac{1}{8}$. Offset paper. The press digital.
Printed pages 10,23. Publisher's signatures 11,3. Circulation 50 copies. Order 259.
Number price: individual subscription – 15,16 byn., departmental subscription – 34,53 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 St., Minsk, 220084, Republic of Belarus.

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Петюшук Е. Е., Фомихина И. В., Дробыш А. А. Закономерности формирования структуры и свойств пористых композитов на основе базальтового волокна в процессе термоциклирования.....	271
Жигалов А. Н., Демиденко М. И., Адамчук Д. В., Максименко С. А., Углов В. В., Башаримов М. В., Кубраков И. В. Эксплуатационные характеристики ионно-плазменных титанодержащих покрытий на твердо-сплавных пластинах BYTC.....	285

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

Журавков М. А., Николайчик М. А., Климкович Н. М., Карпович И. Н., Морочковский И. В. Оценка напряженно-деформированного состояния направляющих шахтного ствола с учетом динамики воздушных потоков.....	296
Высоцкая Н. А., Прушак В. Я., Поляков А. Л. Разработка технологических схем слоевой выемки Третьего калийного пласта для глубоких участков шахтного поля рудника Четвертого рудоуправления ОАО «Беларуськалий»	307

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

Гаспорович А. А., Кузьмич М. А. Анализ технологий проектирования и создания двухфазных термосифонов для систем охлаждения.....	320
Чжай Хунюань, Чжан Сибэнь, Линь Гохай, Сюй Тин, Чжан Юйтин, Чжао Сяоцин. Использование новых технологий при строительстве и эксплуатации сборных зданий с ультранизким энергопотреблением (на английском языке)	336

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

Мороз И. О., Трифонов А. Г. Анализ динамики распространения продуктов деления и радионуклидов под защитной оболочкой АЭС-2006	345
---	-----

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

CONTENTS

MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

Petyushik E. E., Fomikhina I. V., Drobyshev A. A. Regularities of formation of structure and properties of porous composites based on basalt fiber in the process of thermocycling.....	271
Zhigalov A. N., Demidenko M. I., Adamchuk D. V., Maksimenko S. A., Uglov V. V., Basharimov M. V., Kubrakov I. V. Operational characteristics of ion plasma titanium-containing coatings on BYTC carbide plates.....	285

MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

Zhuravkov M. A., Nikolaitchik M. A., Klimkovich N. M., Karpovich I. N., Morochkovskiy I. V. Assessment of the mine shaft guides stress-strain state under the elevator force impact caused by the dynamics of airflow motion	296
Vysotskaya N. A., Prushak V. Ya., Paliakou A. L. Development of the technological schemes for layered mining of the Third Potash Seam for the deep sections of the fourth production unit mine field of JSC “Belaruskali”	307

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

Gasporovich A. A., Kuzmich M. A. Analysis of two-phase thermosyphon design and creation technologies for cooling system applications.....	320
Zhai Hongyuan, Zhang Siben, Lin Guohai, Xu Ting, Zhang Yuting, Zhao Xiaoqing. The use of new technologies in the construction and operation of prefabricated buildings with ultra-low energy consumption.....	336

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

Moroz I. O., Trifonov A. G. Analysis of the dynamics of distribution of fission products and radionuclides under the containment of NPP-2006	345
--	-----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-271-284>
УДК 621.762



Оригинальная статья

Е. Е. Петюшик¹, И. В. Фомихина^{2*}, А. А. Дробыш³

¹*Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии
Национальной академии наук Беларусь, ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь*

²*Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии
имени академика О. В. Романа» Национальной академии наук Беларусь,
ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь*

³*Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь*

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ
И СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА
В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ**

Аннотация. Представлены результаты исследования структуры и свойств двух составов пористых композиционных материалов системы $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}(\text{Fe}_2\text{O}_3)-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ на основе базальтового волокна, сформированных в процессе термоциклирования. Изготовленные из шихты I состава образцы имели следующую структуру: базальтовое волокно (37 мас.%) + муллитокремнеземистое волокно (19 мас.%) + модификатор $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ в качестве связки (11 мас.%) + порообразователь (19 мас.%) + фарфор в качестве упрочнителя (4 мас.%) + пластификатор (11 мас.%); II состава: базальтовое волокно (52 мас.%) + SiO_2 (15 мас.%) + порообразователь (1 мас.%) + фарфор (алюмосиликат) в качестве упрочнителя (6,5 мас.%) + пластификатор (КМЦ, 6,5 мас.%) + известняковая мука (карбонат кальция, CaCO_3 , 19 мас.%). Термоцикилирование проводилось в трех диапазонах температур 750–770 °C, 1025–1075 °C, 1070–1090 °C с целью получения определенных структуры и свойств композитов, спрессованных под давлением 20, 40 и 60 МПа. Для контроля морфологии поверхности, изменения фазового состава, аморфности и параметров тонкой структуры, пористости, проницаемости и прочностных свойств проводили оценку образцов на каждом цикле процесса. На основе установленных закономерностей структурообразования предложены режимы формирования порового пространства с сохранением пористости не ниже 45 %, прочности – 5–25 МПа, усадки в процессе спекания – не более 20 %. Исследованные композиционные материалы могут быть использованы для создания фильтрующих элементов систем разделения, очистки, преобразования жидких и газообразных сред.

Ключевые слова: базальтовое волокно, термоцикилирование, спекание, силлиманит, аортит, пористость, проницаемость

Благодарности: работа выполнена в рамках задания 4.1.34 «Разработка и исследование керамических материалов с жесткой системой микрофильтрационных транспортных пор на основе базальтовых волокон» Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 годы, подпрограмма «Многофункциональные и композиционные материалы».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Петюшик Евгений Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе Государственного научно-производственного объединения порошковой металлургии Национальной академии наук Беларусь, <https://orcid.org/0009-0002-2709-1398>, e-mail: Pet65@bk.ru; Фомихина Ирина Викторовна – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией металлофизики Государственного научного учреждения «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа» Национальной академии наук Беларусь, <https://orcid.org/0009-0007-2164-412X>, e-mail: ivfom@tut.by; Дробыш Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, декан инженерно-педагогического факультета Белорусского национального технического университета, <https://orcid.org/0000-0001-6930-1213>, e-mail: ipf-ipo@bntu.by

Вклад авторов: *Петюшук Евгений Евгеньевич* – обоснование концепции, разработка дизайна экспериментального исследования, формулировка выводов, редактирование текста рукописи; *Фомихина Ирина Викторовна* – обоснование концепции, проведение инструментальных исследований, систематизация результатов, написание текста рукописи, формулировка выводов; *Дробыш Алексей Анатольевич* – обоснование концепции, разработка дизайна экспериментального исследования, проведение эксперимента, интерпретация результатов исследования.

Для цитирования: Петюшук, Е. Е. Закономерности формирования структуры и свойств пористых композитов на основе базальтового волокна в процессе термоциклирования / Е. Е. Петюшук, И. В. Фомихина, А. А. Дробыш // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 4. – С. 271–284. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-271-284>

Поступила в редакцию: 08.04.2025

Доработанный вариант: 15.07.2025

Утверждена к публикации: 03.12.2025

Подписана в печать: 19.12.2025

Original article

Evgeny E. Petyushik¹, Irina V. Fomikhina^{2*}, Aleksey A. Drobys³

¹*State Scientific and Production Association of Powder Metallurgy of the National Academy of Sciences of Belarus,
41, Platonov St., 220005, Minsk, Republic of Belarus*

²*State Scientific Institution “Institute of Powder Metallurgy named after Academician O. V. Roman”*

of the National Academy of Sciences of Belarus, 41, Platonov St., 220005, Minsk, Republic of Belarus

³*Belarusian National Technical University, 65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus*

REGULARITIES OF FORMATION OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF POROUS COMPOSITES BASED ON BASALT FIBER IN THE PROCESS OF THERMOCYLING

Abstract. The results of studying the structure and properties of two compositions of porous composite materials of the CaO–MgO–FeO(Fe₂O₃)–Al₂O₃–SiO₂ system based on basalt fiber formed during thermal cycling are presented. The samples made from the mixture of composition I had the following structure: basalt fiber (37 wt.%) + mullite-silica fiber (19 wt.%) + modifier Al₂(SO₄)₃ as a binder (11 wt.%) + blowing agent (19 wt.%) + porcelain as a hardener (4 wt.%) + plasticizer (11 wt.%); II composition: basalt fiber (52 wt.%) + SiO₂ (15 wt.%) + blowing agent (1 wt.%) + porcelain (aluminosilicate) as hardener (6.5 wt.%) + plasticizer (CMC, 6.5 wt.%) + limestone flour (calcium carbonate, CaCO₃, 19 wt.%). Thermal cycling was carried out in three temperature ranges of 750–770 °C, 1025–1075 °C, 1070–1090 °C in order to obtain certain structure and properties of composites pressed under pressure of 20, 40 and 60 MPa. To control surface morphology, changes in phase composition, amorphousness and fine structure parameters, porosity, permeability and strength properties, samples were evaluated at each process cycle. On the basis of established patterns of structure formation, modes of formation of pore space are proposed with preservation of porosity not lower than 45 %, strength 5–25 MPa, shrinkage in the process of sintering – not more than 20 %. The studied composite materials can be used to create filter elements of systems for separating, cleaning, converting liquid and gaseous media.

Keywords: basalt fiber, thermal cycling, sintering, sillimanite, anorthite, porosity, permeability

Acknowledgements: the work was performed within the framework of Assignment 4.1.34 “Development and research of ceramic materials with a rigid system of microfiltration transport pores based on basalt fibers” of the State Research Program “Materials science, new materials and technologies” for 2021–2025, the Subprogram “Multifunctional and composite materials”.

Conflict of interest: authors declare no conflict of interest.

Information about the authors: *Evgeny E. Petyushik* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Deputy Director General for Research at State Scientific and Production Association of Powder Metallurgy of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0009-0002-2709-1398>, e-mail: Pet65@bk.ru; *Irina V. Fomikhina* – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory of Metal Physics at State Scientific Institution “Academician O. V. Roman Institute of Powder Metallurgy” of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0009-0007-2164-412X>, e-mail: ivfom@tut.by; *Aleksey A. Drobys* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Dean of the Faculty of Engineering and Pedagogy at Belarusian National Technical University, <https://orcid.org/0000-0001-6930-1213>, e-mail: ipf-ipo@bntu.by

Contribution of the authors: *Evgeny E. Petyushik* – substantiation of the concept, development of the experimental study design, formulation of conclusions, editing the manuscript text; *Irina V. Fomikhina* – substantiation of the concept, conducting instrumental studies, systematization of results, writing the manuscript text, formulation of conclusions; *Aleksey A. Drobys* – substantiation of the concept, development of the experimental study design, conducting the experiment, interpretation of the research results.

For citation: Petyushik E. E., Fomikhina I. V., Drobys A. A. Regularities of formation of structure and properties of porous composites based on basalt fiber in the process of thermocycling. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-tehnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 4, pp. 271–284 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-271-284>

Received: 08.04.2025

Modified: 15.07.2025

Approved for publication: 03.12.2025

Signed to the press: 19.12.2025

Введение. Технологический прогресс требует высокоэффективных решений при создании передовых устройств для динамических систем разделения, очистки, преобразования (в том числе и каталитического) жидких и газообразных сред. Традиционно к таким изделиям предъявляются высокие требования по химической стойкости, механической прочности, пористости и возможности регенерации. Развитие и активное внедрение этих процессов в различных отраслях промышленности определяет совершенствование существующих и создание новых, особенно пористых, материалов на основе природных минералов волокновой структуры, которые обладают указанным комплексом свойств [1–3]. Несмотря на значительную востребованность, не только многослойные керамические материалы, разработанные в Республике Беларусь (Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Белорусский национальный технический университет), но и изделия мировых производителей (TAMI, Drager Medics, ООО «Керамикфільтр» и др.) характеризуются структурой, которая не всегда обеспечивает достаточный уровень служебных характеристик [2–4].

Совершенствование современной техники предполагает более широкое применение различных средств и способов, улучшающих качество пористых материалов. Для расширения области применения керамических пористых композиционных материалов (КПМ) стоит задача существенного повышения проницаемости при сохранении достаточной прочности. Керамика на основе дисперсных волокон характеризуется малым удельным весом в сочетании с повышенной прочностью, теплопроводностью, устойчивостью относительно тепловых ударов. Предположительно, создание КПМ на основе базальтовых волокон к указанным выше преимуществам добавит и увеличение коэффициента проницаемости [5; 6]. Однако ассортимент волокон, пригодных для создания технологически прочной керамики, ограничен свойствами исходного материала. При производстве базальтовых волокон в качестве сырья используются горные породы, химический состав которых близок по составу к алюмосиликатным порошкам и содержит (по массе): 45–55 % SiO_2 ; 10–20 % Al_2O_3 и до 20 % $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ и MgO . Как было ранее доказано, спекание подобной композиции будет происходить с участием жидкой фазы [7–11]. Таким образом, могут создаваться пористые материалы, характеризующиеся композиционной структурой, на основе волокнистой матрицы – КПМ. Пористые композиционные материалы на основе базальтовых волокон ранее не создавались [12; 13]. При исследовании свойств фильтрующих элементов на основе силикатов и алюмосиликатов было установлено, что сложные механизмы контактообразования и химические реакции в процессе термообработки приводят к напряженному состоянию материала готового изделия. Неблагоприятное структурно-механическое состояние является основным фактором, снижающим прочность рассматриваемых материалов. Необходимо создавать такие материалы, которые способны противостоять гидравлическим или пневматическим ударам, неизбежно возникающим при резком изменении давления в режиме регенерации обратной промывкой или продувкой. В большинстве случаев механическими характеристиками высокопористых материалов является прочность на сжатие и микротвердость. Основным направлением, позволяющим значительно улучшить характеристики и, следовательно, повысить конкурентоспособность керамических изделий, является создание композиционных материалов с разнофазной структурой. Существующие композиционные керамические материалы можно разделить на три основных класса: дисперсно-упрочненные, упрочненные частицами и армированные волокнами. Все эти структуры представляют собой матрицу основного материала, в котором распределена вторичная фаза, способная резко улучшить комплекс физико-механических свойств керамических изделий [14–20].

В настоящее время используются фильтрующие материалы в основном зарубежного производства, которые имеют высокую стоимость. Значительное снижение стоимости возможно путем использования отечественного силикатного и алюмосиликатного сырья, включая вторичные ресурсы, и создания пористых многослойных материалов [21–26]. Керамические материалы на основе силикатов и алюмосиликатов являются наиболее перспективными для использования в фильтрующих устройствах в связи с их высокой химической устойчивостью, высокой механической прочностью, стойкостью к воздействию абразивных частиц и бактерий, возможностью регенерации сочетанием различных методов и относительно невысокой стоимостью.

Цель работы – исследовать закономерности формирования структуры и свойств пористых композитов на основе базальтового волокна в процессе термоциклизации.

Материалы и методика исследования. Объектами исследования являлись образцы композитов двух составов (I, II) на основе базальтового волокна, сформированные в процессе трех циклов термоциклизации. Для контроля морфологии поверхности, изменения фазового состава, аморфности и параметров тонкой структуры, пористости, проницаемости и прочностных свойств проводили контроль образцов на каждом цикле термоциклизации.

Изготовленные из шихты I состава образцы имели следующую структуру: базальтовое волокно (37 мас.%) + муллитокремнеземистое волокно (19 мас.%) + модификатор $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ в качестве связки (11 мас.%) + порообразователь (19 мас.%) + фарфор в качестве упрочнителя (4 мас.%) + пластификатор (11 мас.%). После гранулирования осуществлялось радиальное прессование при давлениях 20 и 40 МПа. Термоциклизование композитов данного состава проводилось в диапазоне 1025–1075 °C. Маркировка образцов и режимы термоциклизации указаны в табл. 1.

Графическое изображение режимов термоциклизации композитов I состава представлено на рис. 1.

Таблица 1. Маркировка образцов и режимы термоциклизации композитов I состава

Table 1. Labeling of samples with thermal cycling modes of composites of the I composition

Маркировка образцов Marking of the samples	Давление прессования, МПа Pressing pressure, MPa	Режим термоциклизации Thermal cycling mode
1-1025-20 2-1050-20 3-1075-20	20	1-й цикл: нагрев от 20 до 1025 °C – выдержка 10 мин – охлаждение вместе с печью до 1000 °C – выдержка 10 мин 2-й цикл: нагрев от 1000 до 1050 °C – выдержка 10 мин – охлаждение вместе с печью до 1025 °C – выдержка 10 мин 3-й цикл: нагрев от 1025 до 1075 °C – выдержка 10 мин – охлаждение вместе с печью до полного остывания
1-1025-40 2-1050-40 3-1075-40	40	1st cycle: heating from 20 to 1025 °C – exposure for 10 minutes – cooling together with the furnace to 1000 °C – exposure for 10 minutes 2nd cycle: heating from 1000 to 1050 °C – exposure for 10 minutes – cooling together with the furnace to 1025 °C – exposure for 10 minutes 3rd cycle: heating from 1025 to 1075 °C – exposure for 10 minutes – cooling together with the furnace until complete cooling

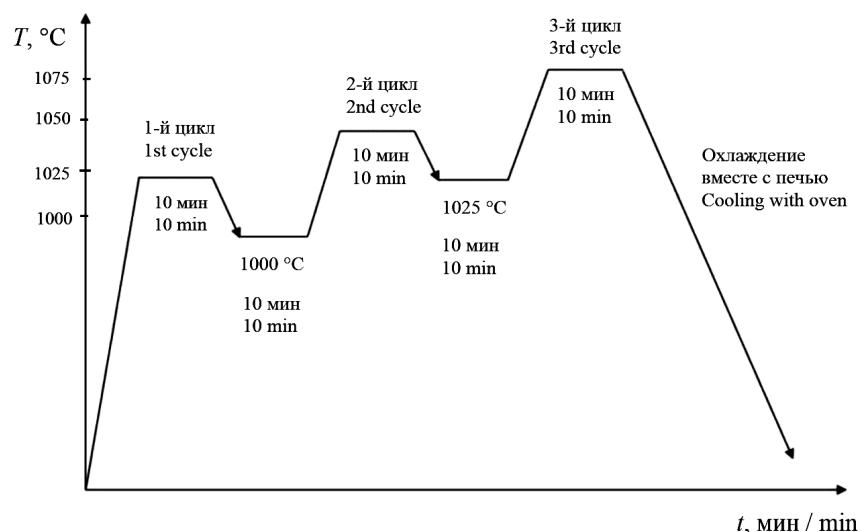


Рис. 1. Графическое изображение режимов термоциклизации композита I состава в интервале 1025–1075 °C

Fig. 1. Graphical representation of the thermal cycling modes of composites of composition I in the range of 1025–1075 °C

Изготовленные из шихты II состава образцы имели следующую структуру: базальтовое волокно (52 мас.%) + SiO_2 (15 мас.%) + порообразователь (1 мас.%) + фарфор (алюмосиликат) в качестве упрочнителя (6,5 мас.%) + пластификатор (КМЦ, 6,5 мас.%) + известняковая мука (карбонат кальция, CaCO_3 , 19 мас.%). Прессование осуществлялось при давлениях 20 МПа, 40 и 60 МПа, термоциклизирование – в температурных интервалах 750–770 °C и 1070–1090 °C. Маркировка образцов II состава и режимы термоциклизирования указаны в табл. 2.

Таблица 2. Маркировка образцов с режимами термоциклизирования композитов II состава
Table 2. Labeling of samples with thermal cycling modes of composites of the II composition

Маркировка образца Marking of the sample	Давление прессования, МПа Pressing pressure, MPa	Режим термоциклизирования Thermal cycling mode
1-750-20	20	1-й цикл: нагрев от 20 до 750–770 °C – выдержка 15 мин – охлаждение вместе с печью до 500 °C 2-й цикл: нагрев от 500 до 750–770 °C – выдержка 15 мин – охлаждение вместе с печью до 500 °C
2-750-40	40	3-й цикл: нагрев от 500 до 750–770 °C – выдержка 15 мин – охлаждение вместе с печью до полного остывания
3-750-60	60	1st cycle: heating from 20 to 750–770 °C – exposure for 15 min – cooling with oven to 500 °C 2nd cycle: heating from 500 to 750–770 °C – exposure for 15 min – cooling together with the oven to 500 °C 3rd cycle: heating from 500 to 750–770 °C – exposure for 15 min – cooling with the oven until completely cooled
1-1070-20	20	1-й цикл: нагрев от 20 до 1070–1090 °C – выдержка 10 мин – охлаждение вместе с печью до 750 °C 2-й цикл: нагрев от 750 до 1070–1090 °C – выдержка 10 мин – охлаждение вместе с печью до 750 °C
2-1070-40	40	3-й цикл: нагрев от 750 до 1070–1090 °C – выдержка 10 мин – охлаждение вместе с печью до полного остывания 1st cycle: heating from 20 to 1070–1090 °C – exposure for 10 min – cooling with oven to 750 °C 2nd cycle: heating from 750 to 1070–1090 °C – exposure for 10 min – cooling with the oven to 750 °C
3-1070-60	60	3rd cycle: heating from 750 to 1070–1090 °C – exposure for 10 min – cooling with the oven until completely cooled

Графическое изображение режимов термоциклизирования композитов II состава представлено на рис. 2.

В качестве исходных материалов использовали рубленое базальтовое волокно марки БС16–12–76 (диаметр волокна 12 мкм, длина до 16 мм); муллитокремнеземистое волокно, упрочняющий агент – продукт размола боя изделий из политого фарфора (ГОСТ 28390–89¹, ЗАО «Добрушский фарфоровый завод»); модификаторы – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, CaCO_3 ; порообразователи – мука хлебопекарная (ГОСТ 26574–85²), полистирол; пластификаторы – водный раствор карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ), водный раствор поливинилового спирта (ПВС). Шихту для прессования экспериментальных образцов готовили смешиванием ингредиентов в лабораторном шнековом смесителе непрерывного действия. Для достижения максимально возможных значений пористости и прочности соотношение ингредиентов в шихте определялось экспериментальным путем. Прессование экспериментальных образцов $\varnothing 16$ мм и высотой 16 мм производили на лабораторном прессе ПГПр, спекание образцов – в печи сопротивления типа SNOL на воздухе. Диапазон температур спекания 1025–1075 °C ограничивался требованиями сохранения пористости не ниже 45 %, прочности – 5–25 МПа, усадки в процессе спекания – не более 20 %.

Известно [8–12], что в данных диапазонах температур происходит образование фаз силлиманита ($\text{Al}_2\text{O}_5\text{Si}$) и анортита ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), входящих в состав жидкофазных эвтектик, которые

¹ ГОСТ 28390–89. Изделия фарфоровые. Технические условия. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. 9 с. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294826/4294826392.pdf>

² ГОСТ 26574–85. Мука пшеничная хлебопекарная. Технические условия. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. 6 с. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294827/4294827861.pdf>

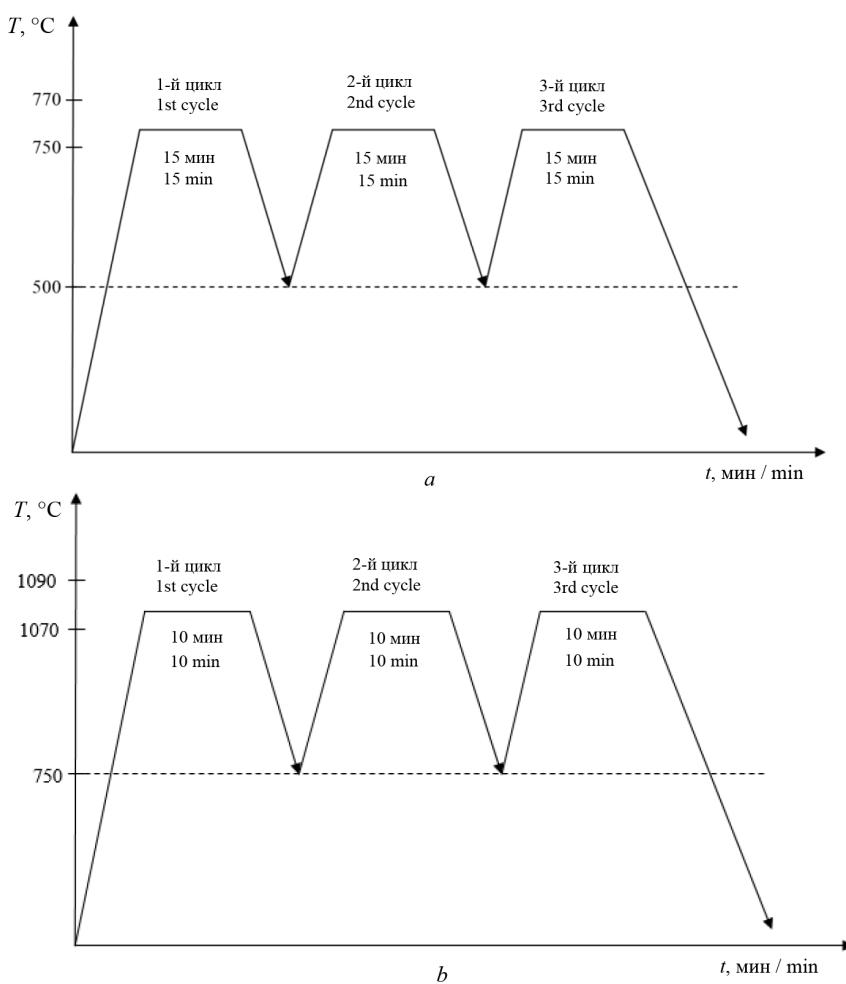


Рис. 2. Графическое изображение режимов термоциклизации композитов II состава:
a – интервал 750–770 °C; b – интервал 1070–1090 °C

Fig. 2. Graphical representation of the thermal cycling modes of composites of composition II:
a – interval 750–770 °C; b – interval 1070–1090 °C

участвуют в образовании контактов при спекании композитов. Термоциклирование увеличивает их количество, повышая прочность. Охлаждение при термоциклах до 500 и 750 °C не позволяет полностью заполнить поровое пространство жидкой фазой и частично сохраняет аморфность. Диссоциация карбоната кальция CaCO_3 при 500 °C [13–15] выступает катализатором процесса образования силлиманита, при 750 °C – анортита за счет своей модифицирующей функции.

Морфологический анализ поверхности и микрорентгеноспектральный анализ осуществлялись на аттестованном сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения Mira (TESCAN, Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором INCA Energy 350 (Oxford Instruments Analytical, Великобритания). Погрешность метода составила 3–5 %.

Исследование фазового состава и рентгеноструктурный анализ выполнялись на рентгеновском дифрактометре Ultima IV (Rigaku) в CuK_α -излучении. Для определения фазового состава исследуемых образцов проводилась съемка рентгенограмм в непрерывном режиме с заданным шагом по углу $0,2^\circ$ и интервалом углов $2\theta = 3\text{--}80^\circ$ (данные условия съемки выбирались с учетом нахождения линий предполагаемых фаз картотеки COD). Сбор и обработка информации осуществлялась с помощью программы Standard Measurement, расшифровка фазового состава и рентгеноструктурного анализа полученных рентгенограмм проводилась в программе PDXL2 (разработчик программ Rigaku Corporation).

Испытание на сжатие проводилось на универсальной испытательной машине Tinius Olsen H150K-U (Великобритания). Погрешность измерения составила 1 %. Пористость и проницаемость определялась на автоматизированном порометре капиллярных потоков Porolux 500 (Германия)

по исследованию порошковых материалов газодинамическим методом, общая пористость – методом гидростатического взвешивания.

Результаты исследования и их обсуждение. Морфология поверхности и диаграммы сжатия композитов I состава (по массе): 37 % базальтовое волокно + 19 % муллитокремнеземистое волокно + 11 % модификатор $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ + 4 % фарфор + 19 % порообразователь + 10 % пластификатор, после прессования при 20 и 40 МПа, сформированных в процессе трех циклов термоциклирования в диапазоне температур 1025–1075 °C приведены на рис. 3.

Изучение морфологии поверхности композитов на основе базальтового волокна, спрессованных при давлении 20 МПа, после проведения трех циклов термоциклирования в диапазоне 1025–1075 °C выявило, что за счет спекания базальтового волокна в композите происходит образование каркасной структуры при сохранении небольшого процента «гладкости» поверхности волокон, указывающей на аморфность (см. рис. 3, a–c). Спекание изменяет структуру порового пространства от щелевидной формы до объемно-равноосной с уменьшением среднего размера пор от 59,0 до 15,2 мкм, снижает проницаемость от $30,9 \cdot 10^{-12}$ до $13,8 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ и открытую пористость – от 75,5 до 56,1 %. С увеличением до трех циклов нагрева повышается предел прочности на сжатие с 2,9 по 14,9 МПа.

Прессование при давлении 40 МПа приводит к уплотнению волокон и образованию регулярной пористой структуры (см. рис. 3, d–f). Увеличение количества термоциклов практически не влияет на средний размер пор (15,1 мкм при одном цикле и 14,4 мкм при трех циклах). Изменения газовой проницаемости и пористости также не наблюдается. Газовая проницаемость составляет $11 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, пористость в среднем – 58 %. Предел прочности на сжатие увеличивается с 11,9 по 31,5 МПа. Поверхность волокон остается практически гладкой.

Анализ диаграмм сжатия (см. рис. 3, c, f) показал, что в образцах, спрессованных при 20 МПа, происходит значительное разрушение волокон при небольших нагрузках 0,5–1,4 кН. Максимальный

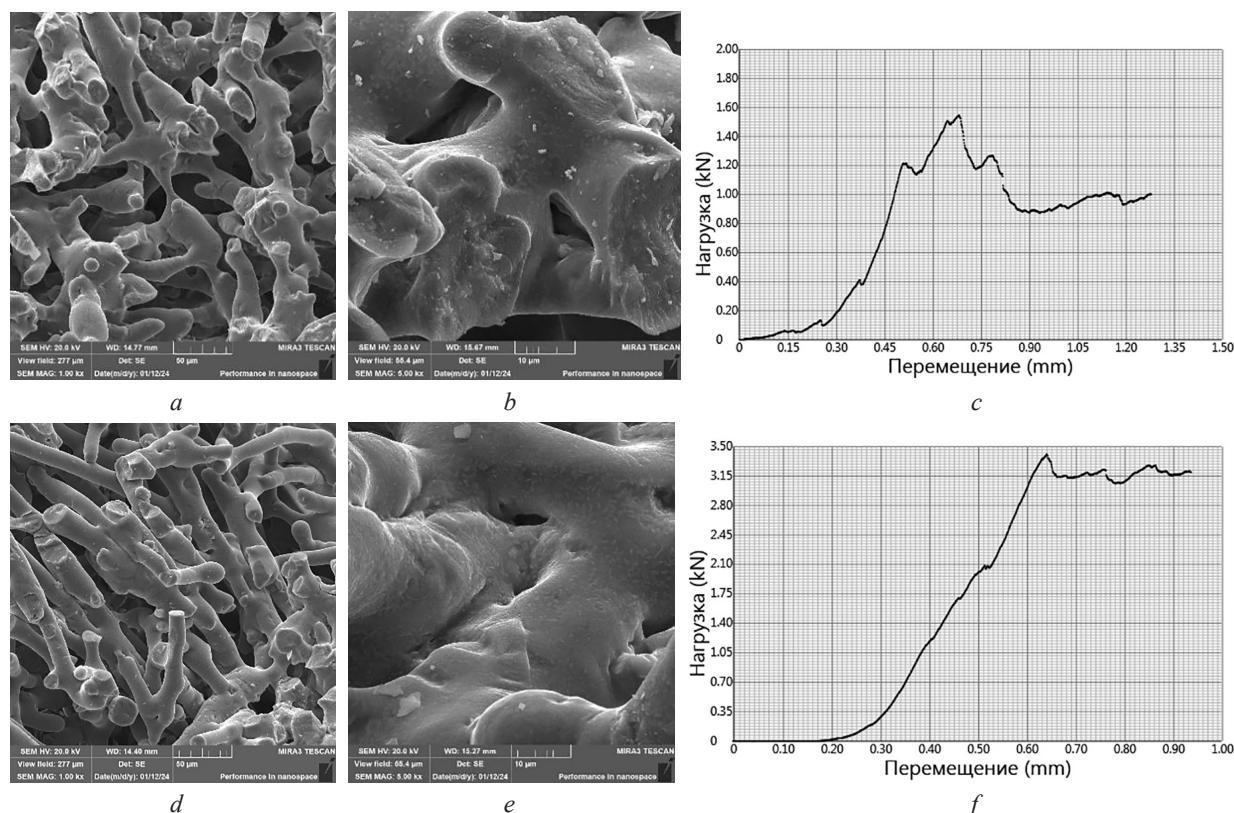


Рис. 3. Морфология поверхности и диаграммы сжатия композитов I состава после трех циклов термоциклирования в диапазоне температур 1025–1075 °C: a–c – давление прессования 20 МПа; d–f – давление прессования 40 МПа

Fig. 3. Surface morphology and compression diagrams of composites of composition I after three cycles of thermal cycling in the temperature ranges 1025–1075 °C: a–c – pressing pressure 20 MPa; d–f – pressing pressure 40 MPa

предел прочности на сжатие составляет 14,9 МПа. Дальнейшее увеличение испытательной нагрузки «прессует» разрушенные волокна, о чем свидетельствует образование полочки на диаграмме. При давлении 40 МПа значение выдерживаемых нагрузок повышается до 3,4 кН с увеличением предела прочности до 31,5 МПа. Полочка на диаграмме также присутствует, однако отличается плавностью распределения, что говорит о меньшем разрушении волокон.

Исследование фазового состава композитов на основе базальтового волокна, спрессованных при давлениях 20 и 40 МПа, после проведения трех циклов термоциклирования в диапазоне 1025–1075 °C установило, что на поверхности базальтового волокна на основе $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ образуется эвтектическая фаза следующего состава: анортит ($\text{CaAl}_2\text{SiO}_8$), силлиманит (Al_2SiO_5). Гематит (Fe_2O_3) и магнезиоферрит (MgFe_2O_4) входят в состав базальтового волокна. Термоцикливание изменяет процентное содержание фаз без образования новых. Исходя из данных, представленных в табл. 3, можно заключить, что с увеличением количества циклов уменьшается степень аморфности волокна с кристаллизацией значительного количества кварца (SiO_2).

Таблица 3. Рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализы композитов на основе базальтового волокна, спрессованных при давлении 40 МПа, после проведения трех циклов термоциклирования в диапазоне 1025–1075 °C

Table 3. X-ray phase- and X-ray diffraction analyses of basalt fiber composites compressed at a pressure of 40 MPa after three thermal cycling cycles in the range of 1025–1075 °C

Маркировка, режим термоциклирования Marking, thermal cycling mode	Фазовый состав Phase composition	Содержание фазы, % Phase content, %	Размер кристаллитов, нм Size of crystallites, nm	Аморфность, % Amorphous, %
1-1025-40, 1-й цикл 1-1025-40, 1st cycle	SiO_2 (кварц / quartz)	13	19,5	12
	$\text{CaAl}_2\text{SiO}_8$ (анортит / anorthite)	42	2,6	
	Al_4SiO_5 (муллит / mullit)	14	2,1	
	Al_2SiO_5 (силлиманит / sillimanite)	20	2,1	
	Fe_2O_3 (гематит / hematite)	4	9,3	
	MgFe_2O_4 (магнезиоферрит / magnesioferrite)	7	5,2	
2-1050-40, 2-й цикл 2-1050-40, 2nd cycle	SiO_2 (кварц / quartz)	14	4,8	9
	$\text{CaAl}_2\text{SiO}_8$ (анортит / anorthite)	42	2,4	
	Al_4SiO_5 (муллит / mullit)	21	2,3	
	Al_2SiO_5 (силлиманит / sillimanite)	9	1,1	
	Fe_2O_3 (гематит / hematite)	7	11,6	
	MgFe_2O_4 (магнезиоферрит / magnesioferrite)	7	6,3	
3-1075-40, 3-й цикл 3-1075-40, 3rd cycle	SiO_2 (кварц / quartz)	24	4,1	6
	$\text{CaAl}_2\text{SiO}_8$ (анортит / anorthite)	43	1,9	
	Al_4SiO_5 (муллит / mullit)	13	1,2	
	Al_2SiO_5 (силлиманит / sillimanite)	7	1,2	
	Fe_2O_3 (гематит / hematite)	6	1,1	
	MgFe_2O_4 (магнезиоферрит / magnesioferrite)	7	5,6	

Результаты исследования показывают, что после проведения 3-го цикла (относительно одного цикла) за счет образования новых центров кристаллизации происходит измельчение кристаллитов кварца с 19,5 до 4,1 нм.

Определено, что в композитах, спрессованных при 20 МПа, прочность на сжатие не превышает 14,9 МПа, что объясняется разнозернистостью кристаллитов (от 4,5 до 15,4 нм). Образование мелкодисперсной структуры нанометрового уровня (1,9–4,1 нм) в композитах, спрессованных при 40 МПа, увеличивает прочность на сжатие до 31,5 МПа при уменьшении аморфного состояния до 6 %.

Морфология поверхности и рентгенограммы композитов II состава (по массе): 52 % базальтовое волокно + 13 % SiO_2 + 10 % модификатор CaCO_3 + 6 % фарфор + 12 % порообразователь + 7 % пластификатор, спрессованных при давлениях 20, 40 МПа, после трех циклов термоциклирования в диапазонах 750–770 °C и 1070–1090 °C представлены на рис. 4.

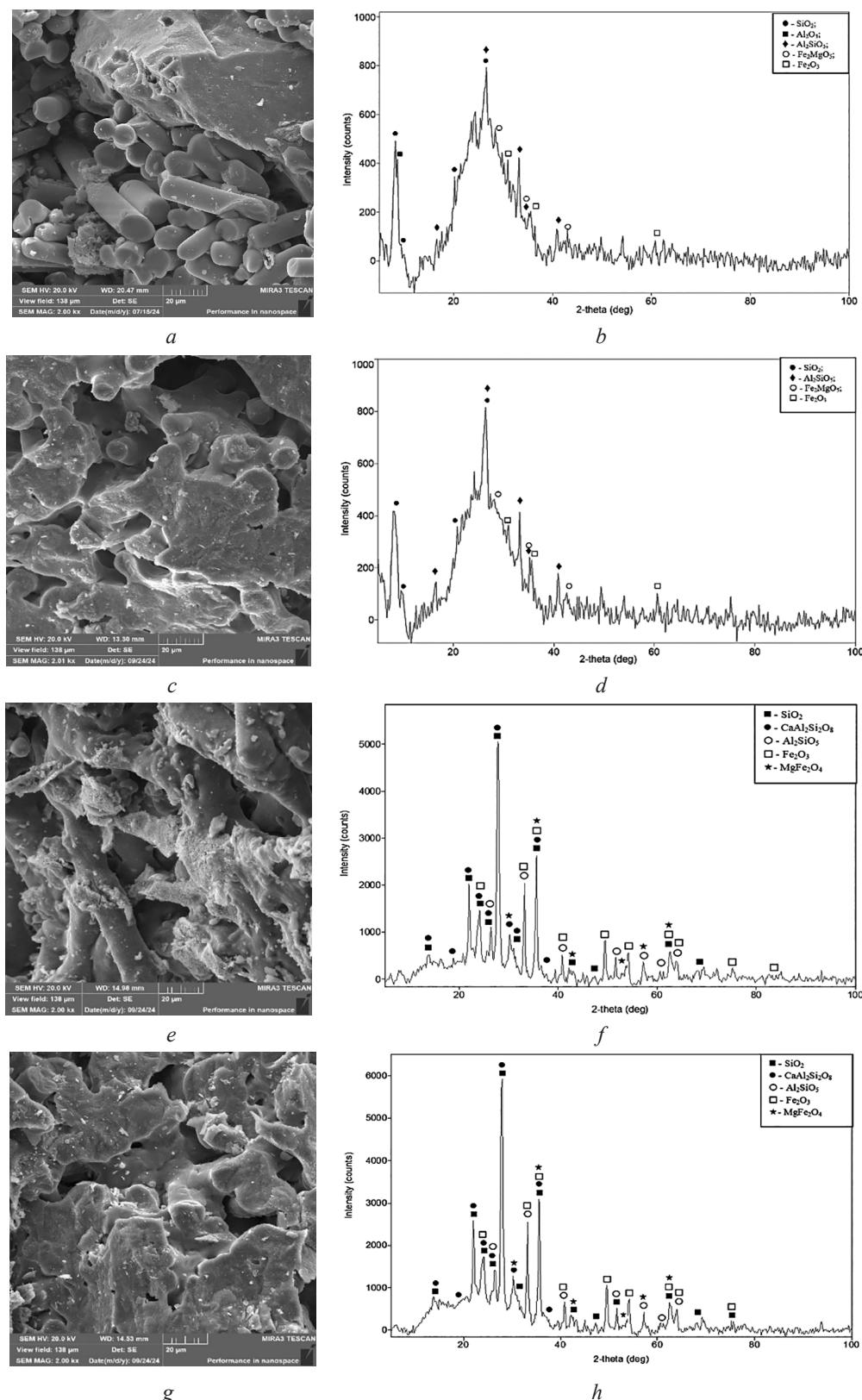


Рис. 4. Морфология поверхности и рентгенограммы композитов II состава после трех циклов термоциклирования в диапазонах температур 750–770 °C (a, b, e, f) и 1070–1090 °C (c, d, g, h): a–d – давление прессования 20 МПа; e–h – давление прессования 40 МПа

Fig. 4. Surface morphology and X-ray diffraction patterns of composites of composition II after three cycles of thermocycling in the temperature ranges of 750–770 °C (a, b, e, f) and 1070–1090 °C (c, d, g, h):
 a–d – pressing pressure of 20 MPa; e–h – pressing pressure of 40 MPa

На рис. 4 показано, что после трех циклов термоциклирования в диапазонах 750–770 °C и 1070–1090 °C происходит спекание волокон в композитах и формирование порового пространства. В температурном интервале 750–770 °C поровое пространство формируется из мелких и крупных пор размером 1–5 мкм и 60–100 мкм соответственно. В температурном интервале 1070–1090 °C из-за образования большого количества жидкой эвтектической фазы мелкие поры практически зарастают, крупные поры незначительно уменьшаются до размера 50–90 мкм. Термоциклирование в выбранных температурных интервалах позволяет регулировать поровое пространство. Увеличение давления прессования до 40 МПа и проведение трех циклов термоциклирования в температурном интервале 750–770 °C обеспечивает образование большего количества связей между волокнами и силлиманита (Al_2O_5Si) как упрочняющей фазы. Данный режим увеличивает предел прочности на сжатие до 9 МПа в сравнении с образцами, спрессованными при давлении 20 МПа, имеющими предел прочности на сжатие 4 МПа. В образце, спрессованном при 40 МПа, после трех циклов термоциклирования в диапазонах 750–770 °C (рис. 5) наблюдается уменьшение размера сквозных пор (максимальный – 72,10 мкм; средний – 5,26 мкм; минимальный – 0,87 мкм) относительно образцов, спрессованных при 20 МПа, при удовлетворительной газовой проницаемости $7,89 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$.

При проведении трех циклов термоциклирования в температурном интервале 1070–1090 °C образцов II состава образование фаз анортита ($CaAl_2Si_2O_8$) до 45 % и кварца (SiO_2) до 48 % повыш-

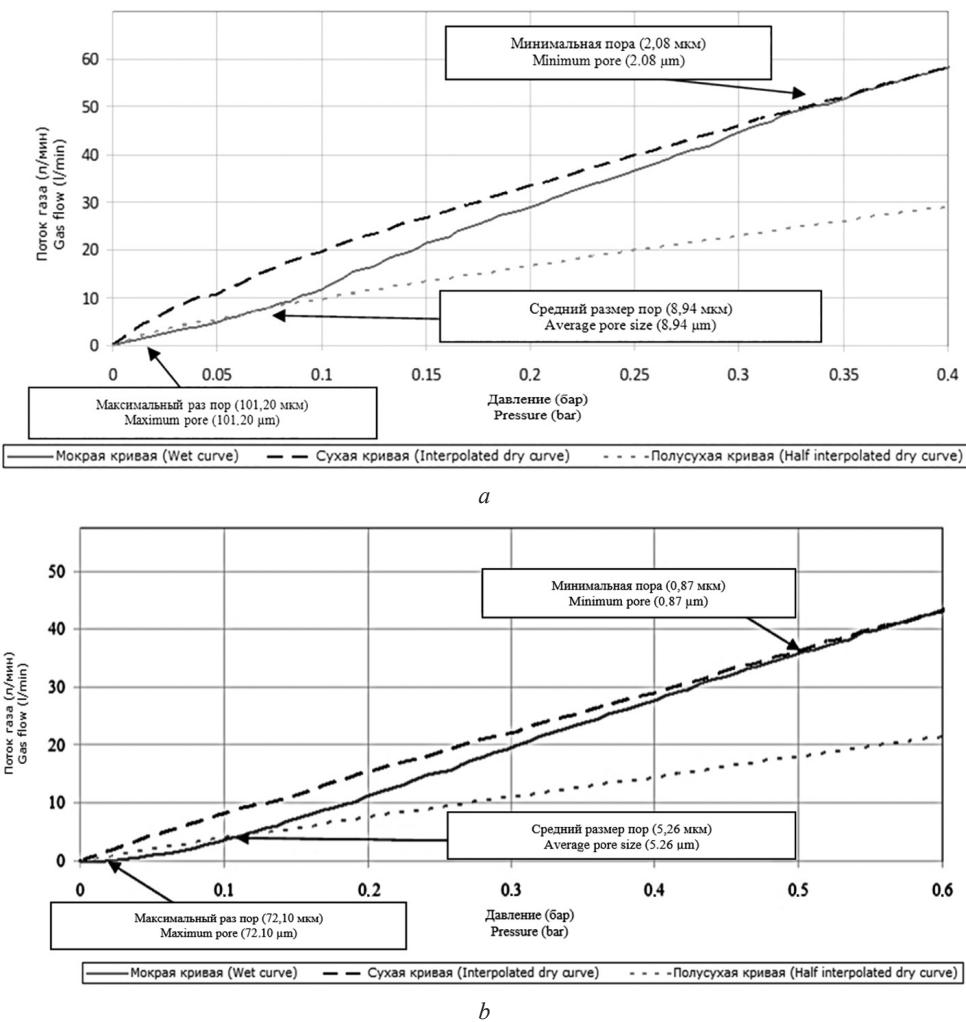


Рис. 5. Результаты исследования пористости, газовой проницаемости и размера пор образцов II состава после трех циклов термоциклирования в температурном интервале 750–770 °C:
a – давление прессования 20 МПа; *b* – давление прессования 40 МПа

Fig. 5. Results of the study of porosity, gas permeability and pore size of samples of composition II after three cycles of thermal cycling in the temperature ranges of 750–770 °C: *a* – pressing pressure 20 MPa; *b* – pressing pressure 40 MPa

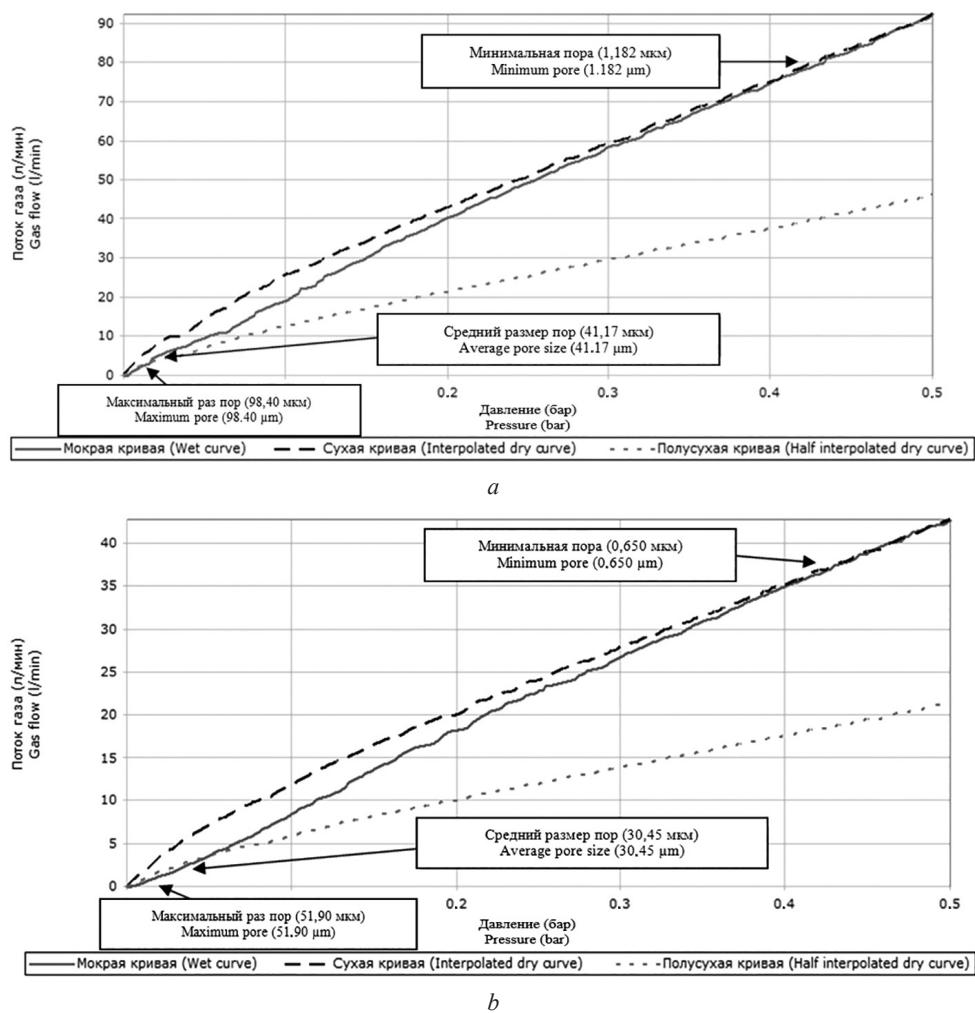


Рис. 6. Результаты исследования пористости, газовой проницаемости и размера пор образцов II состава после трех циклов термоциклирования в температурном интервале 1070–1090 °C: *a* – давление прессования 20 МПа; *b* – давление прессования 40 МПа

Fig. 6. Results of the study of porosity, gas permeability and pore size of samples of composition II after three cycles of thermal cycling in the temperature ranges 1070–1090 °C: *a* – pressing pressure of 20 MPa; *b* – pressing pressure of 40 MPa

шает предел прочности на сжатие до 50 МПа, однако ведет к застаранию пор. Размер мелких пор образцов, спрессованных при 40 МПа, уменьшается до 0,65 мкм, крупных – до 51,90 мкм при их среднем размере 30,45 мкм относительно образцов, спрессованных при 40 МПа, что приводит к снижению газовой проницаемости до $4,42 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ и общей пористости – до 27,3 % (рис. 6).

Заключение. Исследованы пористые композиционные материалы составов (по массе): I – 37 % базальтовое волокно + 19 % муллитокремнеземистое волокно + 11 % модификатор Al_2SO_4 + 4 % фарфор + 19 % порообразователь + 10 % пластификатор; II – 52 % базальтовое волокно + 13 % SiO_2 + 10 % модификатор CaCO_3 + 6 % фарфор + 12 % порообразователь + 7 % пластификатор, спрессованные при давлениях 20 и 40 МПа, после трех циклов термоциклирования в диапазонах температур 1025–1075 °C (I состав), 750–770 и 1070–1090 °C (II состав).

Определено, что в композитах I состава, спрессованных при 40 МПа, после трех циклов термоциклирования в диапазоне температур 1025–1075 °C происходит уменьшение среднего размера пор от 59,0 до 15,2 мкм, проницаемости – от $30,9 \cdot 10^{-12}$ до $13,8 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ и открытой пористости – от 75,5 до 56,1 %, повышение предела прочности на сжатие – до 31,5 МПа.

Установлено, что увеличение давления прессования до 40 МПа и проведение трех циклов термоциклирования в температурном интервале 750–770 °C (II состав) обеспечивает образование большего количества связей между волокнами и силлиманита ($\text{Al}_2\text{O}_5\text{Si}$) как упрочняющей фазы. Предел прочности на сжатие увеличивается до 9 МПа. После трех циклов термоцикли-

рования в диапазоне 750–770 °C (II состав) уменьшается размер сквозных пор (максимальный – 72,10 мкм; средний 5,26 мкм; минимальный – 0,87 мкм) при удовлетворительной газовой проницаемости в $7,89 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$.

Термоциклирование в температурном интервале 1070–1090 °C (II состав) приводит к образованию фаз – анортита ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) до 45 % и кварца (SiO_2) до 48 %, повышению предела прочности на сжатие до 50 МПа, зарастанию пор. Размер мелких пор уменьшается до 0,65 мкм, крупных пор – до 51,90 мкм, снижаются газовая проницаемость до $4,42 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ и общая пористость – до 27,3 %.

Результаты исследования показывают, что термоциклирование в выбранных диапазонах температур 1025–1075 °C (I состав), 750–770 и 1070–1090 °C (II состав) позволяет регулировать размер пор, проницаемость, аморфность, состав и количество упрочняющих фаз для получения заданной структуры и прочности композитов.

Список использованных источников

1. Витязь, П. А. Фильтрующие материалы: свойства, область применения, технология изготовления / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, Р. А. Кусин; под ред. П. А. Витязя. – Мин.: НИИ ПМ с ОП, 1999. – 304 с.
2. Влияние природы связующего на структурно-механические свойства пористой силикатной керамики / А. И. Ратько, А. И. Иванец, Е. А. Степанова, С. М. Азаров // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2009. – Т. 45, № 2. – С. 222–227.
3. Модифицирование поверхности высокопористых керамических материалов / В. Н. Анциферов, С. Е. Порозова, Е. В. Матыгуллина, Р. М. Хафизова // Огнеупоры и техническая керамика. – 2004. – № 8. – С. 2–4.
4. Пути совершенствования технологии и свойств конструкционных керамических материалов / Г. И. Бердов, В. А. Лиенко, П. М. Плетнев, И. И. Рогов // Конструкции из композиционных материалов. – 2004. – № 2. – С. 5–9.
5. Влияние размера частиц порошка на структурные характеристики пористых проницаемых макротел на основе природного кварца / О. П. Реут, Е. Е. Петюшник, С. М. Азаров, А. А. Дробыш // Порошковая металлургия: респ. межведомств. сб. науч. тр. / Бел. респ. науч.-произв. об-ние порошк. металлургии. – Мин., 2006. – Вып. 29. – С. 337–341.
6. Investigation of the structure and properties of ceramic materials with a rigid system microfiltration transport pores based on basalt fibers / S. Besarab, S. Azarov, J. Sauka [et al.] // ChemRxiv. – 2021. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2021-46cg5>
7. Минералы. Диаграммы фазовых равновесий: справочник: в 2 вып. / Акад. наук СССР, Ин-т геологии рудных месторождений петрографии, минералогии и геохимии; отв. ред.: Ф. В. Чухров, И. А. Островский, В. В. Лапин. – М.: Наука, 1974. – Вып. 1: Фазовые равновесия, важные для природного минералообразования. – 515 с.
8. Рабухин, А. И. Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных соединений / А. И. Рабухин, В. Г. Савельев. – М.: Инфра-М, 2009. – 302 с.
9. Лукин, Е. С. Пористая проницаемая керамика из оксида алюминия / Е. С. Лукин, А. Л. Кутейникова, Н. А. Попова // Стекло и керамика. – 2003. – № 3. – С. 17–18.
10. Особенности формирования пористых структур керамических материалов с различными выгорающими компонентами / С. Л. Радченко, Е. М. Дятлова, Т. В. Колонтаева, В. А. Бирюк // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2003. – Т. 76, № 1. – С. 107–110.
11. Воробьева, В. В. Влияние тонкодисперсной составляющей на формирование пористой проницаемой структуры керамики / В. В. Воробьева, В. Г. Леонов // Стекло и керамика. – 2002. – Т. 75, № 6. – С. 21–23.
12. Закономерности влияния температуры спекания и состава упрочняющего компонента на прочность композиционных материалов на основе базальтового волокна / Е. Е. Петюшник, И. В. Фомихина, Л. В. Маркова [и др.] // Порошковая металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. / Нац. акад. наук Беларуси, Гос. науч.-произв. об-ние порошк. металлургии, Ин-т порошк. металлургии; редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Мин., 2022. – Вып. 45. – С. 136–142.
13. Пористая алюмосиликатная керамика / С. М. Азаров, Е. Е. Петюшник, Т. А. Азарова [и др.]. – Мин.: Ковчег, 2009. – 258 с.
14. Корнилов, А. В. Причины различного влияния известковых глин на прочностные характеристики керамики / А. В. Корнилов // Стекло и керамика. – 2005. – Т. 78, № 12. – С. 30–32.
15. Рыжков, И. В. Физико-химические основы формирования свойств смесей с жидким стеклом / И. В. Рыжков, В. С. Толстой. – Харьков: Высш. шк., 1975. – 139 с.
16. Hwang, S.-L. Grain size control of tetragonal zirconia polycrystals using the space charge concept / S.-L. Hwang, I.-W. Chen // Journal of the American Ceramic Society. – 1990. – Vol. 73, iss. 11. – P. 3269–3277. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb06449.x>
17. Ikeda, J. A. S. Space charge segregation at grain boundaries in titanium dioxide: I, Relationship between lattice defect chemistry and space charge potential / J. A. S. Ikeda, Y.-M. Chiang // Journal of the American Ceramic Society. – 1993. – Vol. 76, iss. 10. – P. 2437–2446. <http://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1993.tb03964.x>
18. Space Charge Segregation at Grain Boundaries in Titanium Dioxide: II, Model Experiments / J. A. S. Ikeda, Y.-M. Chiang, A. J. Garratt-Reed, J. B. Vander // Journal of the American Ceramic Society. – 1993. – Vol. 76, iss. 10. – P. 2447–2459. – <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1993.tb03965.x>

19. Chiang, Y.-M. Grain-Boundary Chemistry of Barium Titanate and Strontium Titanate: I, High-Temperature Equilibrium Space Charge / Y.-M. Chiang, T. Takagi // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1990. – Vol. 73, iss. 11. – P. 3278–3285. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb06450.x>
20. Chiang, Y.-M. Grain-Boundary Migration in Nonstoichiometric Solid Solutions of Magnesium Aluminate Spinel: II, Effects of Grain-Boundary Nonstoichiometry / Y.-M. Chiang, W. D. Kingery // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1990. – Vol. 73, iss. 5. – P. 1153–1158. – <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05172.x>
21. Bennison, S. J. A history of the role of MgO in the sintering of α -Al₂O₃ / S. J. Bennison, M. P. Harmer // *Ceramic Transactions* / eds.: C. A. Handwerker, J. E. Blendell, W. A. Kaysser. – Columbus, OH: American Ceramic Society, 1990. – Vol. 7: Sintering of Advanced Ceramics. – P. 13–49.
22. Johnson, W. C. A Test of the Second-Phase and Impurity-Segregation Models for MgO-Enhanced Densification of Sintered Alumina / W. C. Johnson, R. L. Coble // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1978. – Vol. 61, iss. 3–4. – P. 110–114. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1978.tb09250.x>
23. Grain-Growth Kinetics for Alumina in the Absence of a Liquid Phase / J. Stephen, S. Bennison, P. Martin, M. Harmer // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1985. – Vol. 68, iss. 1. – P. C-22–C-24. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1985.tb15259.x>
24. Berry, K. A. Effect of MgO Solute on Microstructure Development in Al₂O₃ / K. A. Berry, M. P. Harmer // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1986. – Vol. 69, iss. 2. – P. 143–149. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1986.tb04719.x>
25. Baik, S. Segregation of Mg to the (0001) Surface of Single-Crystal Alumina: Quantification of AES Results / S. Baik // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1986. – Vol. 69, iss. 5. – P. C-101–C-103. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1986.tb04780.x>
26. Baik, S. Anisotropic Calcium Segregation to the Surface of Al₂O₃ / S. Baik, C. L. White // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1987. – Vol. 70, iss. 9. – P. 682–688. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1987.tb05739.x>

References

1. Vityaz P. A., Kaptsevich V. M., Kusin R. A. *Filtering Materials: Properties, Scope, Manufacturing Technology*. Minsk, Research Institute of Powder Metallurgy with Pilot Production Publ., 1999. 304 p. (in Russian).
2. Rat'ko A. I., Ivanets A. I., Stepanova E. A., Azarov S. M. Binder influence on the structural and mechanical properties of porous silicate ceramics. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2009, vol. 45, no. 2, pp. 207–211. <https://doi.org/10.1134/s2070205109020142>
3. Anziferov V. N., Porozova C. E., Matiygullina E. V., Chafizova R. M. Surface modification of high-porous ceramic materials. *Ogneupory i technicheskaja keramika = Refractories and Technical Ceramics*, 2004, no. 8, pp. 2–4 (in Russian).
4. Berdov G. I., Lienko V. A., Pletnev P. M., Rogov I. I. Ways to improve the technology and properties of structural ceramic materials. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov = Composite Materials Constructions*, 2004, no. 2, pp. 5–9 (in Russian).
5. Berdov G. I., Lienko V. A., Pletnev P. M., Rogov I. I. The effect of powder particle size on the structural characteristics of porous permeable macrobodies based on natural quartz. *Poroshkovaya metallurgiya: resp. mezhvedomstv. sb. nauch. tr. [Powder Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]*. Minsk, 2006, iss. 29, pp. 337–341 (in Russian).
6. Besarab S., Azarov S., Sauka J., Petyushik E., Azarova T., Drobyshev A. Investigation of the structure and properties of ceramic materials with a rigid system microfiltration transport pores based on basalt fibers [preprint]. *ChemRxiv*. 2021. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2021-46cg5>
7. Chukhrov F. V., Ostrovsky I. A., Lapin V. V. (eds). *Minerals. Phase Equilibrium Diagrams: Guide. Vol. 1: Phase Equilibria Important for Natural Mineral Formation*. Moscow, Nauka, 1974. 515 p. (in Russian).
8. Rabukhin, A. I., Savelyev V. G. *Physical Chemistry of Refractory Non-Metallic and Silicate Compounds*. Moscow, Infra-M Publ., 2008. 304 p. (in Russian).
9. Lukin E. S., Kuteinikova A. L., Popova N. A. Porous Permeable Ceramics Based on Aluminum Oxide. *Glass and Ceramics*, 2003, vol. 60, pp. 81–82. <https://doi.org/10.1023/a:1024727830665>
10. Radchenko S. L., Dyatlova E. M., Kolontayeva T. V., Biryuk V. A. Features of formation of porous structures of ceramic materials with different burning components. *Vestsi Natsyyan'ni akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2003, vol. 76, no. 1, pp. 107–110 (in Russian).
11. Vorob'eva V. V., Leonov V. G. The Effect of the Finely Dispersed Component on the Formation of a Porous Permeable Structure in Ceramics. *Glass and Ceramics*, 2002, vol. 59, no. 5–6, pp. 205–207. <https://doi.org/10.1023/a:1020444416597>
12. Petyushik E. E., Fomikhina I. V., Markova L. V., Gamzeleva T. V., Dershen A. V., Drobyshev A. A., Evtukhova T. E. Regularities of the effect of sintering temperature and composition of the reinforcing component on the strength of composite materials based on basalt fiber. *Poroshkovaya metallurgiya: resp. mezhved. sb. nauch. tr. [Powder Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]*. Minsk, 2022, iss. 45, pp. 136–142 (in Russian).
13. Azarov S. M., Piatsiushyk E. E., Azarova T. A., Rat'ko A. I., Reut O. P., Makartshuk D. V. *Porous Aluminosilicate Ceramics*. Minsk, Kovcheg Publ., 2009. 258 p. (in Russian).
14. Kornilov A. V. Reasons for the different effects of calcareous clays on strength properties of ceramics. *Glass and Ceramics*, 2005, vol. 62, no. 11–12, pp. 391–393. <https://doi.org/10.1007/s10717-006-0017-9>
15. Ryzhkov I. V., Tolstoy V. S. *Physicochemical Foundations of the Formation of Properties of Mixtures with Liquid Glass*. Kharkov, Vysshaya shkola Publ., 1975. 140 p. (in Russian).

16. Hwang S., Chen I. Grain Size Control of Tetragonal Zirconia Polycrystals Using the Space Charge Concept. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, no. 11, pp. 3269–3277. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb06449.x>
17. Ikeda J. A. S., Chiang Y. Space Charge Segregation at Grain Boundaries in Titanium Dioxide: I, Relationship between Lattice Defect Chemistry and Space Charge Potential. *Journal of the American Ceramic Society*, 1993, vol. 76, iss. 10, pp. 2437–2446. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1993.tb03964.x>
18. Ikeda J. A. S., Chiang Y., Garratt-Reed A. J., Sande J. B. V. Space Charge Segregation at Grain Boundaries in Titanium Dioxide: II, Model Experiments. *Journal of the American Ceramic Society*, 1993, vol. 76, iss. 10, pp. 2447–2459. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1993.tb03965.x>
19. Chiang Y., Takagi T. Grain-Boundary Chemistry of Barium Titanate and Strontium Titanate: I, High-Temperature Equilibrium Space Charge. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, iss. 11, pp. 3278–3285. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb06450.x>
20. Chiang Y.-M., Kingery W. D. Grain-Boundary Migration in Nonstoichiometric Solid Solutions of Magnesium Aluminate Spinel: II, Effects of Grain-Boundary Nonstoichiometry. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, iss. 5, pp. 1153–1158. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05172.x>
21. Bennison S. J., Harmer M. P. A history of the role of MgO in the sintering of α - Al_2O_3 . Handwerker C. A., Blendell J. E., Kaysser W. A. (eds.). *Ceramic Transactions. Vol. 7: Sintering of Advanced Ceramics*. American Ceramic Society, Columbus, OH, 1990, pp. 13–49.
22. Johnson W. C., Coble R. L. A Test of the Second-Phase and Impurity-Segregation Models for MgO-Enhanced Densification of Sintered Alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, 1978, vol. 61, iss. 3–4, pp. 110–114. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1978.tb09250.x>
23. Stephen J., Bennison S., Martin P., Harmer M. Grain-Growth Kinetics for Alumina in the Absence of a Liquid Phase. *Journal of the American Ceramic Society*, 1985, vol. 68, iss. 1, pp. C-22–C-24. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1985.tb15259.x>
24. Berry K. A., Harmer M. P. Effect of MgO Solute on Microstructure Development in Al_2O_3 . *Journal of the American Ceramic Society*, 1986, vol. 69, iss. 2, pp. 143–149. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1986.tb04719.x>
25. Baik S. Segregation of Mg to the (0001) Surface of Single-Crystal Alumina: Quantification of AES Results. *Journal of the American Ceramic Society*, 1986, vol. 69, iss. 5, pp. C-101–C-103. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1986.tb04780.x>
26. Baik S., White C. L. Anisotropic Calcium Segregation to the Surface of Al_2O_3 . *Journal of the American Ceramic Society*, 1987, vol. 70, iss. 9, pp. 682–688. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1987.tb05739.x>

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-285-295>

УДК 621.9.025.72



Оригинальная статья

**А. Н. Жигалов^{1*}, М. И. Демиденко², Д. В. Адамчук², С. А. Максименко²,
В. В. Углов³, М. В. Башаримов¹, И. В. Кубраков¹**

¹*Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси,
ул. Бялыницкого-Бирули, 11, 212030, Могилев, Республика Беларусь*

²*Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,
ул. Бобруйская, 11, 220006, Минск, Республика Беларусь*

³*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, Минск, Республика Беларусь*

**ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ
ТИТАНСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ
НА ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИНАХ ВУТС**

Аннотация. Исследованы технологические характеристики твердосплавных пластин марки ВУТС производства Института технологии металлов Национальной академии наук Беларуси (ИТМ НАН Беларусь) с упрочняющими плазменными покрытиями TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN. Показано, что основная фаза покрытий имеет кубическую структуру, которая обеспечивает им высокую твердость (TiN – HV 2414; TiAlSiCr – HV 3570; TiAlN – HV 2692; TiAlCrN – HV 2647) и низкий коэффициент трения (0,25–0,40). Сплошная пленка толщиной 2,0–4,0 мкм с микротвердостью 2414–3570 HV наносилась на твердосплавную пластину с помощью технологии вакуумного напыления (PVD). Установлено, что наиболее перспективными для промышленного использования являются покрытия из нитрида титана (TiN) благодаря сравнительной простоте технологии и меньшей себестоимости нанесения, а также достаточно большому ресурсу рабочих кромок, что обеспечивает повышение в 4,1 раза стойкости твердосплавных пластин ВУТС ПНУА 110408 производства ИТМ НАН Беларусь с покрытием TiN при обработке коррозионностойкой стали марки 08ХГСДП. Разработанное покрытие может использоваться при изготовлении металлорежущего твердосплавного инструмента (фрезы, сверла, пластины и др.).

Ключевые слова: плазменные покрытия, твердосплавный инструмент, свойства, технология, ресурс

Благодарности: авторы выражают благодарность за проведенные структурные исследования государственному центру «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», а также ООО «Анай Бел ИТ» за предоставление возможности нанесения PVD-покрытий на установке Platit π111 (Швейцария).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Жигалов Анатолий Николаевич – доктор технических наук, доцент, директор Института технологии металлов Национальной академии наук Беларуси, e-mail: jigalov6@mail.ru; Демиденко Марина Ивановна – заведующий лабораторией наноэлектромагнетизма Института ядерных проблем Белорусского государственного университета, e-mail: midemidenko6@gmail.com; Адамчук Дмитрий Вячеславович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института ядерных проблем Белорусского государственного университета, <https://orcid.org/0000-0003-2845-4744>, e-mail: adamchuk.dzmitry@yahoo.com; Максименко Сергей Афанасьевич – доктор физико-математических наук, профессор, директор Института ядерных проблем Белорусского государственного университета, <https://orcid.org/0000-0002-8271-0449>, e-mail: sergey.maksimenko@gmail.com; Углов Владимир Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела и нанотехнологий Белорусского государственного университета, <https://orcid.org/0000-0003-1929-4996>, e-mail: Uglov@bsu.by; Башаримов Максим Владимирович – аспирант Института технологии металлов Национальной академии наук Беларуси, e-mail: jigalov6@mail.ru; Кубраков Илья Владимирович – младший научный сотрудник Института технологии металлов Национальной академии наук Беларуси, e-mail: jigalov6@mail.ru

Вклад авторов: Жигалов Анатолий Николаевич – постановка целей, анализ результатов исследований; Демиденко Марина Ивановна – разработка структуры и редактирование текста рукописи; Адамчук Дмитрий Вячеславович – анализ результатов микроструктурных исследований, редактирование текста рукописи; Максименко Сергей Афанасьевич – редактирование текста рукописи; Углов Владимир Васильевич – рентгеноструктурный анализ покрытий; Башаримов Максим Владимирович – проведение исследований микротвердости; Кубраков Илья Владимирович – проведение исследования на износ.

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Для цитирования: Эксплуатационные характеристики ионно-плазменных титансодержащих покрытий на твердо-сплавных пластинах BYTC / А. Н. Жигалов, М. И. Демиденко, Д. В. Адамчук [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 4. – С. 285–295. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-285-295>

Поступила в редакцию: 15.03.2025

Доработанный вариант: 19.05.2025

Утверждена к публикации: 03.12.2025

Подписана в печать: 19.12.2025

Original article

**Anatoly N. Zhigalov^{1*}, Marina I. Demidenko², Dzmitry V. Adamchuk², Sergey A. Maksimenko²,
Vladimir V. Uglov³, Maxim V. Basharimov¹, Ilya V. Kubrakov¹**

¹*Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus,
11, Byalynitsky-Birulja St., 212030, Mogilev, Republic of Belarus*

²*Institute of Nuclear Problems of the Belarusian State University, 11, Bobruiskaya St., 220006, Minsk, Republic of Belarus*

³*Belarusian State University, 4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus*

OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF ION PLASMA TITANIUM-CONTAINING COATINGS ON BYTC CARBIDE PLATES

Abstract. The technological characteristics of BYTC carbide inserts produced by the Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus with TiN, TiAlSiCr, TiAlN, and TiAlCrN plasma coatings have been studied. It has been shown that the main phase of the coatings has a cubic structure, which provides them with high hardness (TiN – HV 2414; TiAlSiCr – HV 3570; TiAlN – HV 2692; TiAlCrN – HV 2647) and a low coefficient of friction (0.25–0.40). A 2.0–4.0 μm thick solid film with a microhardness of 2414–3570 HV was applied to a carbide plate using vacuum deposition (PVD) technology. It has been established that the most promising coatings for industrial use are TiN coatings due to their relative simplicity of technology and lower cost of application, as well as their relatively long service life, which ensures an increase in the durability of BYTC PNUA 110408 carbide inserts produced by Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus with a TiN coating by a factor of 4.1 when processing 08ХГСДП corrosion-resistant steel. The developed coating can be used in the manufacture of metal-cutting carbide tools (milling cutters, drills, plates, etc.).

Keywords: plasma coatings, carbide tool, properties, technology, resource

Acknowledgments: the authors express their gratitude for the structural studies to the State Center “Belmikronaliz” of JSC “INTEGRAL” – the Management Company of the Holding “INTEGRAL” and LLC “Anay Bel IT” for providing the opportunity to coating on the equipment PVD Platin π111 (Switzerland).

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

Information about the authors: Anatoly N. Zhigalov – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Director at Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: jigalov6@mail.ru; Marina I. Demidenko – Head of the Laboratory of Nanoelectromagnetism at Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, e-mail: midemidenko67@gmail.com; Dzmitry V. Adamchuk – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher at Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, <https://orcid.org/0000-0003-2845-4744>, e-mail: adamchuk.dzmitry@yahoo.com; Sergey A. Maksimenko – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Director at Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, <https://orcid.org/0000-0002-8271-0449>, e-mail: sergey.maksimenko@gmail.com; Vladimir V. Uglov – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Solid State Physics and Nanotechnology at Belarusian State University, <https://orcid.org/0000-0003-1929-4996>, e-mail: Uglov@bsu.by; Maxim V. Basharimov – Postgraduate Student at Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: jigalov6@mail.ru; Ilya V. Kubrakov – Junior Researcher at Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: jigalov6@mail.ru

Contribution of the authors: Anatoly N. Zhigalov – setting goals, analyzing research results; Marina I. Demidenko – structure development and editing of the manuscript text; Dzmitry V. Adamchuk – analysis of the microstructural results, editing of the text; Sergey A. Maksimenko – editing of the text; Vladimir V. Uglov – X-ray structural analysis of coatings; Maxim V. Basharimov – carrying out of the microhardness studies; Ilya V. Kubrakov – carrying out of the wear test.

For citation: Zhigalov A. N., Demidenko M. I., Adamchuk D. V., Maksimenko S. A., Uglov V. V., Basharimov M. V., Kubrakov I. V. Operational characteristics of ion plasma titanium-containing coatings on BYTC carbide plates. *Vestsi Natsyyanlai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tehnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 4, pp. 285–295 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-285-295>

Received: 15.03.2025

Modified: 19.05.2025

Approved for publication: 03.12.2025

Signed for printing: 19.12.2025

Введение. В современном машиностроении используется большое количество деталей (валы, оси, фасонные изделия и др.) из коррозионностойких сталей, которые изготавливаются с помощью режущих инструментов с твердосплавными пластинами. Основной проблемой при обработке таких деталей является быстрый износ режущей кромки твердосплавной пластины, что приводит к поломке инструмента и, соответственно, увеличению затрат на сам инструмент и его замену, а в ряде случаев – и к неустранимому браку изготавливаемых деталей. В Институте технологии металлов НАН Беларуси освоили производство твердосплавных пластин под брендом BYTC (белорусский твердый сплав).

Для решения указанных проблем инструментальные пластины защищаются покрытиями, которые блокируют химическую реакцию между режущим инструментом и деталью, что препятствует образованию трещин на пластине в процессе резания [1], обеспечивая повышение стойкости пластин от 1,3 до 8 раз, режимов резания – на 25–80 % [2]. Известны покрытия PVD (Physical Vapor Deposition), которые изготавливаются с использованием физического осаждения из газовой среды и наносятся с помощью технологии вакуумного напыления [4–10], и CVD (Chemical Vapor Deposition) [4; 11–13], получаемые путем химического осаждения из газовой фазы. Данные покрытия применяются в основном на неперетачиваемых инструментах и пластинах, так как на участках, подвергаемых заточке, они полностью разрушаются.

На практике наибольшее распространение получил первый тип покрытий [2; 4]. Процессы PVD обладают широкими возможностями по управлению свойствами покрытия и по номенклатуре инструментальных подложек. Основные виды покрытий PVD имеют толщину 1,0–6,0 мкм, поэтому применимы для режущих кромок с маленьким радиусом скругления. Острые режущие кромки позволяют снизить усилия резания, улучшить стружкодробление, предотвратить вибрации, а высокая температурная стабильность покрытий обеспечивает их целостность. Применение износостойких покрытий, наносимых методом PVD, позволяет наиболее существенно повысить стойкость режущего инструмента, предназначенного для фрезерной обработки, который более чувствителен к возможному снижению вязкости в поверхностной зоне из-за постоянной работы с переменными нагрузками [14], при обработке заготовок из жаропрочных, коррозионностойких сталей и т. д.

Цель проведенных исследований – испытание твердосплавных пластин BYTC при обработке низколегированной коррозионностойкой стали марки 08ХГСДП и оценка эффективности использования упрочняющих покрытий PVD различных составов для данных пластин.

Методика исследования. Были исследованы покрытия TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN, нанесенные методом PVD на твердосплавные пластины BYTC PNUA 110408, изготовленные из сплава T5K10 [3].

Для объективности исследования образцы были пронумерованы в случайном порядке. Напыление осуществлялось с использованием комплекса технологического оборудования по нанесению PVD-покрытий PLATIT компании ООО «Анай Бел ИТ», включающего установку Platit π111 (Швейцария).

Исследование морфологии поверхности образцов, определение толщины полученных пленок и характерных размеров доменов наполнителя пленок осуществлялось методом спектральной электронной микроскопии (СЭМ) на растровых электронных микроскопах Hitachi S-4800 (Япония) с разрешающей способностью 1 нм при ускоряющем напряжении 15 кВ. Исследуемые материалы фиксировались на подложке с помощью токопроводящей углеродной клейкой ленты.

Для оценки с высокой точностью элементного состава (концентраций химических элементов) локального участка образцов как по всей поверхности, так и в точке или вдоль выделенной линии, а также для построения карт распределения химических элементов в приповерхностной области исследуемых структур был использован метод рентгеноспектрального микроанализа, который заключается в регистрации характеристического рентгеновского излучения с поверхности образца, находящегося под электронным пучком. Исследования проводились методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) с использованием безазотного спектрометра Bruker QUANTAX 200 (США) к Hitachi S-4800.

Фазовые составы образцов определялись на дифрактометре ULTIMA IV (Rigaku, Япония) с использованием геометрии параллельного пучка методом рентгенофазового анализа в медном (CuK_α) излучении с длиной волны 0,15418 нм. Для оценки фазового состава покрытий образцы размещались на столике приставки для напряжений. Съемка образцов проводилась в диапазоне углов $2\theta = 10\text{--}120^\circ$ с шагом $0,05^\circ$, скоростью движения детектора $2^\circ/\text{мин}$ и угле падения рентгеновского пучка, равном 1° , для уменьшения влияния подложки.

Микротвердость измерялась методом Виккерса (HV, ед.) на микротвердомере ZHV 1M (Zwick/Roell, Германия) при нагрузке 0,2 кгс. Результаты измерений, превышающие среднее значение на 10 %, исключались. Коэффициент трения определялся с помощью машины трения Tribometer (CSM Instruments, Швейцария) по схеме «шарик–диск» при нагрузках 2 и 5 Н и линейной скорости 10 см/с. Контртелом был шарик из твердого сплава WC6 диаметром 3 мм. Критическая нагрузка, при которой происходило разрушение и отслаивание покрытий при царапании алмазной пирамидой, определялась визуально с помощью оптического микроскопа с увеличением 200^\times по появлению трещин и сколов покрытия на установке Revetest (CSM Instruments, Швейцария).

Механические испытания твердосплавных пластины BYTC PNUA 110408 с покрытиями TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN проводились в лаборатории резания Института технологии металлов НАН Беларуси на вертикально-фрезерном станке 6Р82Ш с использованием фрезы Ø63 мм. Обработке подвергались заготовки из коррозионностойкой стали 08ХГСДП твердостью 159–163 НВ, режим резания: скорость резания $V = 110$ м/мин; подача на зуб $S_z = 0,17$ мм/зуб; глубина резания $t = 1$ мм.

Результаты исследования и их обсуждение. Покрытие TiN. Изображения поверхности и поперечного сечения напыленной пленки из нитрида титана (TiN), полученные методом спектральной электронной микроскопии, представлены на рис. 1.

Покрытие TiN имеет кубическую структуру, которая обеспечивает ему высокую твердость, низкий коэффициент трения и оптимальную химическую стойкость. В результате формируется сплошная пленка толщиной 2,0–4,5 мкм с небольшим количеством поверхностных дефектов в виде капель, углублений. Профиль поверхности нанесенного покрытия повторяет профиль материала заготовки. В структуре наблюдается наличие капельной фазы размером примерно от 1 до 5 мкм.

Химический состав покрытия TiN представлен в табл. 1. Образец характеризуется незначительным избыточным содержанием азота, в состав материала подложки входят кислород и углерод. При нанесении может наблюдаться диффузия углерода из подложки образца на основе сложных карбидов.

Микроструктурный анализ показывает достаточно хорошую однородность, стехиометричность и целостность покрытия из нитрида титана.

На рис. 2 показана рентгенограмма покрытия из TiN, нанесенного на твердосплавную пластину, которая получена при угле падения рентгеновского пучка 1° .

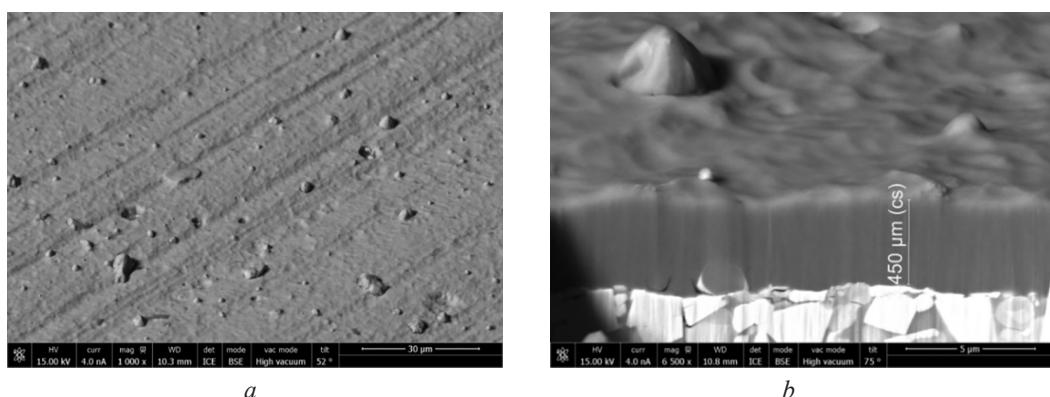


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности (a) и поперечного сечения (b) напыленной пленки TiN
Fig. 1. SEM images of the surface (a) and cross section (b) of a sputtered TiN film

Таблица 1. Химический состав покрытия TiN

Table 1. Chemical composition of TiN coating

Элемент Element	Атомный номер Atomic number	Нормированная весовая концентрация, мас.% Normalized weight concentration, wt.%	Атомная концентрация, ат.-% Atomic concentration, at.-%	Ошибка, ат.-% Error, at.-%
N	7	22,77	49,13	3,1
Ti	22	75,76	47,82	2,4
O	8	1,01	1,91	0,4
C	6	0,45	1,14	0,2

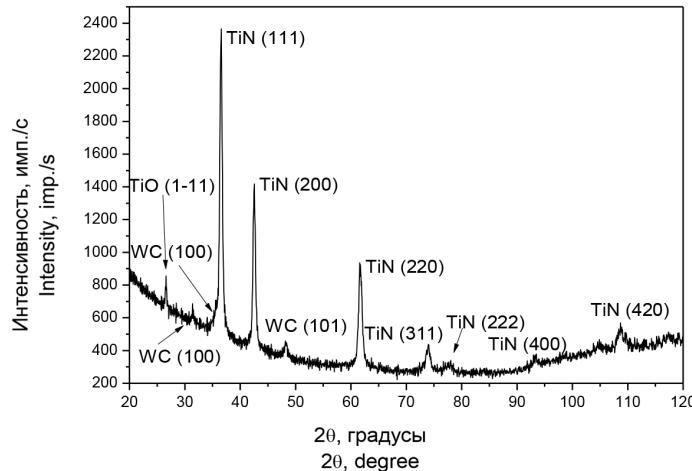


Рис. 2. Рентгенограмма покрытия TiN на твердосплавной пластине

Fig. 2. X-ray image of TiN coated plate

Как видно, на рентгенограмме присутствуют дифракционные пики, соответствующие фазе TiN ($Fm\text{-}3m$) с гранецентрированной решеткой. Параметр решетки сформированного покрытия TiN равен $(0,42383 \pm 0,00001)$ нм, что меньше значения, соответствующего эталону $(0,42440)$ нм). На рентгенограмме также присутствуют дифракционные пики от подложки, соответствующие WC ($P\text{-}6m2$). Рентгенограмма образца, полученная при съемке в режиме Брэгга–Брентано (угол падения равен углу отражения), показала, что твердосплавная подложка представляет собой многофазную систему: WC, TiC и Co. Ввиду малого угла падения рентгеновского пучка (1°) на рис. 2 видна только самая интенсивная фаза WC. Также на рисунке присутствует дифракционный пик при $2\theta = 26,65^\circ$, соответствующий оксиду титана (TiO).

Покрытие TiN может эффективно использоваться при обработке резанием, давлением, для защиты литейных форм и снижения трения в деталях машин, для упрочнения режущих инструментов, подшипников и штампов, а также предотвращения налипания обрабатываемого материала на инструмент.

Покрытие TiAlSiCr. Изображения поверхности и поперечного сечения напыленной пленки TiAlSiCr представлены на рис. 3.

Химический состав покрытия TiAlSiCr указан табл. 2. Определяемые химические элементы кислород, углерод и хром обусловлены материалом подложки. При нанесении покрытия также может наблюдаться диффузия углерода из матрицы на основе сложных карбидов.

На рис. 4 показана рентгенограмма нанесенного на твердосплавную пластину покрытия AlTiSiCr, полученная при угле падения рентгеновского пучка 1° . Видно, что на рентгенограмме присутствуют фазы покрытия ((Ti,Al)N и h-AlN) и подложки (WC).

На рентгенограмме отмечаются также дифракционные пики, соответствующие отражению от гранецентрированной решетки нитрида титана и смещенные в область больших углов 2θ , что позволило определить эти пики как соответствующие фазе твердого раствора замещения (Ti, Al)N. Расчет параметра решетки твердого раствора показал значение $(0,41952 \pm 0,00005)$ нм, что меньше полученного ранее для TiN. Добавление алюминия в решетку TiN приводит к умень-

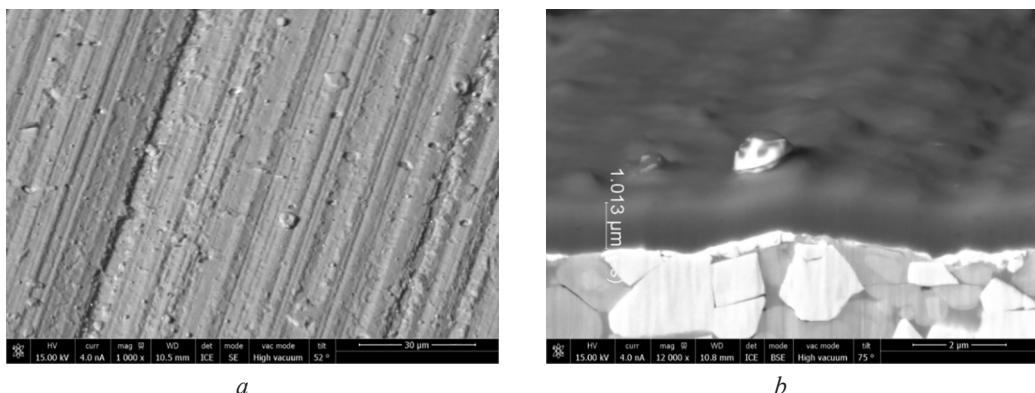


Рис. 3. СЭМ-изображения поверхности (а) и поперечного сечения (б) напыленной пленки AlTiSiCr

Fig. 3. SEM images of the surface (a) and the cross section (b) of a sputtered AlTiSiCr film

Таблица 2. Химический состав покрытия TiAlSiCr

Table 2. Chemical composition of TiAlSiCr coating

Элемент Element	Атомный номер Atomic number	Нормированная весовая концентрация, мас.% Normalized weight concentration, wt.%	Атомная концентрация, ат.-% Atomic concentration, at.-%	Ошибка, ат.-% Error, at.-%
N	7	24,22	45,12	3,3
Ti	22	50,72	27,64	1,5
Al	13	16,02	15,49	0,8
C	6	1,93	4,20	0,5
Si	14	3,74	3,48	0,2
O	8	2,10	3,43	0,6
Cr	24	1,26	0,63	0,1

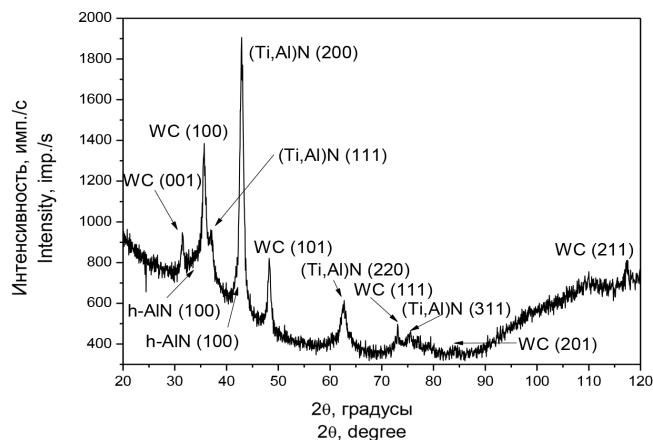


Рис. 4. Рентгенограмма покрытия TiAlSiCr на твердосплавной пластине

Fig. 4. X-ray image of the TiAlSiCr coating on a carbide plate

шению параметра решетки твердого раствора, так как радиус алюминия меньше, чем у титана. На рентгенограмме выявлена и фаза AlN с гексагональной плотной упаковкой, интенсивность дифракционных пиков которой значительно ниже, чем у твердого раствора. Формирование фазы AlN происходит из-за частичной сегрегации алюминия на границе зерен твердого раствора (Ti, Al)N, в результате чего формируется нанокомпозитное покрытие на основе кристаллических зерен (Ti, Al)N и аморфной матрицы h-AlN. Как видно из рис. 4, твердый раствор (Ti, Al)N имеет преимущественную ориентацию (200), что характерно для нанокомпозитных покрытий. На рентгенограмме так же, как и для TiN, присутствуют дифракционные пики подложки (WC), при этом отсутствуют дифракционные пики, соответствующие фазам, содержащим Si и Cr, которые ввиду малой их концентрации сегрегируют на границах зерен (Si) основных фаз или входят в фазу твердого раствора (Cr).

Покрытие TiAlSiCr, являющееся нанокомпозитным покрытием, в котором нанокристаллические зерна внедрены в аморфную матрицу, и имеющее максимально высокую твердость и температурную стойкость, используется для высокоскоростной обработки («сухая» высокоскоростная) и для нормальных условий механической обработки. Покрытие достаточно хрупкое, но хорошо работает в «сухих» условиях (чем выше скорость и температура в зоне резания, тем выше производительность).

Покрытие TiAlN. Данный тип покрытия широко используется в режущих инструментах в качестве износостойкой защиты в силу его высокой химической стабильности, отличной стойкости к окислению и высокой износостойкости. Однако покрытия TiAlN, полученные традиционными методами, часто имеют столбчатую структуру и высокий коэффициент трения. Эти свойства делают их склонными к образованию трещин и сильному адгезионному износу при обработке титана. Поэтому важно улучшить структуру и свойства покрытий TiAlN, чтобы обеспечить возможность механической обработки титановых сплавов. Одним из перспективных направлений совершенствования покрытий является использование адгезионных слоев. Эти слои характеризуются низким коэффициентом трения при трибоиспытаниях, что приводит к низкой скорости изнашивания. Изображения поверхности пленки TiAlN и поперечного сечения напыленной пленки представлены на рис. 5.

Химический состав покрытия TiAlN указан табл. 3. Атомное соотношение титана к алюминию составляет 2 : 1, что приводит к формированию твердого раствора (Ti, Al)N и фазы нитрида титана.

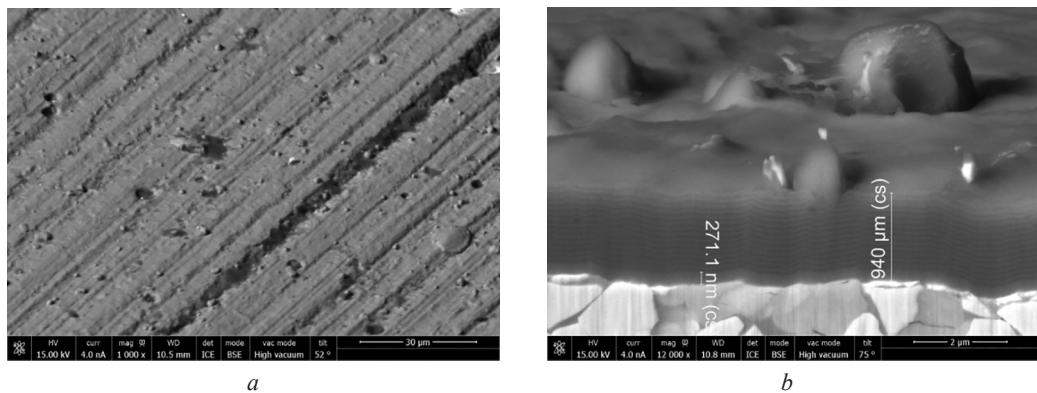


Рис. 5. СЭМ-изображения поверхности (a) и поперечного сечения (b) напыленной пленки TiAlN

Fig. 5. SEM images of the surface (a) and cross section (b) of a sputtered TiAlN film

Таблица 3. Химический состав покрытия TiAlN

Table 3. Chemical composition of TiAlN coating

Элемент Element	Атомный номер Atomic number	Нормированная весовая концентрация, мас.% Normalized weight concentration, wt.%	Атомная концентрация, ат.-% Atomic concentration, at.-%	Ошибка, ат.-% Error, at.-%
N	7	24,02	41,83	3,3
Ti	22	44,73	22,79	1,4
Al	13	22,83	20,64	1,1
C	6	3,74	7,59	0,8
O	8	4,69	7,15	1,0

На рис. 6 представлена рентгенограмма нанесенного на твердосплавную пластину покрытия TiAlN, полученная при угле падения рентгеновского пучка 1°. Она близка к рентгенограмме покрытия TiAlSiCr.

Анализ рентгенограммы показывает, что покрытие TiAlN представляет собой двухфазную систему: твердый раствор (Ti, Al)N и h-AlN. Параметр решетки твердого раствора равен $(0,41732 \pm 0,00003)$ нм. Значение параметра решетки твердого раствора (Ti, Al)N для покрытия

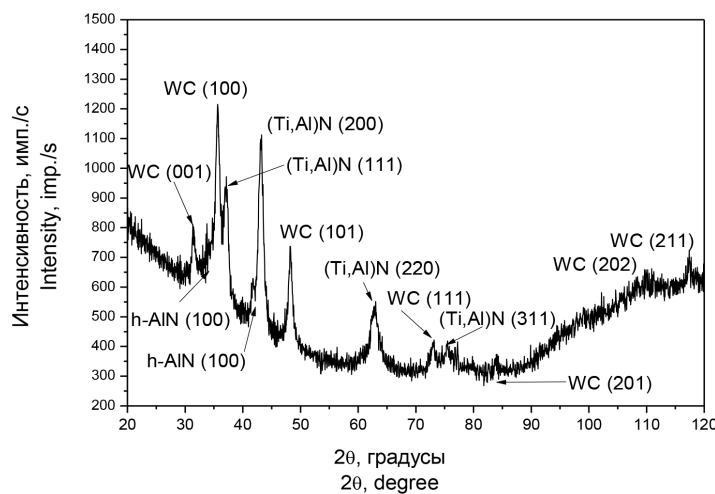


Рис. 6. Рентгенограмма покрытия TiAlN на твердосплавной пластине

Fig. 6. X-ray image of the TiAlN coating on a carbide plate

TiAlN меньше, чем для TiAlSiCr. Также присутствуют дифракционные пики подложки (WC). Как и в случае покрытия TiAlSiCr, покрытие TiAlN представляет собой нанокомпозитную систему на основе кристаллических зерен (Ti, Al)N с преимущественной ориентацией (200) и аморфной матрицы h-AlN.

Покрытие TiAlN является специальным покрытием для сухой высокоскоростной обработки резанием и особенно для твердой обработки в условиях прерывистого резания материалов с высокой прочностью при растяжении, нержавеющих видов стали и износостойчивых материалов. Благодаря своей высокой химической стабильности, отличной стойкости к окислению и высокой износостойкости оно может использоваться в режущих инструментах в качестве износостойкой защиты [15].

Полученные традиционными методами покрытия TiAlN имеют столбчатую структуру и высокий коэффициент трения, что делает их склонными к образованию трещин и сильному адгезионному износу при обработке титана. Поэтому важно улучшить структуру и свойства покрытий TiAlN, чтобы обеспечить возможность механической обработки титановых сплавов. Одним из перспективных решений данной задачи является использование адгезионных слоев, которые характеризуются низким коэффициентом трения при трибоиспытаниях, что приводит к снижению скорости изнашивания.

Покрытие TiAlCrN. Данное покрытие является универсальным и используется при механической обработке со смазочно-охлаждающими жидкостями и без них для формования и перфорации, фрезерования и зубофрезерования. Изображения поверхности и поперечного сечения напыленной пленки TiAlCrN представлены на рис. 7.

Сплошная пленка покрытия формируется толщиной до 1 мкм с небольшим количеством поверхностных дефектов в виде капель, углублений. Профиль поверхности нанесенного покрытия повторяет профиль материала заготовки. В структуре наблюдается наличие капельной фазы размером примерно от 0,2 до 1 мкм (см. рис. 7).

Химический состав покрытия TiAlCrN указан в табл. 4. Микроструктурный анализ показывает достаточно хорошую однородность, стехиометричность и целостность покрытия. Атомное соотношение титана к алюминию составляет 2 : 1, что способствует формированию твердого раствора (Ti, Al)N и фазы нитрида титана. На рис. 8 показана рентгенограмма покрытия TiAlCrN, нанесенного на твердосплавную пластину, которая получена при угле падения рентгеновского пучка 1° .

Данная рентгенограмма близка к рентгенограммам покрытий TiAlSiCr и TiAlN. Ее анализ показывает, что покрытие TiAlCrN представляет собой двухфазную систему: твердый раствор (Ti, Al)N и h-AlN. Параметр решетки твердого раствора равен $(0,41687 \pm 0,00003)$ нм, то есть меньше, чем для TiAlN. Также присутствуют дифракционные пики подложки (WC).

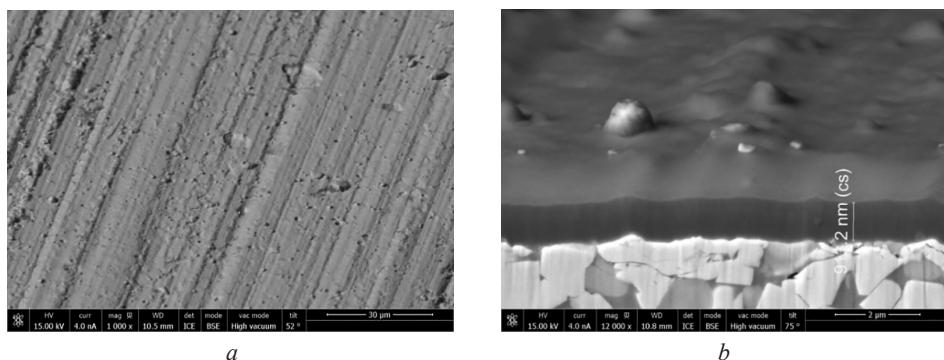


Рис. 7. СЭМ-изображения поверхности (a) и поперечного сечения (b) напыленной пленки TiAlCrN

Fig. 7. SEM images of the surface (a) and cross section (b) of a sputtered TiAlCrN film

Таблица 4. Химический состав покрытия TiAlCrN

Table 4. Chemical composition of TiAlCrN coating

Элемент Element	Атомный номер Atomic number	Нормированная весовая концентрация, мас.% Normalized weight concentration, wt.%	Атомная концентрация, ат.-% Atomic concentration, at.-%	Ошибка, ат.-% Error, at.-%
N	7	25,48	46,68	3,4
Ti	22	47,33	25,37	1,4
Al	13	22,30	21,21	1,1
C	6	1,61	3,43	0,4
O	8	1,53	2,45	0,5
Cr	24	1,76	0,87	0,1

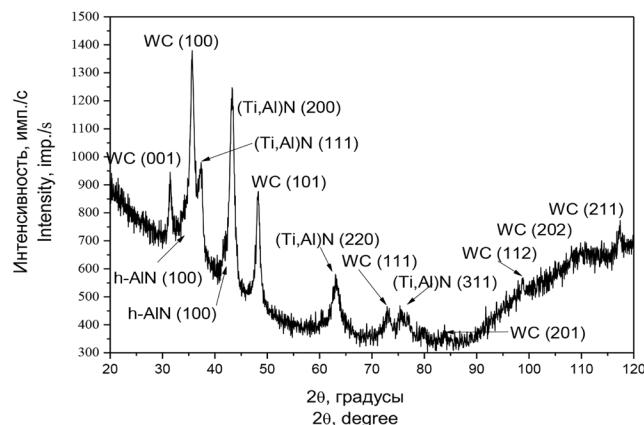


Рис. 8. Рентгенограмма покрытия TiAlCrN на твердосплавной пластине

Fig. 8. X-ray image of the TiAlCrN coating on a carbide plate

Сравнительный анализ исследуемых покрытий. Результаты измерений микротвердости и коэффициентов трения покрытий TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN приведены в табл. 5.

Таблица 5. Значения микротвердости и коэффициента трения покрытий TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN

Table 5. Microhardness and coefficients of friction of TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN coating

Покрытие Coating	Микротвердость HV, ед. Microhardness HV, units			Коэффициент трения покрытия Coefficient of friction of the coating	
	Количество измерений Number of measurements				
	1	2	3		
TiN	2455	2286	2501	0,25	
TiAlSiCr	3751	3668	3292	0,40	
TiAlN	2644	2547	2886	0,31	
TiAlCrN	2640	2501	2800	0,34	

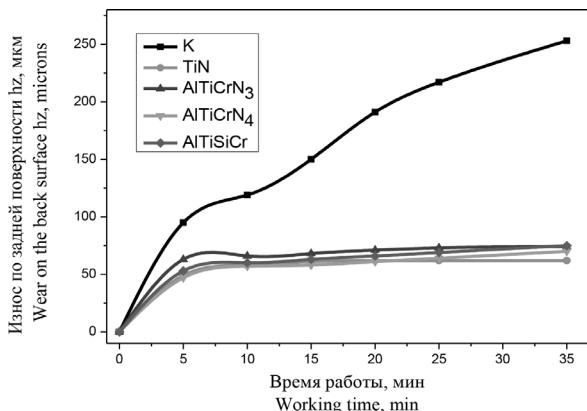


Рис. 9. Зависимости износа по задней поверхности режущего лезвия твердосплавных пластин BYTC PNUA 110408 без покрытия (K) и с покрытиями от времени работы

Fig. 9. Dependences of wear on the back surface of the cutting blade of BYTC PNUA 110408 carbide plates without coating (K) and with coatings on the operating time

На рис. 9 показаны зависимости величины износа по задней поверхности (h_3) режущего лезвия твердосплавных пластин BYTC PNUA 110408 без покрытия и с покрытиями.

Для указанных выше режимов резания все исследуемые твердосплавные пластины BYTC PNUA 110408 с покрытиями TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN показали повышение стойкости в 3,3–4,1 раза относительно таких же пластин, но без покрытия. Среди исследуемых покрытий при обработке коррозионностойкой стали 08ХГСДП наибольшее повышение стойкости (в 4,1 раза) показали твердосплавные пластины BYTC PNUA 110408 с покрытием TiN (рис. 10). Кроме того, покрытие TiN является наиболее экономически выгодным.

Заключение. Выполнен анализ покрытий TiN, TiAlSiCr, TiAlN, TiAlCrN, нанесенных с помощью технологии вакуумного напыления PVD на твердосплавные пластины BYTC PNUA 110408.

Показано, что основная фаза покрытий имеет кубическую структуру, которая обеспечивает им высокую твердость (TiN – HV 2414; TiAlSiCr – HV 3570; TiAlN – HV 2692; TiAlCrN – HV 2647) и низкий коэффициент трения (0,25–0,40).

Методом PVD на твердосплавной пластине формируется сплошная пленка толщиной 2,0–4,5 мкм с микротвердостью (2414–3570) HV, при этом образующиеся на поверхности покрытия в небольшом количестве поверхностные дефекты в виде капельной фазы размером примерно от 1 до 5 мкм и углублений не оказывают существенного влияния на качество покрытий.

Установлено, что наиболее перспективными для промышленного использования являются покрытия из нитрида титана TiN. Благодаря сравнительной простоте технологии нанесения, меньшей себестоимости нанесения и достаточно большому ресурсу рабочих кромок обеспечивается повышение в 4,1 раза стойкости твердосплавных пластин BYTC PNUA 110408 с покрытием TiN при обработке коррозионностойкой стали 08ХГСДП.

Список использованных источников

1. Investigating the correlation between nano-impact fracture resistance and hardness/modulus ratio from nanoindentation at 25–500 °C and the fracture resistance and lifetime of cutting tools with $Ti_{1-x}Al_xN$ ($x = 0.5$ and 0.67) PVD coatings in milling operations / B. D. Beake, J. F. Smith, A. Gray [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2007. – Vol. 201, iss. 8. – P. 4585–4593. <https://doi.org/10.1016/j.surco.2006.09.118>
2. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. – Могилев: МГУП, 2019. – 212 с.
3. Маркова, Е. А. Износостойкие покрытия для режущих инструментов: пособие для студентов / Е. А. Маркова, О. К. Яцкевич. – Мин.: БНТУ, 2021. – 50 с.
4. Жигалов, А. Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Жигалов Анатолий Николаевич; БНТУ. – Мин., 2021. – 382 л.

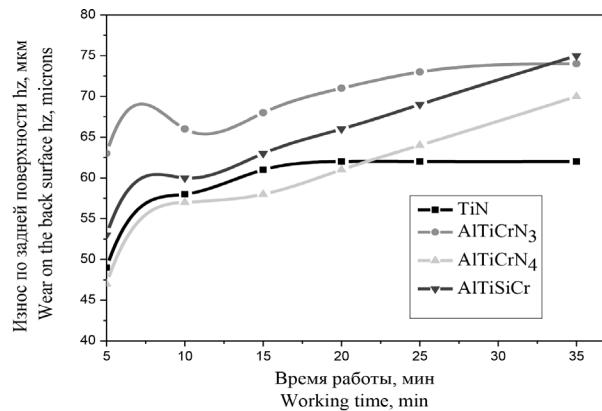


Рис. 10. Зависимости износа по задней поверхности режущего лезвия твердосплавных пластин BYTC PNUA 110408 с покрытиями от времени работы

Fig. 10. Dependences of wear on the back surface of the cutting blade of BYTC PNUA 110408 carbide inserts with coatings on the operating time

5. Григорьев, С. Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента / С. Н. Григорьев. – М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.
6. Табаков, В. П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания / В. П. Табаков, Д. И. Сагитов. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 179 с.
7. Минкевич, А. Н. Использование твердосплавного инструмента / А. Н. Минкевич, В. В. Захаров // Металлургование и термическая обработка металлов. – 1979. – № 6. – С. 36–40.
8. Семенов, А. П. Износостойкие покрытия, наносимые вакуумными ионно-плазменными методами / А. П. Семенов, А. И. Григоров // Технология машиностроения. – 1978. – № 7. – С. 15–20.
9. Бартенев, С. С. Детонационные покрытия в машиностроении / С. С. Бартенев, Ю. В. Фед'ко, А. И. Григоров. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 215 с.
10. Верещака, А. С. Физические основы процесса резания и изнашивания режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака, В. П. Табаков. – Ульяновск: УлГПУ, 1998. – 144 с.
11. Табаков, В. П. Повышение эффективности режущего инструмента путем направленного изменения параметров структуры и свойств материала износостойкого покрытия: дис. ... д-ра техн. наук / Табаков Владимир Петрович; Ульянов. гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 1992. – 641 л.
12. Верещака, А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака, И. П. Третьяков. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
13. Болотников, Г. В. Современные покрытия для твердосплавного режущего инструмента / Г. В. Болотников // СТИН. – 1994. – № 4. – С. 33–37.
14. Thermal stability and oxidation resistance of Ti–Al–N coatings / L. Chen, J. Paulitsch, Y. Du, P. H. Mayrhofer // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 206, iss. 11–12. – P. 2954–2960. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.12.028>

References

1. Beake B. D., Smith J. F., Gray A., Fox-Rabinovich G. S., Veldhuis S. C., Endrino J. L. Investigating the correlation between nano-impact fracture resistance and hardness/modulus ratio from nanoindentation at 25–500 °C and the fracture resistance and lifetime of cutting tools with $Ti_{1-x}Al_xN$ ($x = 0.5$ and 0.67) PVD coatings in milling operations. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 201, iss. 8, pp. 4585–4593. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.09.118>
2. Zhigalov A. N., Sheleg V. K. *Theoretical Foundations of Aerodynamic Sound Hardening of Carbide Tools for Intermittent Cutting Processes*. Mogilev, Mogilev State University of Food Publ., 2019. 212 p. (in Russian).
3. Markova E. A., Yatskevich O. K. *Wear-Resistant Coatings for Cutting Tools*. Minsk, Belarusian National Technical University Publ., 2021. 50 p. (in Russian).
4. Zhigalov A. N. *Theoretical and Technological Foundations of Aerodynamic Sound Hardening of Carbide Tools for Intermittent Cutting Processes* [dissertation]. Minsk, Belarusian National Technical University, 2021. 382 p. (in Russian).
5. Grigoriev S. N. *Methods for Increasing the Durability of a Cutting Tool*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 368 p. (in Russian).
6. Tabakov V. P., Sagitov D. I. *Performance of a Cutting Tool with Wear-Resistant Coatings Under Constrained Cutting Conditions*. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University Publ., 2015. 179 p. (in Russian).
7. Minkevich A. N., Zakharov V. V. Use of carbide tools. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 1979, no. 6, pp. 36–40 (in Russian).
8. Semenov A. P., Grigorov A. I. Wear-resistant coatings applied by vacuum ion-plasma methods. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Technology of Mechanical Engineering], 1978, no. 7, pp. 15–20 (in Russian).
9. Bartenev S. S., Fed'ko Yu. V., Grigorov A. I. *Detonation Coatings in Mechanical Engineering*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad Branch, 1982. 215 p. (in Russian).
10. Vereshchaka A. S., Tabakov V. P. *Physical Principles of Cutting and Wear of Cutting Tools with Wear-Resistant Coatings*. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University Publ., 1998. 144 p. (in Russian).
11. Tabakov V. P. *Increasing the Efficiency of the Cutting Tool by Targeted Change in the Parameters of the Structure and Properties of the Material of the Wear-Resistant Coating* [dissertation]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 1992. 641 p. (in Russian).
12. Vereshchaka A. S., Tretyakov I. P. *Cutting Tools with Wear-Resistant Coatings*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 192 p. (in Russian).
13. Bolotnikov G. V. Modern coatings for carbide cutting tools. *STIN*, 1994, no. 4, pp. 33–37 (in Russian).
14. Chen L., Paulitsch J., Du Y., Mayrhofer P. H. Thermal stability and oxidation resistance of Ti–Al–N coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 206, iss. 11–12, pp. 2954–2960. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.12.028>

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-296-306>
УДК 539.3;539.87,51-74;622.6

Оригинальная статья

**М. А. Журавков¹, М. А. Николайчик¹, Н. М. Климкович¹,
И. Н. Карпович^{1*}, И. В. Морочковский²**

¹Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, 220030, Минск, Республика Беларусь

²ООО «Проектирование горнорудных предприятий»,
пр. Независимости 169, 220024, Минск, Республика Беларусь

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
НАПРАВЛЯЮЩИХ ШАХТНОГО СТВОЛА С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ
ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ**

Аннотация. Рассматривается задача контактного взаимодействия роликов клети (лифта) шахтного подъемного комплекса с направляющими проводниками при эксплуатации системы лифтоподъемника в вентиляционном стволе с учетом динамики движения воздушных потоков. Изучено влияние различных режимов работы вентиляционной установки, а также движения клети и противовеса на параметры контактного взаимодействия, возникающего между роликами клети и направляющими проводниками. Разработана численная модель контактного взаимодействия роликов клети с шахтными направляющими проводниками на основе метода конечных элементов. Построенная конечно-элементная модель позволяет производить оценку напряженно-деформированного состояния конструкционных элементов направляющих устройств при различных конфигурациях силового воздействия со стороны клети, а также определять величины критических нагрузок, которые могут вызывать остаточные деформации в направляющих проводниках. Анализ результатов исследований показал, что аэродинамические силы, возникающие при эксплуатации шахтных подъемных комплексов, оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние данной геотехнической системы, что подчеркивает необходимость их учета при проектировании элементов шахтного подъемного комплекса. Полученные результаты могут быть использованы для обеспечения безопасной и безаварийной эксплуатации шахтных подъемных комплексов путем оптимизации их конструкций при проектировании для минимизации напряжений в узле контакта роликов клети с шахтными направляющими проводниками, а также для разработки рекомендаций по замене направляющих устройств в условиях многоциклового воздействия со стороны роликов клети.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, ролик клети, направляющие проводники, вентиляционный ствол, механико-математическая модель, численная модель, метод конечных элементов, шахтный подъемный комплекс

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Журавков Михаил Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, <https://orcid.org/0000-0002-7420-5821>, e-mail: Zhuravkov@bsu.by; Николайчик Михаил Александрович – кандидат физико-математических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, <https://orcid.org/0000-0003-3733-1615>, e-mail: NikolaitchikMA@bsu.by; Климкович Никита Михайлович – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, <https://orcid.org/0009-0001-7204-1974>, e-mail: nikita.klimkovich@yandex.ru; Карпович Иван Николаевич – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, <https://orcid.org/0009-0003-5056-3880>, e-mail: KarpovichIN@bsu.by; Морочковский Иван Владимирович – начальник горного отдела ООО «Проектирование горнорудных предприятий», <https://orcid.org/0009-0000-2230-1494>, e-mail: ivan.morochkovski@pgrp.by

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Вклад авторов: Журавков Михаил Анатольевич – обоснование концепции исследования, формулировка цели, задачи исследования, выводов; Николайчик Михаил Александрович – создание модели исследования, постановка задачи, обобщение результатов исследования, работа с графическими материалами; Климкович Никита Михайлович – создание геометрической и конечно-элементной модели, моделирование процесса нагружения роликов; Карпович Иван Николаевич – определение нагрузок, действующих со стороны клети на ролики, редактирование текста рукописи, оформление рукописи; Морочковский Иван Владимирович – анализ и систематизация исходных и полученных в рамках исследования данных.

Для цитирования: Оценка напряженно-деформированного состояния направляющих шахтного ствола с учетом динамики воздушных потоков / М. А. Журавков, М. А. Николайчик, Н. М. Климкович [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 4. – С. 296–306. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-296-306>

Поступила в редакцию: 22.04.2025

Доработанный вариант: 14.11.2025

Утверждена к публикации: 03.12.2025

Подписана в печать: 19.12.2025

Original article

Michael A. Zhuravkov¹, Mikhail A. Nikolaitchik¹, Nikita M. Klimkovich¹,
Ivan N. Karpovich^{*, 2}, Ivan V. Morochkovski²

¹Belarusian State University, 4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus

²LLC "Design of Mining Enterprises", 169, Nezavisimosti Ave., 220024, Minsk, Republic of Belarus

ASSESSMENT OF THE MINE SHAFT GUIDES STRESS-STRAIN STATE UNDER THE ELEVATOR FORCE IMPACT CAUSED BY THE DYNAMICS OF AIRFLOW MOTION

Abstract. This study addresses the problem of contact interaction between the rollers of a mine hoist cage (elevator) and the guide conductors during the operation of a hoist system in a ventilation shaft, taking into account the dynamics of airflow. The influence of various operating modes of the ventilation system, as well as the movement of the cage and counterweight, on the parameters of the contact interaction arising between the cage rollers and guide conductors has been investigated. A numerical model of the contact interaction between the cage rollers and mine guide conductors has been developed based on the finite element method. The constructed finite element model allows for the assessment of the stress-strain state of the structural elements of the guiding devices under various configurations of force exerted by the cage, as well as for determining the magnitudes of critical loads that can cause residual deformations in the guide conductors. Analysis of the research results has shown that aerodynamic forces arising during the operation of mine hoist complexes significantly influence the stress-strain state of this geotechnical system, highlighting the necessity of accounting for them in the design of mine hoist components. The obtained results can be used to ensure the safe and failure-free operation of mine hoist complexes by optimizing their designs during the planning stage to minimize stresses in the contact node between the cage rollers and mine guide conductors, as well as to develop recommendations for replacing guide devices under conditions of multi-cycle loading from the cage rollers.

Keywords: contact interaction, elevator roller, guide rails, ventilation mine shaft, mechanical-mathematical model, numerical model, finite element method, mine shaft lifting system

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

Information about authors: Michael A. Zhuravkov – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department of the Faculty of Mechanics and Mathematics at Belarusian State University, <https://orcid.org/0000-0002-7420-5821>, e-mail: Zhuravkov@bsu.by; Mikhail A. Nikolaitchik – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Scientific Research Laboratory of Applied Mechanics of the Faculty of Mechanics and Mathematics at Belarusian State University, <https://orcid.org/0000-0003-3733-1615>, e-mail: NikolaitchikMA@bsu.by; Nikita M. Klimkovich – Junior Researcher of the Scientific Research Laboratory of Applied Mechanics of the Faculty of Mechanics and Mathematics at Belarusian State University, <https://orcid.org/0009-0001-7204-1974>, e-mail: nikita.klimkovich@yandex.ru; Ivan N. Karpovich – Junior Researcher of the Scientific Research Laboratory of Applied Mechanics of the Faculty of Mechanics and Mathematics at Belarusian State University, <https://orcid.org/0009-0003-5056-3880>, e-mail: KarpovichIN@bsu.by; Ivan V. Morochkovski – Head of the Mining Department at LLC "Design of Mining Enterprises", <https://orcid.org/0009-0000-2230-1494>, e-mail: ivan.morochkovski@pgrp.by

Contribution of the authors: Michael A. Zhuravkov – justification of the research concept, formulation of the research goal, objectives, conclusions; Mikhail A. Nikolaitchik – creation of the research model, task formulation, summarization of research results, work with graphical materials; Nikita M. Klimkovich – creation of the geometric and finite element model, modeling the loading process of the rollers; Ivan N. Karpovich – determination of the loads acting on the rollers from the elevator, editing the manuscript text, formatting the manuscript; Ivan V. Morochkovski – analysis and systematization of the initial and obtained data within the framework of the research.

For citation: Zhuravkov M. A., Nikolaitchik M. A., Klimkovich N. M., Karpovich I. N., Morochkovskiy I. V. Assessment of the mine shaft guides stress-strain state under the elevator force impact caused by the dynamics of airflow motion. *Vestsi*

Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tehnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, 2025, vol. 70, no. 4, pp. 296–306 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-296-306>

Received: 22.04.2025

Modified: 14.11.2025

Approved for publication: 03.12.2025

Signed to the press: 19.12.2025

Введение. Канатный транспорт входит в систему подъемного комплекса, являющегося ответственным элементом горнодобывающего предприятия с подземным способом разработки полезных ископаемых. Безопасность шахтного подъемного комплекса обеспечивается надежной и безаварийной работой многочисленных его элементов.

Подъемный комплекс представляет собой сложную систему, состоящую из множества элементов и требующую решения широкого перечня модельных задач механики, возникающих при детальном изучении состояния как отдельных элементов, так и всего комплекса в целом. Исследования по данному направлению охватывают большой диапазон фундаментальных и прикладных задач. Часть работ посвящена моделированию состояния элементов шахтного подъемного комплекса при различных условиях нагружения и эксплуатации [1; 2] в рамках концепций и подходов механики деформируемого твердого тела (см., например, [3–5]). Определенные исследования связаны с моделированием движения [6–8] и изучением колебаний системы [9; 10] с применением классических законов теоретической механики. Помимо этого, в значительном количестве работ рассматриваются процессы движения потоков воздуха в шахтном стволе [11–13] и шахте [14; 15]. Также довольно широко исследуются процессы контактного взаимодействия [16; 17] и многоциклового износа контактных пар и, в частности, роликов клети (см., например, [18–20]).

В настоящей статье рассматривается один из элементов системы «лифтоподъемник – шахтный направляющий проводник (далее – направляющая) и ролик клети» (далее – ролик). В ранее выполненных исследованиях движения клети в вентиляционном стволе установлено, что в моменты сближения клети и противовеса возникают области пониженного и повышенного давления, приводящие к появлению колебаний данного оборудования [11]. Такие колебания гасятся подпружиненными роликами клети, оказывающими силовое воздействие на шахтные направляющие. На рис. 1 приведено распределение давления в случае, когда воздушный поток направлен на встречу движению клети. Анализ картины обтекания показывает, что перед клетью формируется зона повышенного давления, которое воздействует не только на ее нижнюю поверхность,

но и передается далее на противовес. Одновременно с этим вокруг боковой части клети возникают обширные области отрицательного давления. Совместное действие этих факторов приводит к возникновению сил, оказывающих влияние на колебание клети.

Цель настоящей работы – исследование влияния аэродинамических сил, возникающих в системе при движении клети и противовеса, на напряженно-деформированное состояние (НДС) системы «ролики клети – шахтные направляющие». В силу отсутствия фактических данных о жесткостях пружин в роликах клети, обеспечивающих непрерывный контакт с направляющей, в работе рассмотрено несколько вариантов.

Постановка задачи. Модельная задача связана с исследованием контактного взаимодействия роликов клети с направляющей, вызванного динамикой движения воздушных потоков в шахтном стволе при движении клети и противовеса. При проведении модельных исследований рассмотрена конструкция шахтного лифтоподъемника с четырьмя ограничительными направляющими. По каждой направляющей движется набор из трех или шести роликов, расположенных с разных сторон направляющей (рис. 2).

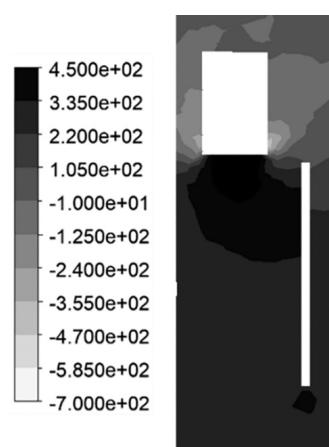


Рис. 1. Распределение давления в окрестности лифта и противовеса, Па

Fig. 1. Pressure distribution in the vicinity of the elevator and counterweight, Pa

Для исследуемой системы была выбрана направляющая таврового сечения, так как такой профиль не только используется в специализированных шахтных подъемниках, но и широко применяется в грузовых и грузопассажирских лифтах. Таким образом, предложенная методика представляет интерес для горной промышленности и для других областей, где используются направляющие таврового профиля.

Методология исследований. Построение математической модели для выполнения аналитических расчетов взаимодействия роликов и направляющих является достаточно сложным. Геометрические особенности, такие как фаски, скругления и профиль направляющих, а также вариативность жесткостей пружин, обеспечивающих непрерывный контакт роликов с направляющими, значительно усложняют процесс построения аналитических решений. Учитывая данные обстоятельства, решение модельной задачи строилось численно на основе метода конечных элементов. Численная модель (без учета трения между роликом и направляющей) была верифицирована с использованием известного аналитического решения задачи Герца [1].

В качестве материала ролика и направляющей была принята сталь, а обода ролика – резина. Физико-механические свойства перечисленных материалов приведены в табл. 1 [21; 22].

Таблица 1. Физико-механические свойства материалов
 Table 1. Physical and mechanical properties of materials

Название материала Name of the Material	Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	Модуль Юнга, ГПа Young's modulus, GPa	Коэффициент Пуассона Poisson's ratio	Предел текучести, МПа Yield strength, MPa	Предел прочности, МПа Ultimate strength MPa
Сталь Steel	7 850	200	0,30	250	490
Резина Rubber	1 200	0,80	0,48	–	–

Геометрическая модель направляющей. Длина направляющей составляла 4 м. Вид поперечного сечения направляющей – тавровый профиль Т89 (ГОСТ Р 71033–2023)¹. Диаметр ролика – 0,17 м, толщина слоя резины – 0,012 м, ширина слоя резины – 0,34 м. При проведении численных расчетов ролики располагались по центру направляющей. Данный случай рассматривался как наиболее неблагоприятный с точки зрения НДС в шахтной направляющей. Значение коэффициента трения между роликом и направляющей принималось равным 0,7 [23; 24].

В процессе движения ролики клети оказывают силовое воздействие на направляющую. Исследовалось НДС направляющей в случаях контакта с одним, а также двумя роликами одновременно, расположенными по нормали к направляющей или параллельно ей. Несмотря на то что конструкция имеет три или шесть роликов, одновременно на направляющую могут действовать только два (для противовеса, см. рис. 2) или четыре ролика (для клети). Ролики, закрепленные на подпружиненных кронштейнах, прижимаются к рабочей грани направляющего проводника с определенным усилием, обеспечивая непрерывный контакт.

В случае воздействия четырех роликов расстояние между их осями составляет 0,27 м. При моделировании узла контакта между противовесом и направляющей были рассмотрены следующие варианты граничных условий (рис. 3):

1) сила прикладывается только к ролику/роликам, расположенным по одной линии, перпендикулярно к направляющей по оси X – сила F_x ;

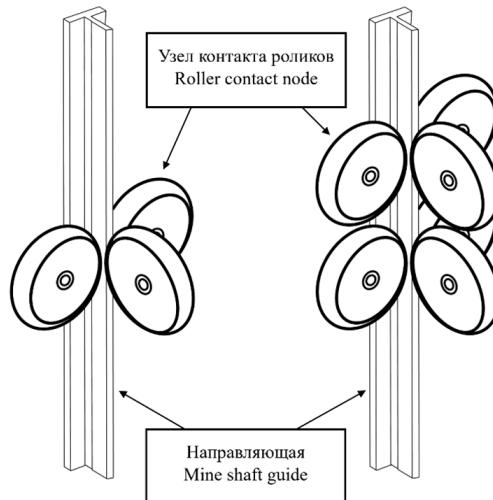


Рис. 2. Пример узла контакта трех и шести роликов с направляющей

Fig. 2. Example of the contact node of three and six rollers with the guide

¹ ГОСТ Р 71033–2023. Лифты. Направляющие для кабин и противовесов. Основные параметры и размеры. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2023. 23 с. URL: <https://meganorm.ru/Data/816/81617.pdf>

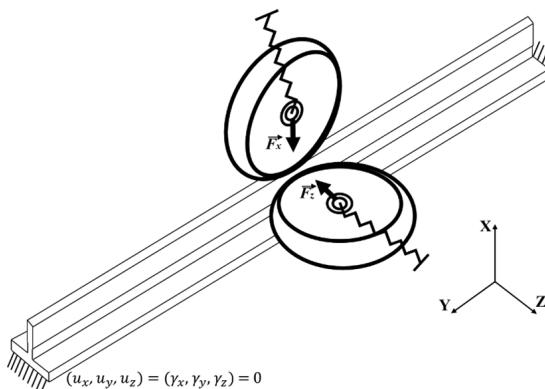


Рис. 3. Схема сил, действующих на направляющую со стороны роликов

Fig. 3. Scheme of forces acting on the guide from the rollers

широкий спектр возможных режимов движения клети и противовеса, включая различные режимы вентиляции.

Результаты исследований и их обсуждение. В моменты сближения клети и противовеса при движении в вентиляционном шахтном стволе возникают области перепада давлений, которые вызывают их колебания.

В рамках исследований моделировались различные режимы движения клети с противовесом и потока воздуха в шахтном стволе. Рассматривалось движение клети вниз и противовеса вверх, клети вверх и противовеса вниз. Стоит отметить, что вентиляция также может работать в двух режимах: поток воздуха направлен из основания шахтного ствола вверх или поток воздуха поступает в шахтный ствол с земной поверхности. Таким образом, были рассмотрены все возможные случаи динамики движения воздушных потоков.

В табл. 2 представлены результаты моделирования контактного взаимодействия ролика и направляющей для трех вариантов граничных условий с учетом сил, создаваемых подпружиненным механизмом роликов.

Оценка запаса прочности направляющей производилась по следующим критериям:

- 1) $\sigma_{int} \geq \sigma$ – критерий интенсивности напряжений, МПа;
- 2) $|\sigma_3| \geq \sigma$, $\sigma_3 < 0$ – критерий максимальных сжимающих напряжений, МПа;
- 3) $\sigma_1 \geq \sigma$, $\sigma_1 > 0$ – критерий максимальных растягивающих напряжений, МПа,

где $\sigma_{int} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$ – интенсивность напряжений, σ_1 – первое главное напряжение, σ_2 – второе главное напряжение, σ_3 – третье главное напряжение, σ_1 – предел текучести.

Анализ результатов численного моделирования НДС конструкций направляющей при силовом воздействии со стороны клети (противовеса) в соответствии с выбранным диапазоном жесткостей пружин показал, что минимальный запас прочности направляющей относительно предела текучести на ее концах по критерию максимальных растягивающих напряжений, составляет 1,6; минимальный запас прочности направляющей относительно передела текучести в районе контактного взаимодействия ролика и направляющей по критерию максимальных сжимающих напряжений – 2,5.

При этом минимальный запас прочности направляющей на ее концах относительно предела прочности составляет 3,0, а минимальный запас прочности направляющей в районе контактного взаимодействия ролика и направляющей относительно предела прочности – 4,8.

Также были получены значения минимальных нагрузок на ролики, приводящие к возникновению остаточных деформаций в направляющей. Для нахождения предельных значений нагрузок, при которых превышается предел текучести направляющей, рассматривались варианты граничных условий 1 и 2.

2) нагрузка прикладывается только к ролику, расположенным на боковой грани направляющей, перпендикулярно направляющей по оси Z – сила F_z ;

3) нагрузка прикладывается к двум/четырем роликам одновременно – F_x и F_z .

По краям направляющей принималось ограничение по всем степеням свободы.

Силы F_x и F_z были определены в результате решения задачи по нахождению аэродинамических сил, действующих на клеть и противовес соответственно при их движении в вентиляционном стволе в рамках ранее проведенных исследований [11]. Значения данных сил были получены для различных жесткостей пружин роликов, обеспечивающих их контакт с направляющими. Также учтен широкий спектр возможных режимов движения клети и противовеса, включая различные режимы вентиляции.

Результаты исследований и их обсуждение. В моменты сближения клети и противовеса при движении в вентиляционном шахтном стволе возникают области перепада давлений, которые вызывают их колебания.

В рамках исследований моделировались различные режимы движения клети с противовесом и потока воздуха в шахтном стволе. Рассматривалось движение клети вниз и противовеса вверх, клети вверх и противовеса вниз. Стоит отметить, что вентиляция также может работать в двух режимах: поток воздуха направлен из основания шахтного ствола вверх или поток воздуха поступает в шахтный ствол с земной поверхности. Таким образом, были рассмотрены все возможные случаи динамики движения воздушных потоков.

В табл. 2 представлены результаты моделирования контактного взаимодействия ролика и направляющей для трех вариантов граничных условий с учетом сил, создаваемых подпружиненным механизмом роликов.

Оценка запаса прочности направляющей производилась по следующим критериям:

- 1) $\sigma_{int} \geq \sigma$ – критерий интенсивности напряжений, МПа;
- 2) $|\sigma_3| \geq \sigma$, $\sigma_3 < 0$ – критерий максимальных сжимающих напряжений, МПа;
- 3) $\sigma_1 \geq \sigma$, $\sigma_1 > 0$ – критерий максимальных растягивающих напряжений, МПа,

где $\sigma_{int} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$ – интенсивность напряжений, σ_1 – первое главное напряжение, σ_2 – второе главное напряжение, σ_3 – третье главное напряжение, σ_1 – предел текучести.

Анализ результатов численного моделирования НДС конструкций направляющей при силовом воздействии со стороны клети (противовеса) в соответствии с выбранным диапазоном жесткостей пружин показал, что минимальный запас прочности направляющей относительно предела текучести на ее концах по критерию максимальных растягивающих напряжений, составляет 1,6; минимальный запас прочности направляющей относительно передела текучести в районе контактного взаимодействия ролика и направляющей по критерию максимальных сжимающих напряжений – 2,5.

При этом минимальный запас прочности направляющей на ее концах относительно предела прочности составляет 3,0, а минимальный запас прочности направляющей в районе контактного взаимодействия ролика и направляющей относительно предела прочности – 4,8.

Также были получены значения минимальных нагрузок на ролики, приводящие к возникновению остаточных деформаций в направляющей. Для нахождения предельных значений нагрузок, при которых превышается предел текучести направляющей, рассматривались варианты граничных условий 1 и 2.

Таблица 2. Анализ полученных результатов

Направление Direction	Жесткость пружин ролика, кН/м Stiffness of roller springs, kN/m	Вариант граничных условий 1 Boundary condition variant 1				Максимальные эквивалентные напряжения, МПа Max value of equivalent stresses, MPa	Максимальные сжимающие напряжения, МПа Max value of compressive stresses MPa	Максимальные растягивающие напряжения, МПа Max value of tensile stresses MPa	Максимальный прогиб, мм Max deflection, mm	Максимальные сжимающие напряжения в районе контакта, МПа Max value of compressive stresses at contact, MPa	Максимальные эквивалентные напряжения в районе контакта, МПа Max value of equivalent stresses at contact, MPa
		Максимальная силы в направлении оси X, Н Max force in X direction, N	Максимальная сила в направлении оси Y, Н Max force in Y direction, N	Максимальные эквивалентные напряжения, МПа Max value of equivalent stresses, MPa	Максимальные сжимающие напряжения, МПа Max value of compressive stresses MPa						
Поток вверх Клеть вниз Flow Up Elevator Down	35	1385	112,23	99,19	158,73	9,45	99,19	96,07			
	20	673	54,53	48,57	77,13	4,63	48,57	47,16			
Поток вверх Клеть вверх Flow Up Elevator Up	35	459	37,19	33,34	52,60	3,18	33,34	32,31			
	20	288	23,34	21,36	33,01	2,00	21,36	20,34			
Поток вниз Клеть вниз Flow Down Elevator Down	35	650	52,56	46,94	74,34	4,52	46,94	45,52			
	20	712	57,69	51,34	81,60	4,89	51,34	49,85			
Поток вниз Клеть вверх Flow Down Elevator Up	35	1079	87,25	78,06	123,40	7,38	78,06	75,28			
	20	462	37,44	33,55	52,95	3,20	33,55	32,52			
Вариант граничных условий 2 Boundary condition variant 2											
Поток вверх Клеть вниз Flow Up Elevator Down	35	439	38,17	50,92	49,90	2,98	28,82	28,91			
	20	243	21,12	28,18	27,62	1,68	15,95	16,00			
Поток вверх Клеть вверх Flow Up Elevator Up	35	404	35,12	46,86	45,92	2,76	26,52	26,60			
	20	9	0,78	1,04	1,02	0,07	0,59	0,59			

Окончание табл. 2

Направление Direction	Жесткость пружин ролика, кН/м Stiffness of roller springs, kN/m	Максимальная сила в направлении оси X, Н Max force in X direction, N	Максимальные эквивалентные напряжения, МПа Max value of equivalent stresses, MPa	Максимальные сжимающие напряжения, МПа Max value of compressive stresses MPa	Максимальные растягивающие напряжения, МПа Max value of tensile stresses MPa	Максимальный против, мм Max deflection, mm	Максимальные сжимающие напряжения в районе контакта, МПа Max value of compressive stresses at contact, MPa	Максимальные эквивалентные напряжения в районе контакта, МПа Max value of equivalent stresses at contact, MPa
Поток вниз Клеть вниз Flow Down Elevator Down	35 20	402 222	34,95 19,30	46,62 25,75	45,69 25,23	2,75 1,54	26,38 14,57	26,47 14,62
Поток вниз Клеть вверх Flow Down Elevator Up	35 20	577 256	50,16 22,25	66,93 29,68	65,59 29,09	3,93 1,78	37,87 16,80	37,99 16,85
<i>Вариант граничных условий 3 Boundary condition variant 3</i>								
Поток вверх Клеть вниз Flow Up Elevator Down	35 20	1385,47 673,13	109,71 53,45	101,25 49,03	150,79 73,45	9,30 4,61	101,25 49,03	98,49 47,91
Поток вверх Клеть вверх Flow Up Elevator Up	35 20	434,90 288,11	40,66 22,93	55,49 21,72	37,73 31,51	3,21 2,03	23,89 21,72	30,58 20,75
Поток вниз Клеть вниз Flow Down Elevator Down	35 20	405,74 712,31	36,56 56,61	49,84 52,02	42,75 77,81	3,02 4,93	25,75 52,02	27,66 50,88
Поток вниз Клеть вверх Flow Down Elevator Up	35 20	909,47 491,93	75,66 39,02	103,45 48,25	93,22 54,22	6,44 3,43	61,96 36,37	59,92 34,99

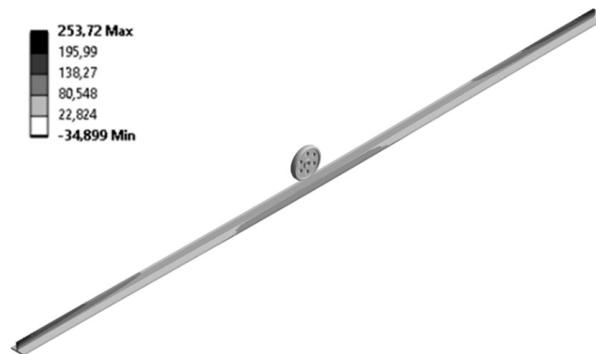


Рис. 4. Распределение максимальных главных напряжений на концах направляющей, МПа
 Fig. 4. Distribution of maximum principal stresses at the ends of the guide, MPa

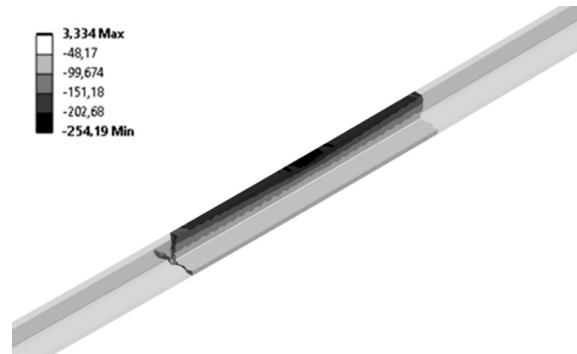


Рис. 5. Распределение минимальных главных напряжений в районе контактного взаимодействия, МПа
 Fig. 5. Distribution of minimum principal stresses in the area of contact interaction, MPa

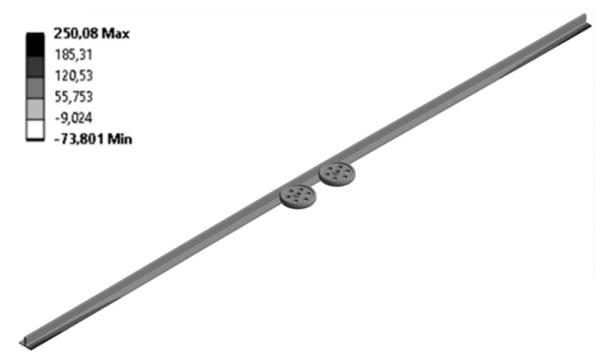


Рис. 6. Распределение максимальных главных напряжений на концах направляющей, МПа
 Fig. 6. Distribution of maximum principal stresses at the ends of the guide, MPa

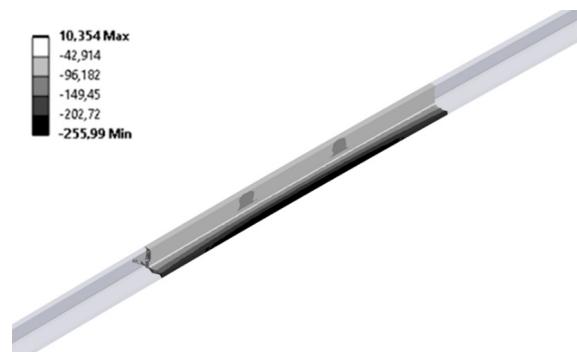


Рис. 7. Распределение минимальных главных напряжений в районе контактного взаимодействия, МПа
 Fig. 7. Distribution of minimum principal stresses in the area of contact interaction, MPa

Так, превышение предела текучести в случае одного контактного узла (одного ролика) для варианта граничных условий 1 имеет место при воздействии силы величиной более 4 400 Н (превышение предела текучести на концах направляющей) и/или 5 900 Н (превышение предела текучести в районе контактного взаимодействия); для граничных условий 2 – соответственно 2 200 Н (превышение предела текучести на концах направляющей) и/или 3 900 Н (превышение предела текучести в области контакта). На рис. 4, 5 показано распределение напряжений в ситуациях, когда превышен предел текучести для рассмотренных вариантов.

Результаты численного моделирования показали, что в случае двух контактных узлов (двух роликов) при варианте граничных условий 1 для превышения предела текучести на концах направляющей необходимо приложить нагрузку 2 200 Н или 3 500 Н – для превышения предела текучести в районе контактного взаимодействия; для варианта граничных условий 2 – 2 200 Н для превышения предела текучести на концах направляющей и/или 3 900 Н – для превышения предела текучести в области контакта к каждому ролику. Соответствующие значения напряжений получены также для случаев воздействия двух роликов на направляющую (рис. 6, 7).

Заключение. В рамках исследований разработана численная модель контактного взаимодействия роликов клети с направляющими с учетом динамики движения воздушных потоков в вентиляционном стволе. При проведении расчетов учтено влияние различных режимов работы вентиляции и динамики движения клети и противовеса.

В результате получено распределение НДС контактной пары «ролик клети – направляющая» для различных конфигураций силового воздействия на направляющие. Помимо этого, вычислены значения критических нагрузок на ролики, вызывающие возникновение остаточных деформаций в направляющей, для различных вариантов контактного взаимодействия.

Исследования показали, что аэродинамические силы играют существенную роль в формировании НДС системы «ролики клети – шахтные направляющие», что подчеркивает необходимость их учета при проектировании элементов шахтного подъемного комплекса.

Полученные в работе результаты могут быть использованы для решения прикладных задач, связанных с расчетами НДС и прочности конструкционных элементов шахтного подъемного комплекса в условиях воздействия аэродинамических сил с целью повышения эксплуатационной долговечности и безопасности рассматриваемой геотехнической системы.

Список использованных источников

1. Журавков, М. А. Контактная задача взаимодействия направляющего ролика с шахтным проводником / М. А. Журавков, М. А. Николайчик, П. С. Маевский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2021. – № 3 (56). – С. 83–89. <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-3-56-83-89>
2. Horizontal dynamic modeling and vibration characteristic analysis for nonlinear coupling systems of high-speed elevators and guide rails. / D. Song, P. Zhang, Y. Wang [et al.] // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2023. – Vol. 37. – P. 643–653. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0109-2>
3. Wang, X. Mechanical model and seismic study of the roller guide–rail assembly in the counterweight system of elevators. / X. Wang, S. Günay, W. Lu // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. – 2021. – Vol. 50, № 2. – P. 518–537. <https://doi.org/10.1002/eqe.3344>
4. Самуся, В. И. Компьютерное моделирование и исследование динамики систем «сосуд–армировка» в стволах с нарушенной геометрией / В. И. Самуся, И. С. Ильина, С. С. Ильина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15, № 20. – С. 277–285. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2016.20.8>
5. Fiołek, P. Assessment of hoisting conveyance guiding forces based on field acceleration measurements and numerical simulation. / P. Fiołek, J. Jakubowski // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, iss. 22. – Art. ID 10758. <https://doi.org/10.3390/app142210758>
6. Zhuravkov, M. A. Analytical model of skip motion taking into account influence of head and balancing ropes / M. A. Zhuravkov, V. P. Savchuk, M. A. Nikolaitchik // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика. – 2021. – № 2. – С. 105–113. <https://doi.org/10.33581/2520-6508-2021-2-105-113>
7. Drzewosz, A. The problem of stability in mechanical systems using the example of mine hoist installations / A. Drzewosz, S. Wolny // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, iss. 15. – Art. ID 6472. <https://doi.org/10.3390/app14156472>
8. Nikolaitchik, M. Determination of the skip force effect on guides in mine shaft / M. Nikolaitchik // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 201. – Art. ID 01017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101017>
9. Escalona, J. L. Advances in the modeling and dynamic simulation of reeving systems using the arbitrary Lagrangian–Eulerian modal method / J. L. Escalona, N. Mohammadi // Nonlinear Dynamics. – 2022. – Vol. 108. – P. 3985–4003. <https://doi.org/10.1007/s11071-022-07357-y>
10. Ивановская, А. В. Особенности динамического анализа тяговой системы с конечным натяжением / А. В. Ивановская // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2022. – № 1. – С. 37–46. https://doi.org/10.47404/2619-0605_2022_1_37
11. Журавков, М. А. Моделирование динамики движения лифта и противовеса в потоке воздуха вентиляционного шахтного ствола. / М. А. Журавков, М. А Николайчик, И. Н. Карпович // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2025. – № 1. – С. 120–130. <https://doi.org/10.15372/FTPPI20250111>
12. Wu, R. Computational fluid dynamics modeling of rope-guided conveyances in two typical kinds of shaft layouts / R. Wu, Z. Zhu, G. Cao // PLOS One. – 2015. – Vol. 10. – Art. ID e0118268. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118268>
13. Simulation of the lateral oscillation of rope-guided conveyance based on fluid-structure interaction. / R. Wu, Z. Zhu, G. Chen [et al.] // Journal of Vibroengineering. – 2014. – Vol. 16. – P. 155–163.
14. Улучшение проветривания тупиковой выработки путем увеличения начальной скорости воздуха в вентиляционной струе / Б. П. Казаков, А. В. Шалимов, О. С. Паршаков, А. В. Богомягков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 1. – С. 112–118.
15. Computational study on aerodynamic characteristics and behaviour of S5010 airfoil / M. H. F. Yazik, M. Tamagawa, M. T. H. Sultan, A. Adzrif // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2024. – Vol. 66, iss. 1. – P. 41–52. – URL: https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid_mechanics_thermal_sciences/article/view/3720
16. Комплексное исследование многоциклового контактного взаимодействия системы «направляющий ролик – шахтный проводник» / М. А. Журавков, А. В. Богданович, М. А. Николайчик [и др.] // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2022. – № 4. – С. 5–18. <https://doi.org/10.36535/0869-4176-2022-04-1>
17. Design and analysis of engine timing silent chain system / Y. Cheng, S. Yin, C. Meng [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2016. – Vol. 230, iss. 13. – P. 2225–2234. <https://doi.org/10.1177/0954406215590643>
18. Gizicki, M. Classification and recognition of roller bearing damage in lift installations using supervised machine learning and vibration analysis / M. Gizicki, S. Kaczmarczyk, R. Smith // 14th Symposium on Lift & Escalator Technologies, 20–21 September 2023. – P. 65–72. URL: https://liftescalatorlibrary.org/paper_indexing/papers/00000533.pdf

19. Hu, D. Research on vibration reduction characteristics of high-speed elevator with rolling guide shoes based on hydraulic damping actuator / D. Hu, Q. Wang, J. Zhan // *Actuators*. – 2024. – Vol. 13, iss. 9. – Art. ID 356. <https://doi.org/10.3390/act13090356>
20. Roller–rail parameters on the transverse vibration characteristics of super-high-speed elevators / S. Cao, R. Zhang, S. Zhang [et al.] // *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 43, № 4. – P. 535–543. <https://doi.org/10.1139/tcsme-2018-0083>
21. Марочник сталей и сплавов / сост.: А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский [и др.]; под общ. ред. А. С. Зубченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
22. Wang, H. Prediction of tire-pavement contact stresses and analysis of asphalt pavement responses: a decoupled approach / H. Wang, I. L. Al-Qadi // *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. – 2011. – Vol. 80. – P. 289–316.
23. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для техн. вузов / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буш [и др.]; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
24. Rubber friction: The contribution from the area of real contact / A. Tiwari, N. Miyashita, N. Espallargas, B. N. J. Persson // *The Journal of Chemical Physics*. – 2018. – Vol. 148, iss. 22. – Art. ID 224701. <https://doi.org/10.1063/1.5037136>

References

1. Zhuravkov M. A., Nikolaitchik M. A., Maevskiy P. S. Contact problem of interaction of a guide roller with a mine conductor. *Mekhanika mashin, mehanizmov i materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2021, no. 3 (56), pp. 83–89 (in Russian). <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-3-56-83-89>
2. Song D., Zhang P., Wang Y., Du C., Lu X., Liu K. Horizontal dynamic modeling and vibration characteristic analysis for nonlinear coupling systems of high-speed elevators and guide rails. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2023, vol. 37, pp. 643–653. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0109-2>
3. Wang X., Günay S., Lu W. Mechanical model and seismic study of the roller guide–rail assembly in the counterweight system of elevators. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2021, vol. 50, no. 2, pp. 518–537. <https://doi.org/10.1002/eqe.3344>
4. Samusia V. I., Iliina I. S., Iliina S. S. Computer modeling and investigation of dynamics of the system “vessel–reinforcement” in shafts with broken geometry. *Vestnik Permskogo natsional’nogo issledovatel’skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo = Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2016, vol. 15, no. 20, pp. 277–285 (in Russian). <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2016.20.8>
5. Fiołek P., Jakubowski J. Assessment of hoisting conveyance guiding forces based on field acceleration measurements and numerical simulation. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, iss. 22, art. ID 10758. <https://doi.org/10.3390/app142210758>
6. Zhuravkov M. A., Savchuk V. P., Nikolaitchik M. A. Analytical model of skip motion taking into account influence of head and balancing ropes. *Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics*, 2021, no. 2, pp. 105–113. <https://doi.org/10.33581/2520-6508-2021-2-105-113>
7. Drzewosz A., Wolny S. The problem of stability in mechanical systems using the example of mine hoist installations. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, iss. 15, art. ID 6472. <https://doi.org/10.3390/app14156472>
8. Nikolaitchik M. Determination of the skip force effect on guides in mine shaft. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 201, art. ID 01017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101017>
9. Escalona J. L., Mohammadi N. Advances in the modeling and dynamic simulation of reeving systems using the arbitrary Lagrangian–Eulerian modal method. *Nonlinear Dynamics*, 2022, vol. 108, pp. 3985–4003. <https://doi.org/10.1007/s11071-022-07357-y>
10. Ivanovskaia A. V. Features of dynamic analysis of the traction system with finite tension. *Vestnik Kershenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kerch State Maritime Technological University], 2022, no. 1, pp. 37–46 (in Russian). https://doi.org/10.47404/2619-0605_2022_1_37
11. Zhuravkov M. A., Nikolaitchik M. A., Karpovich I. N. Modeling Dynamic Behavior of Elevator and Counterweight in Airflow in Ventilation Mine Shaft. *Journal of Mining Sciences*, 2025, vol. 61, pp. 109–118. <https://doi.org/10.1134/s1062739125010119>
12. Wu R., Zhu Z., Cao G. Computational fluid dynamics modeling of rope-guided conveyances in two typical kinds of shaft layouts. *PLOS One*, 2015, vol. 10, art. ID e0118268. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118268>
13. Wu R., Zhu Z., Chen G., Cao G., Li W. Simulation of the lateral oscillation of rope-guided conveyance based on fluid-structure interaction. *Journal of Vibroengineering*, 2014, vol. 16, pp. 155–163.
14. Kazakov B. P., Shalimov A. V., Parshakov O. S., Bogomyagkov A. V. Blind Roadway Ventilation Improvement by Means of Increasing Initial Air Flow Velocity. *Journal of Mining Science*, 2022, vol. 58, no. 1, pp. 98–104. <https://doi.org/10.1134/s1062739122010124>
15. Yazik M. H. F., Tamagawa M., Sultan M. T. H., Adzrif A. Computational study on aerodynamic characteristics and behaviour of S5010 airfoil. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2024, vol. 66, iss. 1, pp. 41–52. Available at: https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid_mechanics_thermal_sciences/article/view/3720
16. Zhuravkov M. A., Bogdanovich A. V., Nikolaitchik M. A., Makhutov N. A., Gadenin M. M., Reznikov D. O. Comprehensive study of multi-cycle contact interaction of the “guide roller – mine conductor” system. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsii = Safety and Emergencies Problems*, 2022, no. 4, pp. 5–18 (in Russian). <https://doi.org/10.36535/0869-4176-2022-04-1>

17. Cheng Y., Yin S., Meng C., Wang X., Liu H. Design and analysis of engine timing silent chain system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2016, vol. 230, iss. 13, pp. 2225–2234. <https://doi.org/10.1177/0954406215590643>
18. Gizicki M., Kaczmarczyk S., Smith R. Classification and recognition of roller bearing damage in lift installations using supervised machine learning and vibration analysis. *14th Symposium on Lift & Escalator, 20–21 September 2023*, pp. 65–72. Available at: https://liftescalatorlibrary.org/paper_indexing/papers/00000533.pdf
19. Hu D., Wang Q., Zhan J. Research on vibration reduction characteristics of high-speed elevator with rolling guide shoes based on hydraulic damping actuator. *Actuators*, 2024, vol. 13, iss. 9, art. ID 356. <https://doi.org/10.3390/act13090356>
20. Cao S., Zhang R., Zhang S., Qiao S., Cong D., Dong M. Roller–rail parameters on the transverse vibration characteristics of super-high-speed elevators. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2019, vol. 43, no. 4, pp. 535–543. <https://doi.org/10.1139/tcsme-2018-0083>
21. Zubchenko A. S., Koloskov M. M., Kashirskiy Yu. V. [et al.], (compilers). *Steel and Alloy Directory*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 784 p. (in Russian).
22. Wang H., Al-Qadi I. L. Prediction of tire-pavement contact stresses and analysis of asphalt pavement responses: a decoupled approach. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2011, vol. 80, pp. 289–316.
23. Chichinadze A. V., Braun E. D., Bushe N. A., Buyanovskii I. A., Gekker F. R., Goryacheva I. G. [et al.]. *Fundamentals of Tribology (Friction, Wear, Lubrication)*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 664 p. (in Russian).
24. Tiwari A., Miyashita N., Espallargas N., Persson B. N. J. Rubber friction: The contribution from the area of real contact. *The Journal of Chemical Physics*, 2018, vol. 148, iss. 22, art. ID 224701. <https://doi.org/10.1063/1.5037136>

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-307-319>

УДК 622.363.2.012.22:622.373.12(476)



Оригинальная статья

Н. А. Высоцкая^{1*}, В. Я. Прушак¹, А. Л. Поляков²

¹Закрытое акционерное общество «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», ул. Козлова, 69, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь

²Филиал Белорусского национального технического университета (г. Солигорск),
ул. Гуляева, 2, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ СЛОЕВОЙ ВЫЕМКИ
ТРЕТЬЕГО КАЛИЙНОГО ПЛАСТА ДЛЯ ГЛУБОКИХ УЧАСТКОВ
ШАХТНОГО ПОЛЯ РУДНИКА ЧЕТВЕРТОГО РУДОУПРАВЛЕНИЯ
ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»**

Аннотация. С учетом накопленного на Старобинском месторождении практического опыта были разработаны четыре варианта технологических схем слоевой выемки Третьего калийного пласта на глубине свыше 900 м. Сравнение представленных вариантов технологических схем осуществлялось по следующим показателям: удельный объем горно-подготовительных работ; среднее содержание хлористого калия и нерастворимого остатка в руде; объем добычи руды в стандарте; коэффициент извлечения полезного компонента из недр. Отмечено, что более эффективными являются технологические схемы с последовательным порядком отработки выемочных столбов, где выемочные (панельные) выработки проводят отдельно для верхней и нижней лав, а существенным недостатком, усложняющим работу забойного конвейера и ведущим к ухудшению качества руды, является наличие в верхней лаве наклонного участка. Выбор определенного варианта слоевой выемки Третьего пласта с вовлечением в отработку 4-го сильвинитового слоя на глубинах более 900 м предлагается осуществлять с учетом привязки к горно-геологическим и горнотехническим условиям конкретного участка шахтного поля, поскольку представленные в работе данные свидетельствуют о незначительном отличии вариантов технологических схем по всем принятым для сравнения показателям. Технологические схемы будут использованы при составлении проектов отработки выемочных столбов слоевыми лавами и войдут в соответствующие нормативные документы ОАО «Беларуськалий».

Ключевые слова: Третий калийный пласт, 4-й сильвинитовый слой, слои 2, 2–3, 3, слоевая выемка, большие глубины, технологические схемы, лава, горная выработка, глубокие горизонты, выемочный столб

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Высоцкая Надежда Александровна – начальник отдела научно-технической информации Закрытого акционерного общества «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», e-mail: onti@sipr.by; Прушак Виктор Яковлевич – академик Национальной академии наук Беларусь, доктор технических наук, профессор, технический директор Закрытого акционерного общества «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», e-mail: ipr@sipr.by; Поляков Андрей Леонидович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и оборудование разработки месторождений полезных ископаемых» филиала Белорусского национального технического университета (г. Солигорск), e-mail: alphinxx@list.ru

Вклад авторов: Высоцкая Надежда Александровна – работа с текстом рукописи, литературными источниками, подготовка графического материала, проведение сравнительного анализа полученных результатов; Прушак Виктор Яковлевич – разработка методологии исследования, проведение исследований, проверка воспроизводимости результатов, обобщение результатов исследования, критический пересмотр текста рукописи; Поляков Андрей Леонидович – проведение исследований, формулировка выводов, обобщение результатов исследования, подготовка графического материала, редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Высоцкая, Н. А. Разработка технологических схем слоевой выемки Третьего калийного пласта для глубоких участков шахтного поля рудника Четвертого рудоуправления ОАО «Беларуськалий» / Н. А. Высоцкая, В. Я. Прушак, А. Л. Поляков // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных на-вук. – 2025. – Т. 70, № 4. – С. 307–319. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-307-319>

Поступила в редакцию: 16.05.2025

Доработанный вариант: 04.11.2025

Утверждена к публикации: 03.12.2025

Подписана в печать: 19.12.2025

*Original article*Nadejda A. Vysotskaya^{1*}, Victor Ya. Prushak¹, Andrei L. Paliakou²¹*Joint Stock Company “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”,
69, Kozlov St., 223710, Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus*²*Branch of the Belarusian National University of Technology (Soligorsk),
2, Gulyaev St., 223710, Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus***DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGICAL SCHEMES FOR LAYERED MINING
OF THE THIRD POTASH SEAM FOR THE DEEP SECTIONS OF THE FOURTH PRODUCTION
UNIT MINE FIELD OF JSC “BELARUSKALI”**

Abstract. Taking into account the practical experience gained at the Starobinski Deposit, the four variants of technological schemes for layered extraction of the Third Potash Seam at a depth of over 900 m were developed. The comparison of the presented variants of technological schemes was carried out according to the following indicators: the specific volume of the mining and preparation work; the average content of potassium chloride and insoluble residue in the ore; the volume of ore extraction in the standard; the coefficient of the useful component extraction from the subsoil. It was noted that technological schemes with a sequential order of extraction pillars mining, where extraction (panel) workings are carried out separately for the upper and lower longwalls are more effective, and the presence of an inclined section in the upper longwall is a significant disadvantage that complicates the operation of the face conveyor and leads to a deterioration in ore quality. It is proposed to select a specific variant of layered extraction of the Third Seam with the involvement of the 4th sylvinitic layer in the development at depths of more than 900 m taking into account the mining-geological and mining-technical conditions of a specific section of the mine field, since the data presented in the work indicate an insignificant difference in the variants of technological schemes for all accepted indicators for comparison. The process flow charts will be used in the development of projects for the development of mining pillars using layered longwalls and will be included in the relevant regulatory documents of JSC “Belaruskali”.

Keywords: the Third potash seam, the 4th sylvinitic layer, the layers 2, 2–3, 3, layered extraction, great depths, technological schemes, the longwall, mine working, deep horizons, extraction column

Conflict of interest: authors declare no conflict of interest.

Information about the authors: Nadejda A. Vysotskaya – Head of the Department of Scientific and Technical Information at JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, e-mail: onti@sipr.by; Victor Ya. Prushak – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Technical Director at JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, e-mail: ipr@sipr.by; Andrey L. Paliakou – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department “Technology and Equipment for Mining” of the Branch of the Belarusian National University of Technology (Soligorsk), e-mail: alphinxx@list.ru

Contribution of the authors: Nadejda A. Vysotskaya – work with the text of the manuscript, literary sources, preparation of graphic material, conducting a comparative analysis of the results obtained; Victor Ya. Prushak – development of research methodology, conducting research, verification of reproducibility of results, generalization of research results, critical revision of the manuscript text; Andrey L. Paliakou – conducting research, conclusions formulation, generalization of research results, preparation of graphic material, editing the manuscript text.

For citation: Vysotskaya N. A., Prushak V. Ya., Paliakou A. L. Development of the technological schemes for layered mining of the Third potash seam for the deep sections of the fourth production unit mine field of JSC “Belaruskali”. *Vestsi Natsyyanal’nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tehnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 4, pp. 307–319 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-307-319>

Received: 16.05.2025

Modified: 04.11.2025

Approved for publication: 03.12.2025

Signed to the press: 19.12.2025

Введение. Крепление и поддержание в безопасном состоянии подземных горных выработок, пройденных на глубоких горизонтах месторождений, является одним из наиболее ответственных и ресурсоемких технологических процессов горного производства [1]. Неверный выбор типа применяемой крепи приводит к риску внезапных обрушений, повышает вероятность разрушения участков выработки и, как следствие, незапланированных простоев в работе рудника.

Деятельность горнодобывающих предприятий неразрывно связана с вовлечением в отработку все новых участков месторождений [2]. Условия отработки месторождения калийных солей постоянно усложняются. Прежде всего это связано с увеличением глубины ведения очистных работ и заложения капитальных и вспомогательных выработок [3].

Старобинское месторождение калийных солей, расположенное в южной части Республики Беларусь, находится в эксплуатации с 1962 г. [4] с запасами 3,4 млрд т. Около 80 % запасов сильвинитовой руды на месторождении сосредоточены в пласте Третьего калийного горизонта (в Третьем калийном пласте), который представляет собой моноклиналь, залегающую с падением под углом 2–3° в северо-восточном направлении на глубинах 450–1200 м. Калийный горизонт состоит из шести сильвинитовых слоев, разделенных слоями каменной соли (галита); 1-, 5- и 6-й сильвинитовые слои из-за малой мощности отнесены к балансовым, а для отработки 2-, 3- и 4-го сильвинитовых слоев используют слоевую выемку [5] с последовательной выемкой слоев лавами. При слоевой выемке пласта Третьего калийного горизонта Старобинского месторождения в нижних лавах, отрабатывающих слои 2, 2–3, 3 после извлечения верхнего 4-го сильвинитового слоя, наблюдаются интенсивные динамические проявления горного давления при обрушениях кровли [6]. В настоящее время слоевая выемка – это основная технология отработки Третьего калийного пласта на всех рудниках Старобинского месторождения [7].

Опыт разработки месторождения свидетельствует, что одним из основных факторов, влияющих на проявления горного давления, является глубина заложения выработок [8]. Более 20 % промышленных запасов Третьего калийного пласта на Старобинском месторождении располагается в сложных горно-геологических условиях на глубинах разработки более 900 м. С увеличением глубины до 900 м и более в кровле верхнего 4-го сильвинитового слоя промышленного пласта существенно (в 2–2,5 раза) возрастает среднее содержание глинистых пород, что снижает агрегатную прочность пород кровли и вместе с большой глубиной вызывает интенсивное деформирование, а затем преждевременное разрушение выемочных штреков [9; 10], поддерживаемых с применением стандартных мер охраны и крепления. В таких условиях запасы данного слоя в настоящее время не извлекаются из-за низкой устойчивости подготовительных выработок при их расположении в нем. В таких условиях пласт отрабатывается только по нижним слоям 2, 2–3 и 3, а верхний сильвинитовый слой после его подработки обрушается и остается в выработанном пространстве. Потери балансовых запасов при этом составляют до 30 %.

Интенсивная разработка Старобинского месторождения калийных солей диктует необходимость более рационального использования недр, в том числе за счет снижения потерь полезного ископаемого, оставляемого в межстолбовых целиках. С этой целью разрабатываются технологические схемы слоевой выемки калийных пластов [11–13].

В настоящей статье авторами предложены варианты технологических схем с последовательной выемкой слоев пласта Третьего калийного горизонта Старобинского месторождения в сложных горно-геологических условиях на глубине 900 м и более и выполнено их технико-экономическое сравнение. Выбор конкретных участков исследования осуществлялся с учетом плана развития горных работ рудника [14].

Основные требования к разработке технологических схем слоевой выемки Третьего калийного пласта на больших глубинах. При разработке возможных вариантов слоевой выемки Третьего калийного пласта на больших глубинах залегания был учтен опыт применения такой выемки на угольных и калийных месторождениях в подобных горно-геологических условиях. Применительно к Старобинскому месторождению, исходя из практического опыта и результатов ранее выполненных исследований, были выделены принципы, обуславливающие разработку новых технологических схем, и сформулирован ряд требований к разрабатываемым технологическим схемам слоевой выемки Третьего калийного пласта в следующих сложных горно-геологических условиях.

Во-первых, при наличии в кровле 4-го сильвинитового слоя до 50 % слабых пород подготовительные выработки необходимо располагать в пределах более устойчивых нижних слоев пласта.

Во-вторых, сохранность выработок на границе с выработанным пространством зависит от времени их нахождения в зоне бокового остаточного опорного давления смежной лавы и в зоне временного опорного давления собственной лавы. Поэтому выработки на границе с выработанным пространством смежной лавы проще сохранять в эксплуатационном состоянии при пост-

дайном их проведении небольшими участками (в пределах выемочного блока), чем при проходке сразу на всю длину выемочного столба.

В-третьих, применение технологических схем слоевой выемки Третьего калийного пласта при опережающей отработке 4-го сильвинитового слоя верхней лавой с охраной бортовых штреков целиками больших размеров (более 50 м) между выемочными столбами является одной из основных причин динамического проявления горного давления с воздействием на призабойное пространство и механизированную крепь нижних лав при периодических обрушениях кровли. В случае применения бесцеликовых технологических схем кровле не на чем зависать в выработанном пространстве у бортовых штреков верхних лав, поэтому вероятность динамических обрушений пород высокой интенсивности существенно снижается.

В-четвертых, использование для отработки Третьего калийного пласта технологии селективной выемки на полную мощность одной лавой с расположением всех подготовительных выработок под сравнительно устойчивой 30-сантиметровой пачкой 3-го сильвинитового слоя позволяет исключить вероятность динамических обрушений кровли. Однако валовая выемка пласта в этом случае исключена из-за существенного разубоживания отбиваемой руды, а для селективной лавы будет необходима разработка новой конструкции комбайна, при этом ожидается производительность лавы значительно ниже достигнутой в слоевых лавах.

В-пятых, устойчивость подготовительных выработок в технологических схемах слоевой выемки Третьего калийного пласта зависит и от порядка отработки верхнего и нижнего слоев в пределах выемочного столба или панели. При одновременной отработке слоев выработка верхней и нижней лав могут оказаться в зоне совместного влияния опорного давления от обеих лав и быстро накопить критические деформации. При последовательной отработке слоев совместное влияние на выработки очистных работ верхних и нижних лав исключается. Кроме того, при таком порядке отработки слоевую выемку пласта можно вести с применением бесцеликовых технологических схем.

Разработка вариантов слоевой выемки Третьего калийного пласта для больших глубин разработки. Для разработки технологических схем слоевой выемки Третьего калийного пласта с вовлечением в отработку 4-го сильвинитового слоя необходим выбор участка в пределах шахтного поля на горизонте –670 м, имеющего глубину заложения более 900 м. Наиболее перспективным для применения разрабатываемых технологических схем является северо-восточный участок шахтного поля. На рис. 1 показана часть плана горных работ восточнее 8-й северной панели горизонта –670 м, где имеются неотработанные запасы полезного ископаемого, расположющиеся на глубине от 910 м на юге до 990 м на севере. План выполнен с использованием геоинформационной системы MapManager, разработанной в Белорусском государственном университете (авторы разработки – М. А. Журавков, В. В. Видякин).

На глубинах свыше 900 м и слабоустойчивых породах кровли наиболее подходящим способом является проведение и поддержание выработок вприсечку к выработанному пространству. При этом способы бесцеликовой отработки 4-го сильвинитового слоя Старобинского месторождения во многом зависят от горно-геологических условий, в зависимости от этого возможны следующие варианты поддержания бортового штрека лавы, проводимого со стороны выработанного пространства смежной лавы:

- проведение выработки отстающей смежной лавы вприсечку (с целиком 3–5 м) к выработанному пространству опережающей лавы;
- оставление между выемочными столбами временного целика, частично вынимаемого комбайном отстающей смежной лавы одновременно с ведением очистной выемки в самой лаве;
- повторное использования выработки для отработки смежного выемочного столба.

С учетом требований, изложенных в первой части статьи, для отработки Третьего калийного пласта в северо-восточной части шахтного поля рудника Четвертого рудоуправления разработаны четыре варианта технологических схем слоевой выемки.

Вариант 1 – бесцеликовая выемка Третьего калийного пласта с последовательным порядком отработки выемочных столбов верхней лавой по 4-му сильвинитовому слою и нижней лавой по слоям 2, 2–3, 3 в пределах панели (рис. 2).

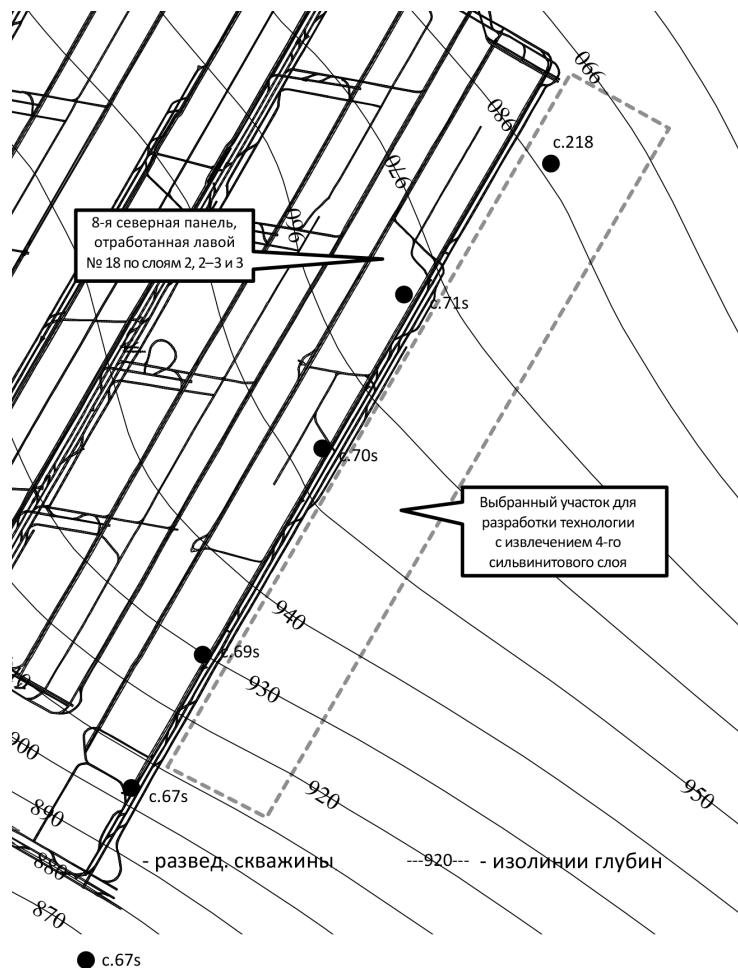


Рис. 1. Выкопировка из плана горных выработок ГИС MapManager северо-восточной части шахтного поля рудника Четвертого рудоуправления с изолиниями глубины залегания Третьего калийного пласта

Fig. 1. Copying of northeastern parts of mining of the mine 4th Mining Department with isolines of depth of occurrence of the Third potash formation from the GIS MapManager plan of mountain mining sites

В данной технологической схеме вначале от выработок главного направления на всю длину выемочного столба проходятся транспортный (1), конвейерный (2) и вентиляционный № 1 (3) штреки верхней лавы. Очистные работы по этой схеме начинаются после оконтуривания первого от монтажного штрека короткого выемочного столба длиной 300–400 м. Для этого от транспортного штрека проводится вспомогательная выработка (5), а затем вприсечку с целиком 5 м – вентиляционный штрек № 2 (4). Вентиляционный штрек № 2 можно использовать только для проветривания очистного забоя без установки в нем крепи сопряжения и присутствия людей. Данное техническое решение использовано и в следующих двух вариантах.

Вентиляционный штрек № 1 (3) для повышения безопасности его перехода нижней лавой может закладываться рудой из верхней лавы.

После отработки первых двух выемочных столбов верхней лавой начинается подготовка нижней лавы с проходкой на всю длину столба транспортного (8), конвейерного (9), вентиляционных № 1 и № 2 (10 и 11) штреков под выработанным пространством первой верхней лавы. Для проходки вентиляционного штрека № 2 (10) на границе с выработанным пространством используются вспомогательные выработки (5). Отработка выемочного столба нижней лавой может вестись короткими столбами с постадийным проведением вентиляционного штрека № 2 (11).

Вариант 2 – с последовательным порядком отработки выемочных столбов верхней и нижней лавами в пределах панели и формированием в концевой части верхней лавы наклонного участка на нижний 3-й сильвинитовый слой (рис. 3).

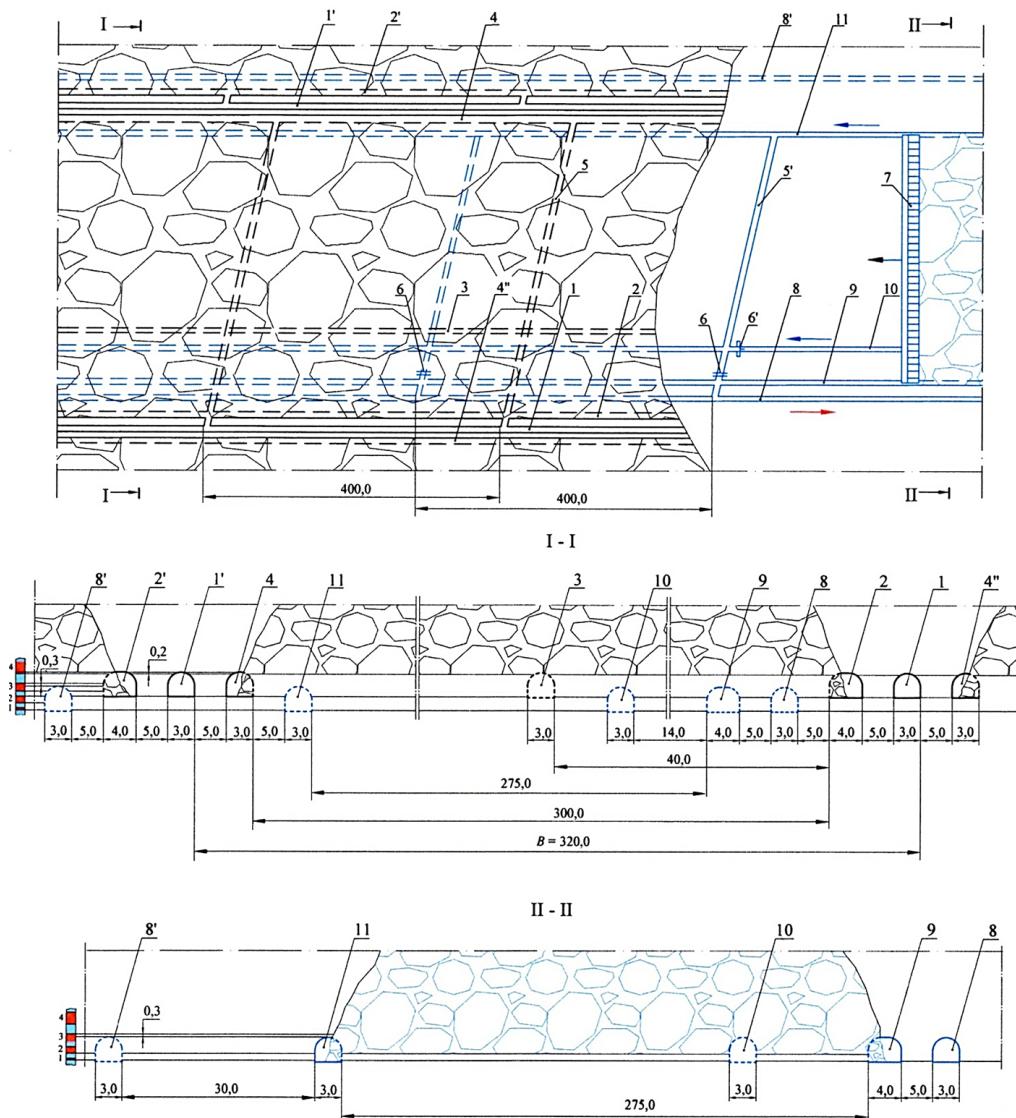


Рис. 2. Технологическая схема слоевой бесцеликовой выемки Третьего калийного пласта с последовательной отработкой 4-го сильвинитового слоя верхней лавой и слоев 2, 2–3, 3 нижней лавой в пределах панели; I, II – разрез; I – I вид I; II – II – вид II; 1, 2, 3, 4 – транспортный, конвейерный, вентиляционный

№ 1 и вентиляционный № 2 штреки отрабатываемой верхней лавы; 1', 2' – транспортный и конвейерный штреки отработанной верхней лавы; 4" – вентиляционный штрек № 2 последующей верхней лавы; 5, 5' – вспомогательные выработки; 6, 6' – изолирующая и вентиляционная перемычки; 7 – забойная крепь; 8, 9, 10, 11 – транспортный, конвейерный, вентиляционный № 1 и вентиляционный № 2 штреки отрабатываемой нижней лавы;

8' – транспортный штрек отработанной нижней лавы; B – величина максимального пролета

Fig. 2. Technological scheme of a layered excavation of the Third potash reservoir with sequential mining of 4th silvinit layers by upper lava and layers 2, 2–3, 3 by lower lava within the panel; I, II – section; I – I – view I; II – II – view II;

1, 2, 3, 4 – transport, conveyor, ventilation no. 1 and ventilation no. 2 galleries of the upper lava being worked out;

1', 2' – transport and conveyor shafts of the spent upper lava; 4" – ventilation mining operations no. 2 of the subsequent upper lava; 5, 5' – auxiliary workings; 6, 6' – insulating and ventilation bridges; 7 – downhole support; 8, 9, 10, 11 – transport, conveyor, ventilation no. 1 and ventilation no. 2 mining operations of the worked-out lower lava;

8' – transport mining operations of the spent lower lava; B – maximum span value

Подготовка выемочного столба для его отработки верхней лавой заключается в проходке от выработок главного направления на всю длину транспортного (1), конвейерного (2), вентиляционных штреков № 1 и № 2 (3 и 4).

После отработки первых двух выемочных столбов верхней лавой начинается подготовка нижней лавы от выработок главного направления с проходкой на всю длину столба транспортного (8), конвейерного (9) и вентиляционного (10) штреков под выработанным пространством

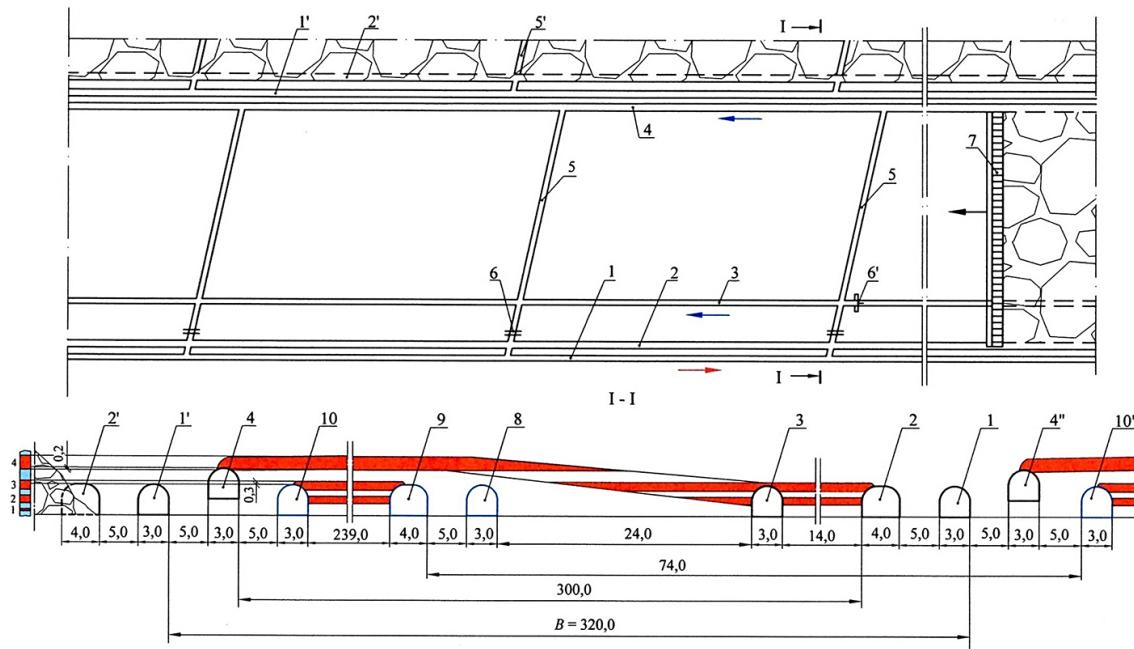


Рис. 3. Технологическая схема слоевой выемки Третьего калийного пласта с последовательным порядком отработки выемочных столбов верхней и нижней лавами в пределах панели и формированием в концевой части верхней лавы наклонного участка на нижний; I – разрез; I – I – вид I; 1, 2, 3, 4 – транспортный, конвейерный, вентиляционный № 1 и вентиляционный № 2 штреки отрабатываемой верхней лавы; 5, 5' – вспомогательные выработки; 6, 6' – изолирующие и вентиляционные перемычки; 7 – забойная крепь; 1', 2' – транспортный и конвейерный штреки отработанной смежной лавы; 4'', 10'' – вентиляционные штреки верхней и нижней лав, подлежащих отработке (на плане не показаны); 8, 9, 10 – транспортный, конвейерный и вентиляционный штреки нижней лавы (на плане не показаны); B – величина максимального пролета

Fig. 3. Technological scheme of the layered excavation of the Third potash reservoir with a sequential order of working out the excavation pillars of the upper and lower lavas within the panel and the formation of an inclined section at the end of the upper lava on the lower one; I – section; I – I – view I; 1, 2, 3, 4 – transport, conveyor, ventilation no. 1 and ventilation no. 2 galleries of the upper lava being worked out; 5, 5' – auxiliary workings;

6, 6' – insulating and ventilation bridges; 7 – mining support; 1', 2' – transport and conveyor shafts of spent adjacent lava; 4'', 10'' – ventilation galleries of the upper and lower lavas to be worked out (not shown on the plan); 8, 9, 10 – transport, conveyor and ventilation galleries of the lower lava (not shown on the plan); B – maximum span value

первой верхней лавы. Для проходки вентиляционного штрека (10) на границе с выработанным пространством используются вспомогательные выработки.

Данная технологическая схема предусматривает формирование наклонного участка длиной до 30 м, расположенного в концевой части верхней лавы со стороны вентиляционного штрека № 1 (3) для соединения с нижним слоем, в котором пройдены транспортный, конвейерный и вентиляционный № 1 штреки лавы.

Выемочный столб отрабатывается нижней лавой в обратном порядке к выработкам главного направления и при необходимости может вестись также короткими столбами с постадийным проведением вентиляционного штрека.

Вариант 3 – со смещением выемочных столбов в слоях, последовательным порядком их отработки верхней и нижней лавами в пределах панели с формированием в концевой части верхней лавы наклонного участка на нижний слой (рис. 4).

В данной технологической схеме подготовка выемочного столба для отработки его верхней лавой и привязка подготовительных выработок к пласту аналогичны предыдущей схеме. Выемочный столб нижней лавы смещен относительно столба верхней лавы за счет проходки дополнительного вентиляционного штрека (11) в ненадработанном массиве вприсечку к выработанному пространству смежной лавы. Этот штрек служит только для проветривания лавы. Остальные подготовительные выработки нижней лавы проходятся под выработанным пространством верхней лавы.

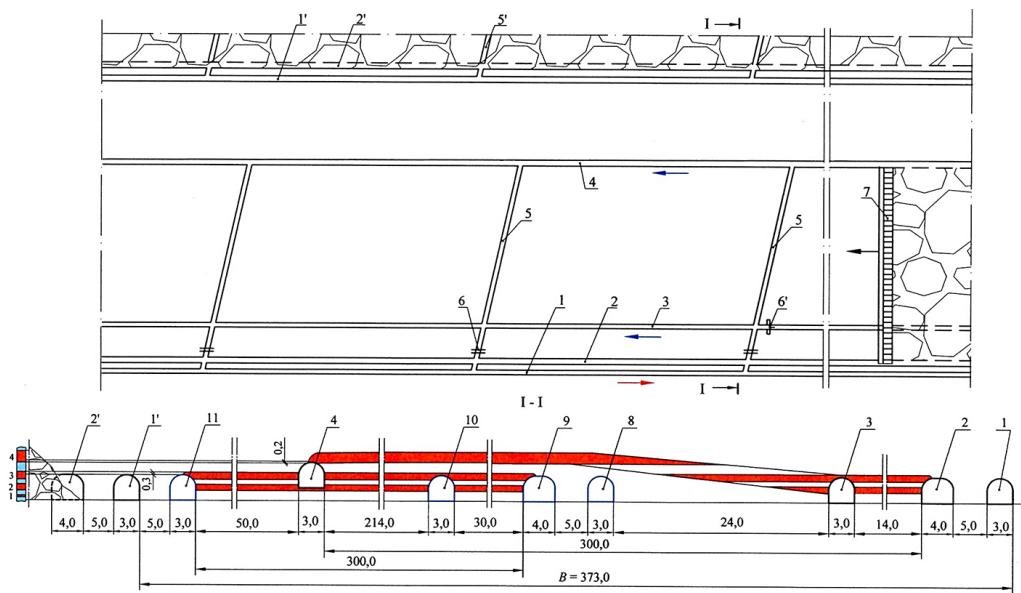


Рис. 4. Технологическая схема слоевой выемки Третьего калийного пласта со смещением выемочных столбов в слоях, последовательном порядке их обработки верхней и нижней лавами в пределах панели с формированием в концевой части верхней лавы наклонного участка на нижний слой; I – разрез; I – I – вид I;
1, 2, 3, 4 – транспортный, конвейерный, вентиляционный № 1 и вентиляционный № 2 штреки отрабатываемой верхней лавы; 5, 5' – вспомогательные выработки; 6, 6' – изолирующие и вентиляционные перемычки;
7 – забойная крепь; 1', 2' – транспортный и конвейерный штреки отработанной смежной лавы;
8, 9, 10, 11 – транспортный, конвейерный и вентиляционный № 1 и вентиляционный № 2 штреки нижней лавы (на плане не показаны); B – величина максимального пролета

Fig. 4. Technological scheme of the layered excavation of the Third potash reservoir with the displacement of the excavation pillars in the layers, the sequential order of their processing by the upper and lower lavas within the panel with the formation of an inclined section on the lower layer at the end of the upper lava; I – section; I – I – view I; 1, 2, 3, 4 – transport, conveyor, ventilation no. 1 and ventilation no. 2 adits of the upper longwall being mined; 5, 5' – auxiliary workings; 6, 6' – insulating and ventilation bridges; 7 – mining support; 1', 2' – transport and conveyor shafts of spent adjacent lava; 8, 9, 10, 11 – transport, conveyor and ventilation no. 1 and ventilation no. 2 adits of lower lava flows (not shown on the plan); B – maximum span value

Вариант 4 – бесцеликовая выемка с отработкой верхнего 4-го сильвинитового слоя через длительный (не менее 25 лет) промежуток времени после его подработки нижней лавой по слоям 2, 2–3 и 3 (рис. 5).

Технологическая схема предусматривает опережающую отработку нижних (2, 2–3, 3) слоев с последующей выемкой подработанного 4-го сильвинитового слоя через длительный (не менее 25 лет) промежуток времени.

Подготовка выемочного столба для его отработки лавой по слоям 2, 2–3, 3 осуществляется проходкой от выработок главного направления четырех штреков – транспортного (1), конвейерного (2), вентиляционного № 1 (3) и вентиляционного № 2 (4). Вентиляционный штрек № 2 проводится вприсечку к выработанному пространству смежной лавы и предназначен только для проветривания очистного забоя.

Подготовительные выработки по 4-му сильвинитовому слою (транспортный (8), конвейерный (9), вентиляционные № 1 и № 2 (10 и 11)) располагаются в подработанном лавой по слоям 2, 2–3, 3 массиве и проходят с прихватом 0,4 м нижней части 4-го сильвинитового слоя.

Отработка выемочных столбов по слоям 2, 2–3, 3 и сильвинитовому слою 4 ведется в обратном порядке к выработкам главного направления. При необходимости возможно применение коротких столбов с оконтурированием их путем постадийного проведения вентиляционных штреков № 1 (4) и № 2 (11).

В варианте 1 все подготовительные выработки верхней лавы приходятся с прихватом 0,17–0,20 м нижней части 4-го сильвинитового слоя. В вариантах 2 и 3 с такой привязкой проводятся лишь вспомогательные вентиляционные штреки, предназначенные только для проветрива-

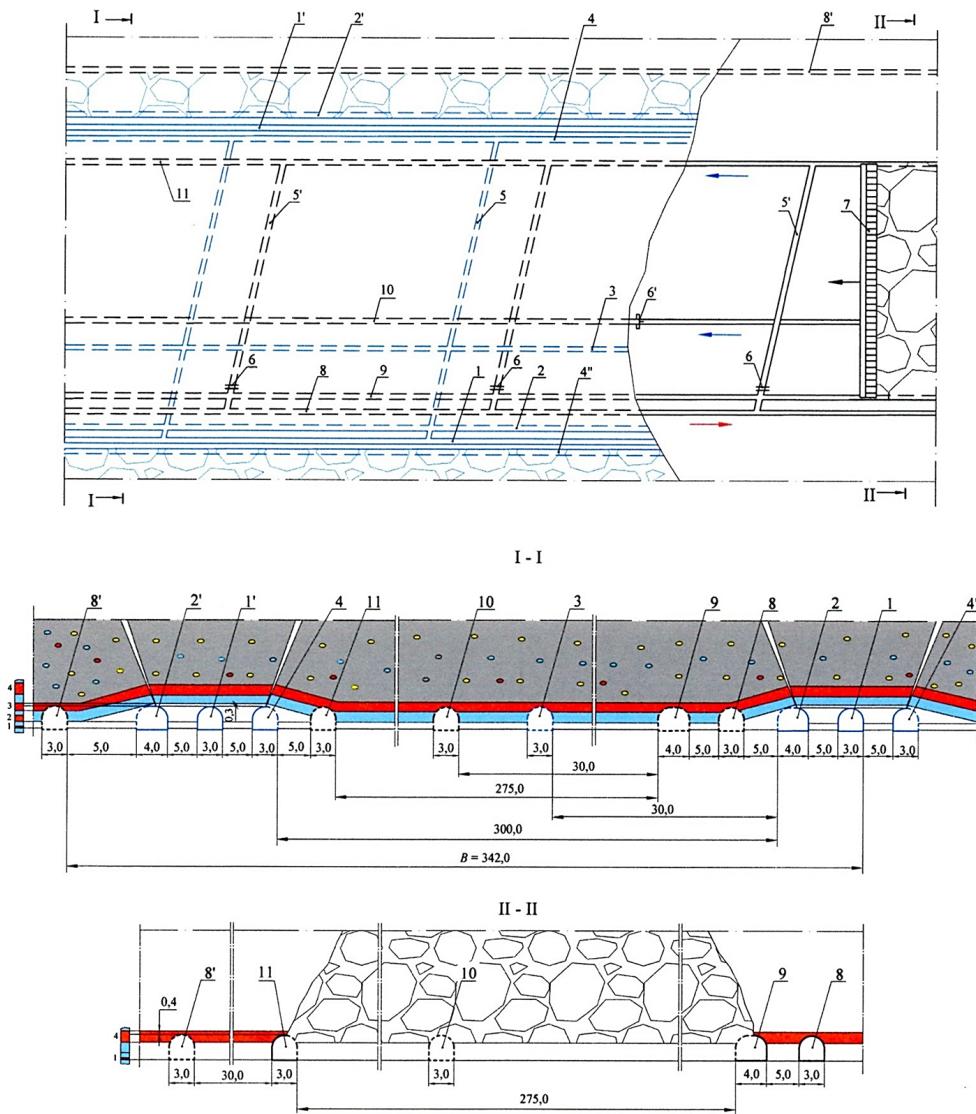


Рис. 5. Технологическая схема слоевой бесцеликовой выемки Третьего калийного пласта с отработкой 4-го сильвинитового слоя через длительный (не менее 25 лет) промежуток времени после его подработки лавой по слоям 2, 2–3 и 3; I, II – разрез; I – I вид I; II – II – вид II; 1, 2, 3, 4 – транспортный, конвейерный, вентиляционный № 1 и вентиляционный № 2 штреки отрабатываемой лавы по слоям 2, 2–3, 3; 1', 2' – транспортный и конвейерный штреки отработанной лавы по слоям 2, 2–3, 3; 4'' – вентиляционный штрек № 2 последующей лавы по слоям 2, 2–3, 3; 5, 5' – вспомогательные выработки; 6, 6' – изолирующая и вентиляционные перемычки; 7 – забойная крепь; 8, 9, 10, 11 – транспортный, конвейерный, вентиляционный № 1 и вентиляционный № 2 штреки отрабатываемой лавы по 4-му сильвинитовому слою; 8' – транспортный штрек отработанной лавы по 4-му сильвинитовому слою; B – величина максимального пролета

Fig. 5. Technological scheme of layered excavation of the Third potash reservoir with the processing of the 4th silvinite layer after a long (at least 25 years) period of time after its underworking by lava in layers 2, 2–3 and 3; I, II – section; I – I view I; II – II – view II; 1, 2, 3, 4 – transport, conveyor, ventilation no. 1 and ventilation no. 2 galleries of lava flows by layers 2, 2–3, 3; 1', 2' – transport and conveyor galleries of spent lava for scrapping 2, 2–3, 3; 4'' – ventilation galleries no. 2 of the subsequent lava by layers 2, 2–3, 3; 5, 5' – auxiliary workings; 6, 6' – insulating and ventilation bridges; 7 – downhole support; 8, 9, 10, 11 – transport, conveyor, ventilation no. 1 and ventilation no. 2 lava galleries of along the 4th silvinite layer; 8' – transport drift of spent lava along the 4th silvinite layer; B – maximum span value

ния очистных забоев. В варианте 4 проходка подготовительных выработок для выемки 4-го сильвинитового слоя после его подработки лавой по слоям 2, 2–3, 3 осуществляется с прихватом 0,4 м нижней части 4-го сильвинитового слоя. Остальные выработки как по 4-му сильвинитовому слою, так и по слоям 2, 2–3, 3 проводятся в нижней более устойчивой части пласта с оставлением в кровле 0,3 м 3-го сильвинитового слоя.

Во всех вариантах принят последовательный порядок отработки слоев в пределах выемочного столба или участка шахтного поля, что позволяет исключить в технологических схемах оставление широких внутрипанельных и межстолбовых целиков и перейти на бесцеликовую отработку обоих слоев, при которой существенно сокращаются потери полезного ископаемого и снижается вероятность динамических проявлений горного давления в очистных забоях.

В разработанных вариантах технологических схем слоевой выемки охрана подготовительных выработок шириной 3 м осуществляется четырьмя компенсационными щелями (в кровле, почве и боках), а выработок шириной 3,8–4,0 м – тремя щелями без проведения компенсационной щели в кровле. В варианте 1 конвейерному штреку верхней лавы шириной 3,8 м придается плоская форма кровли и в ней оформляется компенсационная полость.

Кровля подготовительных выработок крепится анкерами первого уровня, и лишь в варианте 1 применяется дополнительное крепление подготовительных выработок верхней лавы анкерами второго уровня повышенной несущей способности.

Технико-экономическое сравнение разработанных вариантов технологических схем. Сравнение представленных вариантов технологических схем осуществляется по следующим показателям: удельный объем горно-подготовительных работ (ГПР); среднее содержание хлорида калия (KCl) и нерастворимого остатка (Н.О.) в руде; объем добычи руды в стандарте; коэффициент извлечения полезного компонента из недр.

Коэффициент извлечения полезного ископаемого (K_i) определялся из выражения (1)

$$K_i = \frac{Q_{\text{доб}}^{\text{ст}}}{Q_{\text{бал}}^{\text{ст}}} \cdot 100, \%, \quad (1)$$

где $Q_{\text{доб}}^{\text{ст}}$ – объем добываемой руды в стандарте из выемочного столба для рассматриваемого варианта; $Q_{\text{бал}}^{\text{ст}}$ – объем балансовых запасов для выемочного столба в рассматриваемом варианте.

Технико-экономические показатели для каждого из вариантов технологических схем представлены в таблице.

Технико-экономические показатели вариантов технологических схем
Technical and economic indicators of technological scheme options

Вариант Variant	Показатели Indicators				
	Удельный объем ГПР, % Specific volume of MPW, %	Качество руды Ore quality		Объем добычи руды в стандарте, тыс. т The volume of ore extraction in the standard, thousand tons	Извлечение KCl из недр, % Extraction of KCl from the depths, %
		Содержание KCl, % KCl content, %	Содержание Н.О., % Insoluble residue content, %		
Вариант 1 Variant 1	8,8	36,8	9,1	7062,6	91,8
Вариант 2 Variant 2	6,9	36,2	9,1	6523,3	84,8
Вариант 3 Variant 3	6,8	36,3	8,7	7490,6	83,5
Вариант 4 Variant 4	8,2	36,6	6,4	7088,6	92,1

Из таблицы видно, что удельный объем горно-подготовительных работ для предлагаемых технологических схем изменяется от 6,8 % (вариант 3) до 8,8 % (вариант 1), что не позволяет выделить лучший из предлагаемых вариантов технологических схем. Наиболее высокое содержание KCl в руде (36,8 %) характерно для варианта 1, а наименьшее (36,2 %) – для варианта 2. По содержанию полезного компонента рассматриваемые варианты практически равнозначны.

Содержание Н.О. в руде для вариантов 1–3 примерно одинаково и изменяется от 8,7 до 9,1 %. Для варианта 4 значение Н.О. минимально и составляет 6,4 %. Из опыта обогащения калийных руд известно, что увеличение содержания в них Н.О. на 1 % влечет за собой помимо роста потребления дорогостоящих реагентов снижение извлечения полезного компонента на 2–3 %, что необходимо обязательно учитывать.

Объем добычи руды в стандарте из выемочного столба для предложенных технологических схем максимален для варианта 3 (7 490,6 тыс. т), на втором и третьем месте соответственно варианты 4 и 1 (7 088,6 и 7 062,6 тыс. т). Минимальный объем добычи – у варианта 2 (6 523,3 тыс. т). При этом максимальный процент извлечения полезного компонента при добывче из выемочных столбов предложенных технологических схем характерен для варианта 4 (92,1 %) и варианта 1 (91,8 %); минимальное извлечение (83,5 %) – для варианта 3.

Таким образом, основным преимуществом вариантов 1 и 4 является высокое извлечение полезного компонента из недр по сравнению с вариантами 2 и 3. В то же время в варианте 1 при отработке 4-го сильвинитового слоя потребуется дополнительное крепление анкерами высокой несущей способности не только сопряжений и камер разворота самоходного транспорта, но и линейных участков конвейерного штрека, а в варианте 4 сильвинитовый слой 4 можно будет отрабатывать не ранее 25–30 лет после его подработки лавой по слоям 2, 2–3, 3.

Существенным недостатком вариантов 2 и 3 является наличие в верхней лаве наклонного участка, усложняющего работу забойного конвейера и снижающего качество руды. Но данный отрицательный элемент технологии перекрывается положительным фактором – возможностью расположения основных подготовительных выработок лавы по 4-му сильвинитовому слою в нижней части пласта, обеспечивая значительное повышение их устойчивости.

Как было отмечено ранее [2], более эффективными являются технологические схемы с последовательным порядком отработки выемочных столбов. В них выемочные штреки проводят отдельно для верхней и нижней лав, что позволяет использовать бесцеликовую отработку смежных выемочных столбов в каждом слое или с оставлением между ними целиков минимальных размеров.

Несмотря на отсутствие опыта отработки Третьего калийного пласта на полную мощность одной лавой с повторным использованием выемочных штреков или с проведением штреков вприсечку к выработанному пространству [1], данное направление также остается перспективным при отработке Старобинского калийного месторождения.

Заключение. В данной работе предложено четыре варианта технологических схем слоевой выемки Третьего калийного пласта с вовлечением в отработку 4-го сильвинитового слоя в северо-восточной части шахтного поля рудника Четвертого рудоуправления Старобинского месторождения с глубиной свыше 900 м.

Анализ представленных данных свидетельствует о незначительных отличиях вариантов технологических схем по всем принятым для сравнения показателям, поэтому отдать явное предпочтение какому-либо из них не представляется возможным. В связи с этим выбор варианта слоевой выемки Третьего калийного пласта с вовлечением с отработку 4-го сильвинитового слоя на глубинах более 900 м будет осуществляться с учетом привязки к горно-геологическим и горнотехническим условиям конкретного участка шахтного поля.

Разработанные технологические схемы с рекомендуемыми способами поддержания подготовительных выработок будут использованы при составлении проектов отработки выемочных столбов слоевыми лавами и войдут в соответствующие нормативные документы при их очередном пересмотре.

Список использованных источников

1. Технологии крепления горных выработок глубоких горизонтов Октябрьского месторождения / С. А. Вохмин, Г. С. Курчин, Е. С. Майоров [и др.] // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 7. – С. 45–52. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-7-45-52>
2. Морозов, И. А. Оценка устойчивости горных выработок в соляных породах Гремячинского месторождения: дис. ... канд. техн. наук: 2.8.6 / Морозов Иван Александрович; Гор. ин-т Урал. отд-ния Рос. акад. наук, фил. Федер. гос. бюджет. учр. науки Перм. федер. исслед. центра Урал. отд-ния Рос. акад. наук. – Пермь, 2022. – 153 л.
3. Прушак, В. Я. Закономерности взаимного влияния горных выработок на глубоких горизонтах Старобинского месторождения калийных солей / В. Я. Прушак // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2015. – № 4. – С. 41–45.
4. Двухшинковый селективный комбайн для отработки сложноструктурных калийных пластов Старобинского месторождения длинными очистными забоями / В. Я. Щерба, В. Я. Прушак, Б. И. Петровский [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – 2005. – № 6. – С. 202–206.

5. Технология слоевой выемки при разработке пласта Третьего калийного горизонта Старобинского месторождения / И. А. Подлесный, В. Н. Гетманов, Б. И. Петровский, И. Е. Носуля // Горный журнал. – 2018. – № 8. – С. 59–63. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.08.08>
6. Петровский, Б. И. Прогноз опасных обрушений кровли при слоевой отработке пласта Третьего калийного горизонта / Б. И. Петровский, А. А. Гарнишевский, О. М. Чечуха // Горный журнал. – 2018. – № 8. – С. 76–81. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.08.11>
7. Прушак, В. Я. Особенности проявления горного давления в лавах с труднообрушаемой кровлей при бесцеликовой выемке Третьего калийного пласта Старобинского месторождения / В. Я. Прушак // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2016. – № 1. – С. 99–105.
8. Прушак, В. Я. Деформация контура горных выработок Старобинского месторождения калийных солей при различных глубинах заложения / В. Я. Прушак // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2016. – Т. 60, № 2. – С. 97–101.
9. Тараканов, В. А. Поддержание горных выработок при разработке Старобинского месторождения на больших глубинах / В. А. Тараканов, И. И. Головатый, А. Л. Поляков // Горный журнал. – 2010. – № 8. – С. 36–38.
10. Патиюк, С. И. Поддержание капитальных и подготовительных выработок на глубоких горизонтах при отработке Старобинского месторождения / С. И. Патиюк, Ю. Б. Петровский, В. Я. Прушак // Горный журнал. – 2018. – № 8. – С. 70–75. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.08.10>
11. Сокол, Д. Г. Направления совершенствования бесцеликовых технологических схем отработки калийных пластов / Д. Г. Сокол // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 4. – С. 93–98. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2018-4-93-98>
12. Зубов, В. П. Совершенствования систем разработки Третьего калийного пласта на рудниках ПО «Беларуськалий» / В. П. Зубов, А. Д. Смычник, В. М. Кириенко // Записки Горного института. – 2006. – Т. 168, вып. 3. – С. 15–18.
13. Петровский, А. Б. Особенности проявлений горного давления при слоевой бесцеликовой выемке Третьего калийного пласта на Старобинском месторождении калийных солей / А. Б. Петровский, В. Я. Прушак, Е. А. Лутович // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 3. – С. 350–360. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-3-350-360>
14. Петровский, А. Б. Физико-механические свойства пород, слагающих и перекрывающих Третий калийный пласт Старобинского месторождения / А. Б. Петровский, В. Я. Прушак, Е. А. Лутович // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 4. – С. 484–495. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-4-484-494>

References

1. Vokhmin S. A., Kurchin G. S., Maiorov E. S., Kirsanov A. K., Kostylev S. S. An overview of deep horizons excavation lining technologies at Oktyabrsky deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2019, no. 7, pp. 45–52 (in Russian). <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-7-45-52>
2. Morozov I. A. *Evaluation of the Stability of Mine Workings in Salt Rocks of the Gremyachinskoye Deposit* [dissertation]. Permian, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2022. 153 p. (in Russian).
3. Prushak V. Ya. Patterns of mutual influence of mine workings at deep horizons of the Starobin potash salt deposit. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tehnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2015, no. 4, pp. 41–45 (in Russian).
4. Shcherba V. Ya., Prushak V. Ya., Petrovskiy B. I., Kalinichenko P. I., Kirienko V. M., Pleskunov V. N. Twin-screw selective combine for mining complex-structured potash seams of the Starobinskoye deposit using longwall faces. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Bulletin of Polotsk State University. Series B], 2005, no. 6, pp. 202–206 (in Russian).
5. Podlesnyi I. A., Getmanov V. N., Petrovskiy B. I., Nosulya I. E. Multi-slice mining technology for potash seam III at the Starobinsk deposit. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2018, no. 8, pp. 59–63 (in Russian). <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.08.08>
6. Petrovskiy B. I., Garnishevskiy A. A., Chechuha O. M. Prediction of hazardous roof falls in slice mining of potash seam III. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2018, no. 8, pp. 76–81 (in Russian). <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.08.11>
7. Prushak V. Ya. Peculiarities of manifestation of rock pressure in longwalls with difficult-to-collapse roof during non-core mining of the Third potash seam of the Starobin deposit. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tehnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 1, pp. 99–105 (in Russian).
8. Prushak V. Ya. Deformation of the edge of the workings of the Starobin deposit of potash salts at different location depths. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2016, vol. 60, no. 2, pp. 97–101 (in Russian).
9. Tarakanov V. A., Golovatyj I. I., Polyakov A. L. Maintenance of mine workings during the development of the Starobinskoye deposit at great depths. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2010, no. 8, pp. 36–38 (in Russian).
10. Patiuk S. I., Petrovskij Yu. B., Prushak V. Ya. Maintenance of capital and development workings at deep levels during the development of the Starobinskoye deposit. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2018, no. 8, pp. 70–75 (in Russian). <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.08.10>

11. Sokol D. G. Principal directions of the development of mining methods potash seams. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Vestnik of Kuzbass State Technical University*, 2018, no. 4, pp. 93–98 (in Russian). <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2018-4-93-98>
12. Zubov V. P., Smychnik A. D., Kirienko V. M. Improving the development systems of the Third Potash Seam at the mines of Belaruskali. *Zapiski Gornogo instituta* = *Journal of Mining Institute*, 2006, vol. 168, iss. 3, pp. 15–18 (in Russian).
13. Petrovsky A. B., Prushak V. Ya., Lutovich E. A. Features of rock pressure manifestations whith the slice pillarless extraction of the Third potash layer at the Starobin potash salt deposit. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* = *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 3, pp. 350–360 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-3-350-360>
14. Petrovskiy A. B., Prushak V. Ya., Lutovich E. A. Physical and mechanical properties of the rocks of the Starobinsky deposit forming the Third potash layer and its roof. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* = *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 4, pp. 484–494 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-4-484-494>

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

https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-320-335
УДК 536.24



Обзор

А. А. Гаспорович*, М. А. Кузьмич

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь*

**АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
И СОЗДАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ТЕРМОСИФОНОВ ДЛЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ**

Аннотация. Выполнен краткий анализ актуальных разработок, исследований и применения двухфазных термосифонов в технике. Наиболее актуальным в данный момент является поиск перспективы применения термосифонов для охлаждения электроники (силовой и микроэлектроники). При этом рассмотрены и другие возможности использования данного теплообменного элемента: стабилизация температуры почвы, консервация вечной мерзлоты, охлаждение теплонагруженного оборудования, в составе систем кондиционирования теплообменников, а также в атомной промышленности. Особое внимание удалено выбору рабочей жидкости и поиску оптимального коэффициента наполнения устройства, способам интенсификации теплообмена и влиянию конструкции термосифона на его производительность.

Ключевые слова: системы охлаждения, термосифон, теплообмен, испаритель, рабочая жидкость

Благодарности: исследования выполнены при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т23РНФ-227).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Гаспорович Алёна Александровна – научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, e-mail: a.gasporovich@hmti.ac.by; Кузьмич Максим Александрович – научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, e-mail: KuzmichMA@hmti.ac.by

Вклад авторов: Гаспорович Алёна Александровна – сбор литературных данных написание текста рукописи; Кузьмич Максим Александрович – сбор, анализ и обобщение литературных данных.

Для цитирования: Гаспорович, А. А. Анализ технологий проектирования и создания двухфазных термосифонов для систем охлаждения / А. А. Гаспорович, М. А. Кузьмич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 4. – С. 320–335. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-320-335

Поступила в редакцию: 22.04.2025

Доработанный вариант: 29.05.2025

Утверждена к публикации: 03.12.2025

Подписана в печать: 19.12.2025

Review

Aliona A. Gasporovich*, Maxim A. Kuzmich

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

**ANALYSIS OF TWO-PHASE THERMOSYPHON DESIGN AND CREATION TECHNOLOGIES
FOR COOLING SYSTEM APPLICATIONS**

Abstract. A brief analysis of current developments, research, and applications of two-phase thermosyphons in engineering is provided. The most relevant application of thermosyphons today is electronic cooling. (power and microelectronics). Other possibilities for using this heat exchange element were also considered: soil temperature stabilization, permafrost preservation, cooling of heat-loaded equipment, heat exchanger for air conditioning systems, nuclear industry. Working fluid

selection, optimal filling factor of the device, heat transfer intensifying methods, and the thermosyphon design influence on its performance were examined in detail.

Keywords: cooling systems, thermosyphon, heat transfer, evaporator, working fluid

Acknowledgements: the research was carried out with the support of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (grant no. T23РНФ-227).

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

Information about authors: *Aliona A. Gasporovich* – Researcher at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: a.gasporovich@hmti.ac.by; *Maxim A. Kuzmich* – Researcher at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: KuzmichMA@hmti.ac.by

Contribution of the authors: *Aliona A. Gasporovich* – collection of literary data writing of the manuscript text; *Maxim A. Kuzmich* – collection, analysis and generalization of literary data.

For citation: Gasporovich A. A., Kuzmich M. A. Analysis of two-phase thermosyphon design and creation technologies for cooling system applications. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tehnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 4, pp. 320–335 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-320-335>

Received: 22.04.2025

Modified: 29.05.2025

Approved for publication: 03.12.2025

Signed to the press: 19.12.2025

Введение. Применение двухфазных термосифонов и тепловых труб в современных системах охлаждения позволяет обеспечить быстрый и эффективный отвод тепла и передачу его в зону теплосъема. Двухфазные термосифоны широко используются для систем охлаждения теплонагруженных объектов благодаря способности передавать высокие тепловые потоки на протяженные дистанции без механической прокачки, большому сроку службы, низкой стоимости. Различные типы термосифонов широко используются в промышленности, например, для охлаждения электронных устройств [1–4], солнечных энергетических систем [5; 6] и систем рекуперации тепла [7; 8].

Одним из предпочтительных решений при разработке систем охлаждения электронных компонентов является использование двухфазных контурных термосифонов [9; 10]. В них реализуется принцип пространственного разделения потоков пара и возвращающейся в зону нагрева жидкости, что позволяет значительно уменьшить термическое сопротивление таких устройств. Термосифоны этого типа применяются в системах охлаждения наравне с контурными и пульсационными тепловыми трубами, классическими термосифонами и паровыми камерами.

Двухфазные контурные термосифоны успешно используются для охлаждения элементов силовой электроники. Данные по их работоспособности при различной геометрии и расположении в пространстве представляют практический и научный интерес для разработчиков новых устройств такого типа [11].

В [12] показано, что в стационарном режиме работы эффективность термосифона определяется мощностью источника тепла, площадью конденсатора, температурным напором между рабочим веществом термосифона и охлаждающей жидкостью, теплофизическими свойствами охлаждающей жидкости. Предложенная автором математическая модель позволяет прогнозировать реакцию термосифона, работающего в стационарном режиме, на кратковременное увеличение мощности источника тепла. Правильно спроектированный термосифон должен учитывать соотношение площадей поверхности конденсатора и испарителя, а выбор рабочей жидкости произведен с учетом скрытой теплоты парообразования, теплоемкости, теплопроводности, кинематической вязкости и т. д. Согласно проведенным численным расчетам устройство устойчиво работает в стационарном режиме и менее чем за 2 с возвращается в исходное состояние даже после больших возмущений. Кратковременное повышение тепловой нагрузки на испаритель на 10 % приводит к таким же кратковременным увеличению толщины пленки жидкой фазы на стенке конденсатора за счет возросшего массового расхода рабочей жидкости от испарителя к конденсатору и росту температуры пленки. После возвращения источника нагрева в стационарный режим толщина пленки менее чем за 2 с уменьшается за счет гравитационного гидродинамического стекания, при этом снижается и ее температура. Это важное качество термосифона, благодаря которому обеспечиваются надежные тепловые условия работы охлаждаемых объектов, чувствительных к перегревам.

Термосифоны применяются для охлаждения устройств с очень широким диапазоном сбрасываемых мощностей. Например, в [13] предложен контурный термосифон, спроектированный в контексте теплового управления большим преобразователем мощности среднего напряжения общей мощностью 5 МВт, что соответствует тепловой нагрузке 2,4 кВт на единицу площади охлаждаемой поверхности.

Двухфазные термосифоны для охлаждения электроники. В настоящее время востребованным является охлаждение миниатюрных электронных устройств, а также повышение их интеграции и мощности. Такие устройства могут выделять значительный объем тепловой энергии при высоких плотностях теплового потока [14; 15]. Способ эффективного рассеивания тепла в ограниченном пространстве имеет решающее значение для развития электронных устройств [16].

Растущий спрос на миниатюрные электронные устройства с высокой плотностью сбрасываемых тепловых потоков привел к необходимости создания более эффективных систем охлаждения, способных отводить такие потоки от зоны нагрева. В то время как традиционные методы однофазного охлаждения достигли своих пределов и не достаточны для удовлетворения растущих потребностей в охлаждении электронных устройств, современные двухфазные системы с процессом фазового перехода используют скрытое тепло во время испарения. Это позволяет эффективно рассеивать значительное количество тепла, сохраняя при этом относительно низкую температуру поверхности устройства. Тепловые трубы и термосифоны, использующие процесс фазового перехода, широко применяются в электронных устройствах в качестве распределителей тепла и представляют собой наиболее исследованные устройства для охлаждения электронных изделий.

По мере уменьшения размеров этих устройств растут и запросы на более компактные и эффективные теплоотводящие устройства. Длительное воздействие высоких температур на электронные устройства может привести к снижению производительности и возможному выходу их из строя, поэтому требуется поддерживать не только заданную температуру, но и изотермичность зоны нагрева, не допуская локальных перегревов. Например, современные процессоры имеют возможность сохранять работоспособность при температурах до 100–110 °C, но для продления их срока службы и меньшего износа рекомендуется поддерживать рабочую температуру в пределах 85–90 °C. Поскольку размеры электронных устройств с каждым годом уменьшаются и их мощность возрастает, эффективное рассеивание выделяемого ими тепла становится все более сложной задачей [17], что увеличивает потребность в инновационных решениях для охлаждения электронных устройств. Современные электронные платы содержат множество высокопроизводительных компонентов, таких как центральные процессоры (ЦП), графические процессоры (ГП) и модули памяти, которые во время работы выделяют значительное количество тепла. Эффективное рассеивание тепла имеет решающее значение не только для поддержания оптимальной работы этих компонентов, но также для предотвращения сбоев, связанных с перегревом, и продления срока службы электронных устройств [18].

Базовый принцип работы подобных устройств прост: тепловые трубы или термосифоны, которые зачастую используются в связках по несколько штук, забирают тепло от охлаждающей пластины, имеющей контактную площадку с тепловыделяющим устройством (ЦП/ГП), и переносят его к ребрам радиатора. Тепловыделение современных процессоров составляет 100–250 Вт, графических процессоров (видеокарты) – до 450 Вт, при этом контактная площадка довольно мала (для процессоров – 15–25 см²) и плотности потоков достигают десятков ватт на квадратный сантиметр. Рассеивание тепла происходит, как правило, с использованием воздушного охлаждения (вентилятора). Термосифоны могут отводить тепловую энергию на сравнительно большое расстояние, но не применимы, например, в мобильных электронных устройствах типа смартфонов, где используются тепловые трубы или паровые камеры. Термосифоны позволяют проявлять большую гибкость при проектировании конструкции испарителя и формы конденсатора.

За последние несколько десятилетий было проведено множество исследований тепловых характеристик термосифонов. Так, экспериментально изучены особенности фазового перехода при теплопередаче и работоспособность двухфазного термосифона с различными рабочими телами и рифленой поверхностью испарения [19]. Было обнаружено, что вода как рабочая жидкость превосходит этанол с точки зрения эффективности рассеивания тепла, а рифленая поверхность испарителя улучшает общую скорость теплопередачи. В более поздней работе [20] исследо-

дователи представили осесимметричную двумерную модель тепломассообмена для плоского двухфазного термосифона в форме диска.

Влияние рабочей жидкости и степени заполнения на работу термосифонов. Существует множество факторов, влияющих на эффективность теплопередачи термосифона, в частности коэффициент наполнения, тепловая нагрузка, перепад высот между конденсатором и испарителем, тип рабочей жидкости и конструкция испарителя и конденсатора. Коэффициент наполнения является одним из наиболее важных факторов, влияющих на эффективность теплопередачи. Слишком высокий или слишком низкий коэффициент наполнения ухудшает эффективность теплопередачи. В целом значение или диапазон коэффициентов наполнения, при которых достигается наилучшая эффективность теплопередачи, определяется как оптимальный коэффициент наполнения [21; 22].

Выбор рабочей жидкости играет значительную роль в работе термосифонов, так как напрямую влияет на характеристики теплопередачи и эффективность системы. Различные рабочие жидкости имеют разные теплофизические свойства, такие как плотность, удельная теплоемкость, вязкость и поверхностное натяжение, что обуславливает тепловое поведение системы. Некоторые жидкости могут иметь высокий коэффициент теплопередачи, но при этом не подходить по температуре кипения или вязкости, которые могут повлиять на запуск и циркуляцию в термосифоне. Следовательно, выбор рабочей жидкости имеет важное значение для достижения оптимальных тепловых характеристик и соответствия желаемым условиям применения.

Влияние рабочей жидкости на характеристики термосифона было экспериментально и численно изучено во многих исследованиях с целью определения наиболее подходящей жидкости для конкретного случая. Так, в [17] описана сложная динамика теплопередачи и фазовых изменений внутри термосифона плоской формы; изучается влияние различных рабочих жидкостей, коэффициентов наполнения и характеристик подводимых тепловых потоков на тепловые характеристики системы; проведено моделирование явлений фазового перехода в осесимметричной модели термосифонов дискообразной формы. В данной работе предлагается использовать в термосифонах плоской формы самосмачивающиеся наножидкости, которые улучшают тепловые характеристики и предотвращают пересыхание за счет снижения температуры горячей точки (на 16 °C ниже по сравнению с водой). Результаты исследования показали, что самосмачивающиеся наножидкости имеют улучшенные возможности теплопередачи и сниженный риск высыхания в сравнении с традиционными рабочими жидкостями. Примечательно, что самосмачивающиеся жидкости и самосмачивающиеся наножидкости изменяют поверхностное натяжение при повышении температуры, что эффективно предотвращает высыхание, притягивая жидкость к горячим областям. Кроме того, повышенная теплопроводность наножидкостей во время кипения дополнительно повышает их эффективность.

Авторы [23] исследовали рабочие характеристики двухфазного кольцевого термосифона в сосуде высокого давления для моделирования рабочего состояния термосифона в системе охлаждения с пассивной защитной оболочкой (рис. 1). В качестве рабочей жидкости использовалась вода (коэффициент заполнения 40–65 %), конденсатор был помещен в кипящий водяной бак при температуре 100 °C, а испаритель – в сосуд высокого давления, экспериментальный диапазон давления в котором составлял 0,32–0,46 МПа. При давлении в сосуде ниже 0,36 МПа наименьшее термическое сопротивление достигалось при более низких коэффициентах заполнения. По мере увеличения давления в сосуде более высокие коэффициенты заполнения приводят к лучшей теплопередаче. Однако чем выше коэффициент заполнения, тем выше давление, необходимое для циркуляции, и тем больше потеря давления по пути циркуляции. Поэтому при дальнейшем увеличении давления теплопередача перестает улучшаться, а при еще большем увеличении давления даже ухудшается. Показано, что по мере возрастания давления в сосуде и коэффициента заполнения увеличивается секция переохлаждения и уменьшается секция перегрева в испарителе. Поведение теплопередачи в трубке основано на конвективной теплопередаче и теплопередаче пузырькового кипения при низком тепловом потоке.

В [24] представлена гидродинамическая модель для изучения изменения температуры в закрытых кольцевых термосифонах с различными уровнями заправки рабочей жидкости – от 40 до 80 % от объема термосифона. Авторами рассчитан перепад давления, приведенная скорость, коэффи-

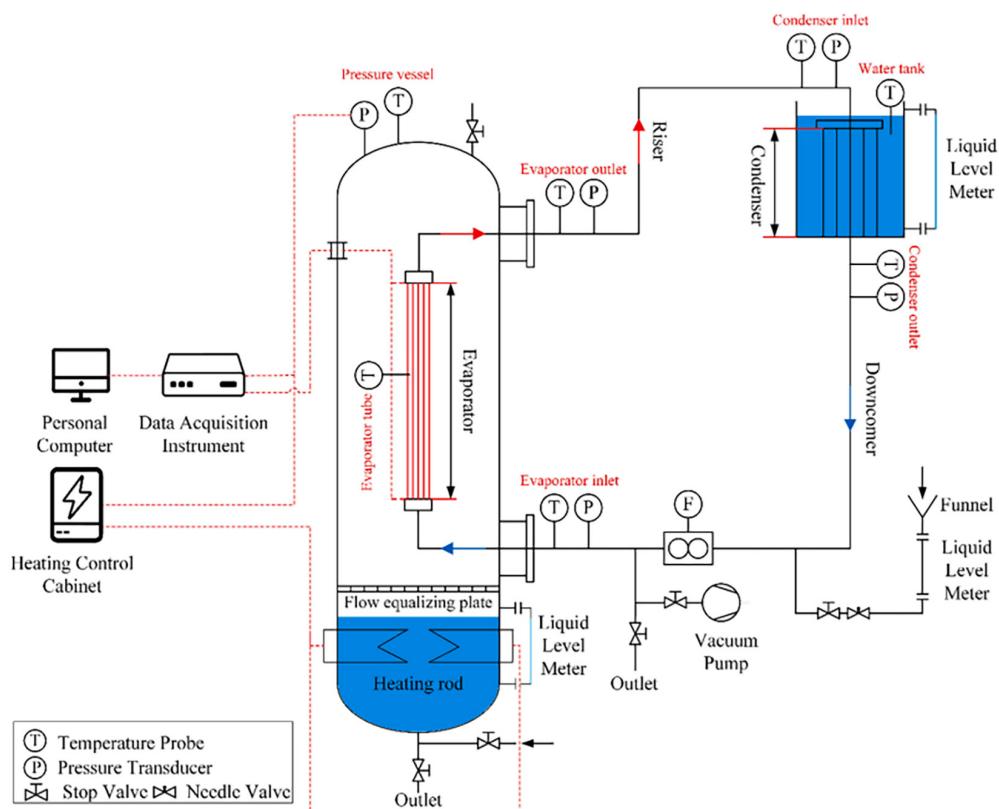


Рис. 1. Схема экспериментальной установки [23]

Fig. 1. Scheme of the experimental setup [23]

циент теплопередачи и теплопередача при различных условиях наполнения. Установлено, что коэффициент заполнения рабочей жидкостью напрямую влияет и на давление в системе, поскольку чем меньше жидкости в контуре, тем быстрее она испаряется и происходит возрастание давления. При этом высокая степень заполнения термосифона негативно влияет на его коэффициент теплоотдачи, а также на скорость пара и жидкости.

Сравнительно низкие характеристики теплопередачи традиционных жидкостей, используемых для регулирования или контроля рабочей температуры в обычных радиаторах, двигателях и других промышленных устройствах, обусловили необходимость поиска новых смесей или растворов жидкостей с улучшенными теплофизическими свойствами. Среди этих новых изучаемых классов есть наножидкости – смесь традиционных жидкостей, к которым добавлены наночастицы различных типов и концентраций. Возможность контролировать или проектировать различные теплофизические свойства таких жидкостей как по отдельности, так и в совокупности, может дать возможность значительно повысить общую производительность системы. Особый интерес представляет возможность добавления в жидкости наночастиц материалов с высокой теплопроводностью для улучшения общей теплопроводности теплоносителей. Этими наночастицами могут быть металлы, оксиды металлов, углеродные нанотрубки или графен, а базовыми жидкостями часто являются вода, этиленгликоль (ЭГ), полиальфаолефин (ПАО) или другие жидкости.

В [25] кратко рассматриваются различные способы применения наножидкостей. Основное внимание уделяется различным параметрам, которые, существенно влияют на термическое поведение в целом и на теплопроводность этих наножидкостей в частности, включая такие параметры, как размер и форма частиц, pH жидкости, поверхностно-активное вещество, тип растворителя, водородные связи, температура, базовые жидкости и выравнивание используемых наночастиц (углеродные нанотрубки, графен и наночастицы оксидов металлов). Было обнаружено, что указанные параметры оказывают влияние на теплопроводность наножидкостей и могут как увеличивать ее, так и уменьшать.

Авторы [26] исследовали кольцевой термосифон, представляющий собой алюминиевую пластину с наножидкостью. В качестве рабочих жидкостей испытывались диэлектрическая жидкость на основе гидрофторэфиров HFE-7000 и графеновая наножидкость, коэффициент заполнения (30, 50 и 70 %) и концентрация графена (0,3, 0,5 и 1 мас.%) варьировались. Авторы определяли влияние однородного и неоднородного источника тепла на тепловое сопротивление, а также проводили визуализацию для понимания процесса кипения. Было установлено, что при подаваемой мощности 90 Вт и коэффициенте заполнения 70 % тепловое сопротивление снижается примерно на 4 % по сравнению с коэффициентом заполнения 30 % для той же подаваемой мощности 90 Вт. Термическое сопротивление снижается на 4 % при увеличении концентрации графена в наножидкости от 0 до 0,5 мас.%. Равномерный источник тепла имеет лучшую производительность теплопередачи, чем неоднородный. Из эксперимента по визуализации заметное количество графена было унесено из испарителя в конденсатор в процессе кипения, особенно при более высокой концентрации 1 %, что вызвало закупорку канала и повышение теплового сопротивления, поэтому концентрация графена должна поддерживаться ниже 0,5 %.

Исследование характеристик теплопередачи контурного и традиционных термосифонов с использованием наножидкости Fe_xO_y /вода и Cu_xO_y /вода в качестве теплоносителей описано в [27]. Авторы разработали методику получения наножидкостей с использованием нанопорошков, полученных лазерным распылением мишени. Экспериментальные исследования указывают, что наножидкости являются перспективными в качестве теплоносителя в двухфазных системах, эффективно повышая коэффициент теплопередачи до 25–50 %. Массовая концентрация наночастиц увеличивает коэффициент теплопередачи и, следовательно, снижает тепловое сопротивление кольцевого термосифона по сравнению с чистой водой. Также в работе показано, что наножидкости являются перспективными в качестве рабочей жидкости в двухфазных системах, эффективно повышая коэффициент теплопередачи до 20–25 %. Кроме того, величина критического теплового потока значительно возросла (на 30 %) по сравнению с чистой водой, что свидетельствует об эффективности использования наножидкостей в традиционных термосифонах.

Интенсификация теплообмена в термосифонах. Разработка новых конструкций термосифонов происходит одновременно с ростом спроса на эффективные пассивные и экологичные устройства рассеивания тепла. Секция испарителя является ключевой в теплообмене такого типа устройств. Среди различных методов изменения конструкции испарителя наиболее простым и эффективным является модификация внутренней поверхности стенок испарителя. В [28] выполнен анализ эффективности теплопередачи двухфазного контурного термосифона с внутренней стенкой испарителя, усиленной нанопористыми и микропористыми структурами. Были обнаружены три режима течения: пузырьковый поток с пузырьковым кипением, турбулентный поток пар-жидкость с обратным потоком и разделенный поток пар-жидкость при высоких тепловых потоках. В ходе исследований зафиксированы два основных типа нестабильности, вызванных неэффективной теплопередачей при кипении и испарении: 1) при малых тепловых потоках, где присутствовал обратный поток; 2) при высоких тепловых потоках, когда подавлялся режим пузырькового кипения и периодически образовывались локальные пересыхания. Добавление на внутренние стенки испарителя нано- и микроструктурированных поверхностей препятствовало возникновению колебаний, вызывающих нестабильность потока, во всем диапазоне и увеличило коэффициент теплопередачи в связи с более высокой плотностью зарождения и частоты отрыва пузырьков.

Чтобы решить проблему теплопередачи с высоким тепловым потоком, авторы работы [29] также сосредоточились на модификации испарителя, отметив при этом, что нельзя игнорировать влияние конденсатора на всю систему. Авторами разработан контурный термосифон с воздушным охлаждением и конденсатором, состоящим из змеевидной медной трубы и гофрированных алюминиевых ребер. Эксперимент подтвердил, что конденсатор такой конструкции обладает превосходными характеристиками и его можно использовать совместно с контурным термосифоном для реализации теплового потока $266,7 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$. Применение змеевидного трубчатого испарителя приводит к двум видам нестабильности потока, а степень заполнения является ключевым фактором, влияющим на присутствие нестабильности потока. По наблюдениям авторов, оптимальным выбором является высокая степень наполнения, которая позволяет избежать нестабильности потока.

бильности потока и инициализирует более быстрый переходный процесс. При этом температура воздуха мало влияет на термическое сопротивление и максимальную разность температур контурного термосифона, поэтому данный термосифон можно использовать в различных погодных условиях. Однако экстремальные погодные условия (например, чрезвычайно высокая/низкая температура) могут повлиять на работу контурного термосифона. Такой контурный термосифон со змеевидным ребристым трубчатым конденсатором с оптимизированным высоким коэффициентом заполнения может использоваться в мощном электронном оборудовании с реализацией наружного отвода тепла.

Применение термосифонов в различных областях. Термосифоны используются во многих областях техники, включая, помимо прочего, космические системы, автомобильную промышленность, железнодорожную отрасль, охлаждение электрооборудования, электроники и лопаток турбин, теплообменники, системы контроля влажности в пищевой промышленности, фармокологии, солнечные энергетические системы и атомная промышленность.

Широкое распространение получили двухфазные термосифоны, использующиеся для стабилизации температур (сохранения почвы в замороженном состоянии) в регионах вечной мерзлоты [30]. Эти термосифоны, как правило, с одним закопанным в землю концом, а вторым – выведенным на поверхность и обдуваемым воздухом, работающие за счет подбора подходящих рабочих жидкостей с низкой температурой кипения. Они широко используются в условиях холодного климата для поддержания температуры автодорог, железных дорог, нефтепроводов в Америке, России и Китае. Наиболее приметным является Транс-Аляскинский трубопровод с примерно 120 тыс. установленных термосифонов, которые обеспечивают низкую температуру почвы под ним.

Рассматривается применение термосифонов даже в более нетрадиционных целях, таких как сохранение археологических памятников в Арктике или получение низкотемпературной энергии из отходов. В холодном климате термосифоны используются для консервации вечной мерзлоты и борьбы с обледенением дорог. Термосифоны успешно использовались для предотвращения миграции загрязняющих веществ из хвостохранилищ в Канаде и России.

В [31] приводится обзор российского опыта по термостабилизации грунта с помощью термосифонов. В частности, рассматриваются возможности размещения испарителя термосифона в корпусе сваи, а также решения для термостабилизации грунтов под сооружениями большой площади или под группами зданий.

С помощью добавления в конструкцию ветряной мельницы термосифон был использован для сохранения земляного полотна в зоне вечной мерзлоты [32]. Такое устройство (рис. 2) может применяться для пассивного охлаждения, а также может быть адаптировано для охлаждения насыпей, оснований взлетно-посадочных полос, трубчатых фундаментов и других сооружений. Результаты испытаний показали, что оно способно эффективно охлаждать земляное

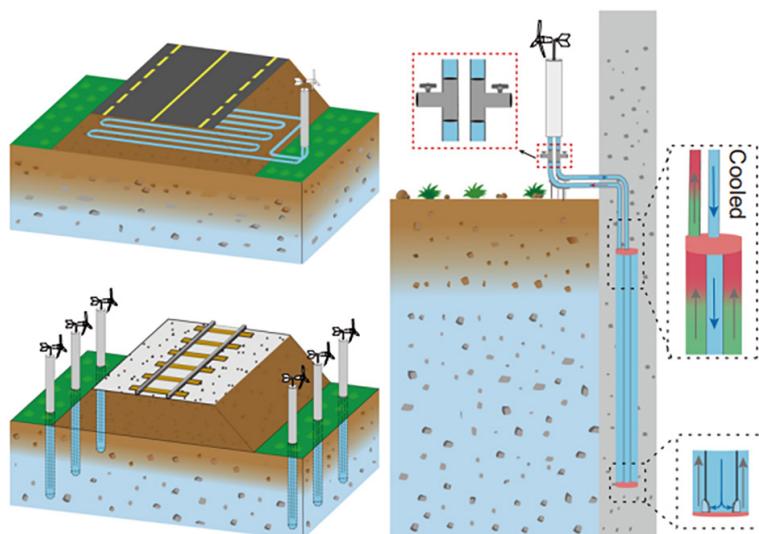


Рис. 2. Конструкция рабочего устройства и возможности его применения.

Длина подземной части в исследуемой работе составляла 8 м [32]

Fig. 2. The working device and its application possibilities.

The length of the underground part in the work under study was 8 m [32]

полотно в зоне вечной мерзлоты на глубине до 8,0 м и радиусом 1,5 м на 0,6–1,0 °C при средней мощности 68,03 Вт.

Обеспечение допустимого температурного режима теплонагруженного и энергонасыщенного оборудования стало основной целью работы [33]. Были рассмотрены теплофизические аспекты и эффективность системы в энергетическом теплонагруженном оборудовании термосифонов. Разработанный вспомогательный цилиндрический термосифон (рис. 3) в составе саморегулирующейся системы охлаждения способен отвести тепловой поток в диапазоне 0,18–2,60 кВт/м² в режиме с интенсивным испарением теплоносителя (без кипения) на его нижней крышке и воздушным охлаждением конденсатора за счет естественной конвекции.

Были исследованы различные рабочие жидкости и уровни заполнения (этанол показал лучшие результаты, чем дистиллированная вода), а также влияние теплоизоляции на эффективность зоны конденсации (теплоотдача ухудшилась, что заметно повлияло на характеристики устройства). Такие системы могут быть использованы на практике в качестве саморегулирующихся теплообменников, обеспечивающих допустимый температурный режим для теплонагруженного оборудования с умеренными тепловыми потоками.

В [34] приводится моделирование схемы отвода остаточных тепловыделений отработавших топливных сборок в шахте-хранилище с использованием термосифонов. Испаритель рассматриваемой термосифонной системы погружен в воду шахты-хранилища, а конденсатор выведен за пределы здания для теплового контакта с атмосферным воздухом. Была исследована эффективность теплоотвода с использованием различных геометрических форм вытяжных труб (рис. 4), а также зависимость теплоотвода от температуры окружающего воздуха. Из рассмотренных наиболее эффективной оказалась эллиптическая форма вытяжной трубы с расположением трубок конденсатора в нижней части (рис. 4, g).

Для охлаждения бассейна с отработанным ядерным топливом с температурой 45–80 °C в [35] авторами было предложено использовать двухфазный термосифон длиной 3 м (рис. 5). В ходе работ были определены: нижний предел с частичным пересыханием – 20 % заправки рабочей жидкостью, предел кипения – 75 % (когда кипение не возникает вследствие недостаточного нагрева для такого объема жидкости) и предел затопления – 100 %. При этом наивысшая эффективность охлаждения достигается с уровнем заполнения 30 %, что справедливо для всех рас-

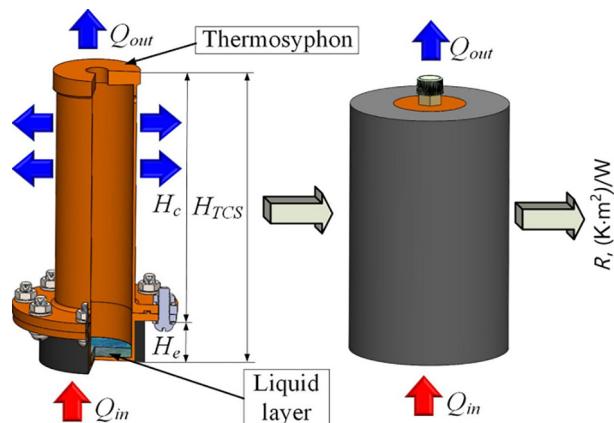


Рис. 3. Общий вид изучаемого устройства с и без теплоизоляции [33]

Fig. 3. General view of the studied device with and without thermal insulation [33]

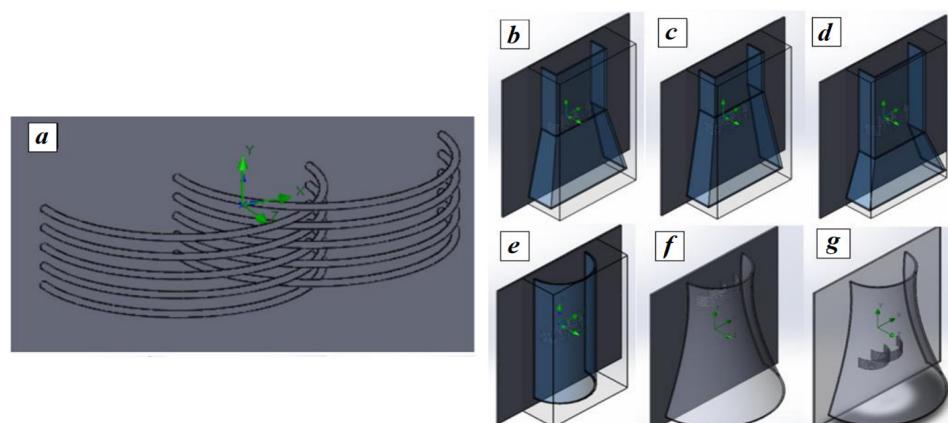


Рис 4. Конденсационная часть термосифона (a) и варианты геометрических форм вытяжной трубы (b–g) [34]

Fig. 4. Condensation part of the thermosyphon (a) and variants of geometric shapes of the exhaust pipe (b–g) [34]

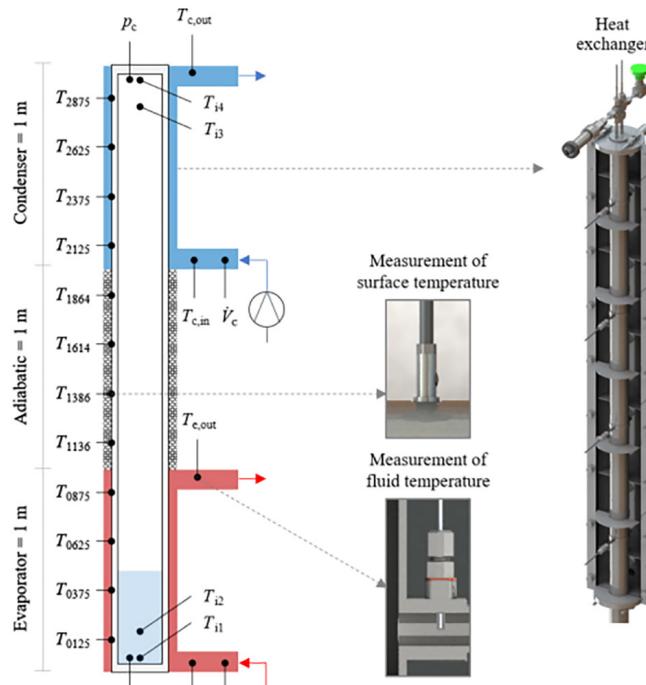


Рис. 5. Двухфазный термосифон для охлаждения бассейна с отработанным ядерным топливом [35]

Fig. 5. Two-phase thermosyphon for cooling a pool with spent nuclear fuel [35]

В [37] авторы предложили новый пластинчатый термосифон для охлаждения элементов телекоммуникационной системы. Были исследованы тепловые характеристики как свободного, так и принудительного конвективного охлаждения в вертикальном и горизонтальном направлениях. Экспериментальные результаты показали более низкое тепловое сопротивление при более

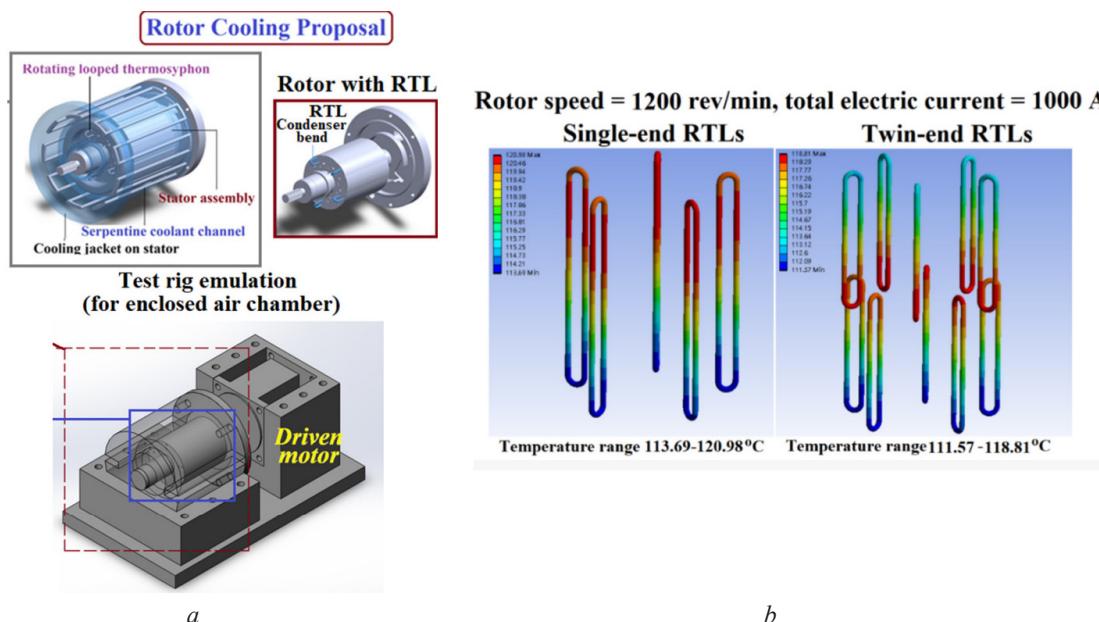


Рис. 6. Статор и ротор охлаждаемого электромотора и предлагаемый принцип охлаждения с помощью кольцевых термосифонов (а); одно- и двухконцевые термосифоны (пространственно расположенные в роторе)

и градиенты температур на них при скорости ротора 1200 об/мин и силе тока 1000 А (б) [36]

Fig. 6. Stator and rotor of a cooled electric motor and the proposed cooling principle using ring thermosyphons (a); Single- and double-ended thermosyphons (spatially located in the rotor) and temperature gradients on them at a rotor speed of 1200 rpm and a current of 1000 A (b) [36]

смотренных температур охлаждаемой жидкости.

Активное развитие и производство электромобилей – одна из наиболее актуальных на сегодняшний день тем. Для увеличения мощности электромотора необходимо прежде всего решить проблему его охлаждения. В [36] предложено использование вращающихся кольцевых термосифонов в роторе синхронного электродвигателя на постоянных магнитах. Приводится численное моделирование одно- и двухконцевых термосифонов (рис. 6). Такие термосифоны позволяют значительно уменьшить осевые градиенты температур и снизить общий температурный уровень в целом по сравнению с ротором без термосифонов. При частотах вращения ротора и электрических токах в диапазонах 1200–1500 об/мин и 1000–1200 А максимальные температуры в роторе с одно- и двухконцевыми вращающимися кольцевыми термосифонами соответственно снижаются на 8–14 °C и 10–22 °C относительно ротора без термосифонов.

высоких коэффициентах наполнения и высоких тепловых потоках. Авторы также пришли к выводу, что благоприятная гравитационная ориентация увеличила интенсивность циркуляции жидкости в испытательном вертикальном пластинчатом термосифоне, что привело к лучшим по сравнению с горизонтальной ориентацией тепловым характеристикам. Также сделан вывод, что для охлаждения телекоммуникационного узла наиболее оптимальным является вертикальный термосифон.

В [38] описаны эксперименты с плоским термосифоном в вертикальной ориентации для управления температурой авионики (электронного оборудования на борту самолета). Авторами было предложено решение для повышения эффективности отвода тепла от электронных корпусов в авиационной промышленности (рис. 7). В качестве термически активной стенки шасси был спроектирован и изготовлен плоский термосифон, состоящий из девяти пластин из нержавеющей стали, сложенных друг на друга и соединенных диффузионной сваркой. Он был изготовлен и испытан при пяти различных условиях нагрева (меняя размер и положение нагревателя) и четырех коэффициентах заполнения, а также пустой (без рабочей жидкости) для сравнения. Тепловое сопротивление варьировалось от 0,047 до 0,327 °C/Вт для испытаний с оптимальным коэффициентом заполнения. Увеличение входной мощности улучшило тепловые характеристики плоского термосифона, тогда как уменьшение размера нагревателя отрицательно на них повлияло. Термическое сопротивление нового термосифона оказалось конкурентоспособным по сравнению с другими плоскими тепловыми трубками, приведенными авторами.

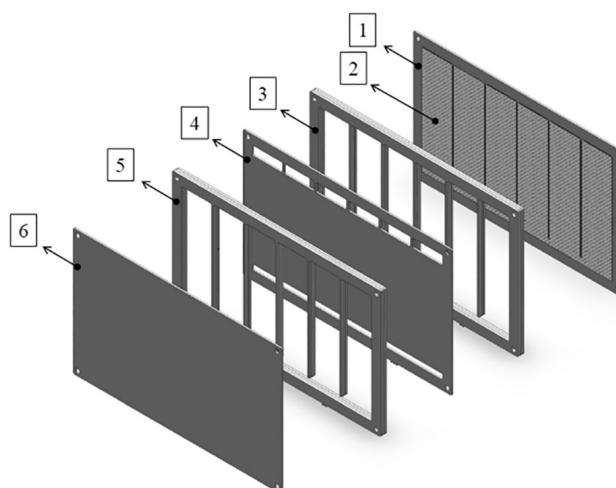
Авторы [39] изучали охлаждающие характеристики термосифонов в гибридных системах кондиционирования воздуха с радиационным охлаждением. С использованием программного обеспечения OpenModelica проводилось моделирование таких систем для анализа влияния структурных параметров на производительность. Также даны оценки потенциала энергосбережения при применении радиационного охладителя на основе термосифона в жилых домах в пяти климатических зонах Китая. Результаты показали, что годовое потребление электроэнергии на охлаждение может быть снижено на 41–56 %, а период окупаемости для одноэтажного семейного дома с оптимизированным радиационным охладителем на основе термосифона во всех пяти климатических зонах Китая составляет приблизительно от 8,4 до 10,5 лет.

В [40] исследуется интеграция термосифонов с радиационными охладителями в системах кондиционирования на основе CO₂. Выполнен анализ условий для повышения энергоэффективности и снижения тепловой нагрузки в зданиях. Максимальные приросты КПД и эксергетической эффективности составили 33,8 и 29,1 % соответственно, что сопоставимо с эффективностью интегрированной солнечной фотоэлектрической системы.

Авторы [41] рассмотрели принципы работы контурного термосифона и возможности его применения в системе охлаждения центра обработки данных. Отмечается влияние выбора хладагента и коэффициента заполнения, а также диаметра трубок на работу контурного термосифона. Рассмотрено применение контурного термосифона как в охлаждении на уровне комнаты, так и на более

Рис. 7. Схема пластин, из которых состоит плоский термосифон: 1 – замыкающая пластина испарителя; 2 – пять слоев сетчатого фитиля, приваренных точечной сваркой поверх пластины испарителя; 3 – набор из трех гребневидных пластин; 4 – промежуточная пластина; 5 – набор из трех гребневидных пластин; 6 – замыкающая пластина конденсатора

Fig. 7. Schematic of the plates that compose the flat thermosyphon: 1 – evaporator closing plate; 2 – five layers of screen mesh spot welded over the evaporator plate; 3 – set of three comb-like plates; 4 – intermediate plate; 5 – set of three comb-like plates; 6 – condenser closing plate



локальных уровнях: охлаждение стойки с охлаждаемой электроникой и отдельных чипов. Также представлена комбинированная система компрессора и контурного термосифона, которая может использоваться для охлаждения базовой станции телекоммуникаций. Указывается на заметное улучшение энергоэффективности таких устройств по сравнению с использованием только кондиционирования воздуха в качестве метода охлаждения, поскольку система может использовать холодный уличный воздух непосредственно в качестве теплоотвода. В зависимости от температуры воздуха возможны различные режимы работы такой системы.

Разработка пассивного охлаждения трехмерных многослойных интегрированных микросхем с использованием двухфазного миниатюрного термосифона приведена в [42]. Особенностью является то, что несколько нагревателей (чипов) пространственно разделены и охлаждаются одним устройством (рис. 8). Авторы рассматривали такие параметры, как угол наклона испарителя, вертикальное разделение между испарителем и конденсатором, а также режимы кипения на выходе из испарителя. Определено, что увеличение высоты стояка путем изменения угла наклона устройства заметно улучшает эффективность охлаждения. Однако большие углы наклона испарителя не всегда способствовали повышению эффективности охлаждения, особенно при большей высоте стояка. При более высокой скорости потока угол наклона 0° обеспечивал несколько лучшую эффективность охлаждения, чем другие углы наклона. В целом такая схема эффективно справляется с охлаждением нескольких различных электронных компонентов с разным уровнем тепловыделения и является достаточно компактной для применения в дата-центрах.

Двухфазный кольцевой термосифон обладает значительными преимуществами в высокоеффективной передаче тепла на большие расстояния для различных применений в тепловых машинах и энергетике и не требует дополнительного потребления энергии. В [43] экспериментально исследованы теплопередающие характеристики двухфазного кольцевого термосифона с микроканальным испарителем и проведено их сравнение с характеристиками двухфазного кольцевого термосифона с гладкотрубным испарителем. В качестве рабочей жидкости использовался 1,1,1,3,3-пентафтторпропан (R245fa) при объемном коэффициенте наполнения 50–80 %. Результаты показали, что дополнительные микроканавки позволили сократить время запуска и достигнуть более низкой максимальной температуры по сравнению с температурным перерегулированием. Контурный термосифон с микроканальным испарителем показал более низкие температуры испарителя и лучшую изотермичность по сравнению с термосифоном с гладкотрубным испарителем. Структуры с микроканалами могут смягчить локальное прерывистое пересыхание при умеренных и высоких уровнях потребляемой мощности для коэффициентов заполнения 50 и 60 %. Добавление структур с микроканавками улучшило параметры теплопередачи термосифона с гладкотрубным испарителем, обладающим более низким термическим сопротивлением.

Фирмой Thermacore (США) были разработаны две конструкции контурных термосифонов с капиллярными структурами для охлаждения электроники: мощный контурный термосифон

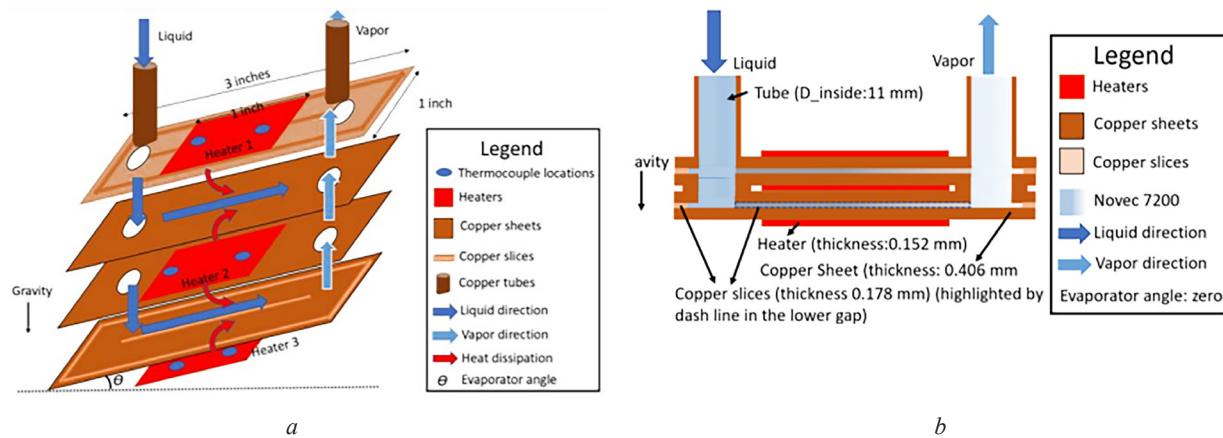


Рис. 8. Схема (a) и сечение (b) моделированного испарителя термосифона для охлаждения трехмерных многослойных интегрированных микросхем [42]

Fig. 8. Schematic (a) and cross-section (b) of a simulated thermosyphon evaporator for cooling three-dimensional multilayer integrated circuits [42]

с горизонтальным испарителем в виде U-образной трубы, и контурный термосифон с горизонтальными трубопроводами и плоским испарителем, нагреваемым с обеих сторон. Испарители в обоих случаях были разработаны с учетом совместимости с компонентами электроники [44]. Для того чтобы избежать замерзания (при температурах окружающей среды ниже 0 °C), в качестве рабочих жидкостей были предложены метанол и этиловый спирт. Результаты испытаний показали, что контурный термосифон с капиллярными структурами может работать с относительно высокими тепловыми потоками на стенке испарителя – до 70 Вт/см² (с метанолом в качестве рабочей жидкости).

Заключение. Данная работа представляет собой краткий обзор результатов последних разработок, исследований и практического применения в различных областях техники двухфазных теплопередающих устройств – двухфазных термосифонов. Рассмотрены возможности интенсификации теплообмена и влияние геометрии термосифона, в частности области испарителя, на его производительность. Приведены исследования влияния рабочей жидкости и объема заполнения. Выполнен анализ ряда работ, описывающих применения двухфазных термосифонов в разных областях, в частности, для термостабилизации грунта, охлаждения теплонаагруженного оборудования или объектов с зонами постоянного интенсивного тепловыделения, а также охлаждения электроники, в том числе миниатюрных чипов.

Список использованных источников

1. Experimental investigation on air-cooling type loop thermosyphon thermal characteristic with serpentine tube heat exchanger / Y. He, C. Hu, H. Li [et al.] // International Journal of Refrigeration. – 2022. – Vol. 138. – P. 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.03.009>
2. Liu, Q. Experimental Study on Thermosyphon for Shipboard High-Power Electronics Cooling System / Q. Liu, K. Fukuda, P. F. Sutopo // Heat Transfer Engineering. – 2014. – Vol. 35. – P. 1077–1083. <https://doi.org/10.1080/01457632.2013.863096>
3. Experimental study on the effect of filling ratio on an R141b two-phase thermosyphon loop with a horizontal parallel tube evaporator / M. Yao, Y. Gan, Q. Luo [et al.] // International Journal of Refrigeration. – 2022. – Vol. 137. – P. 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.02.013>
4. Zamanifard, A. An experimental evaluation of the performance of a remote 2U loop thermosyphon / A. Zamanifard, C.-C. Wang // Applied Thermal Engineering. – 2024. – Vol. 248, part B. – Art. ID 123243. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123243>
5. A novel thermosyphon cooling applied to concentrated photovoltaic-thermoelectric system for passive and efficient heat dissipation / H. Yao, W. Pu, J. Wang [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2024. – Vol. 236, part A. – Art. ID 121460. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121460>
6. Experimental optimization on the volume-filling ratio of a loop thermosyphon photovoltaic/thermal system / T. Zhang, Z. Yan, G. Pei [et al.] // Renewable Energy. – 2019. – Vol. 143. – P. 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.014>
7. Panse, S. S. A thermosiphon loop for high heat flux removal using flow boiling of ethanol in OMM with taper / S. S. Panse, S. G. Kandlikar // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 106. – P. 546–557. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.020>
8. Matsubara, K. Thermosiphon loop thermal collector for low-temperature waste heat recovery / K. Matsubara, Y. Matsudaira, I. Kourakata // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 92. – P. 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.004>
9. Long horizontal vapordynamic thermosyphons for renewable energy sources / L. L. Vasiliev, L. L. Vassiliev Jr., M. I. Rabetsky [et al.] // Heat Transfer Engineering. – 2019. – Vol. 40, iss. 3–4. – P. 258–266. <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1426252>
10. Development and testing of a novel horizontal loop thermosyphon as a kW-class heat transfer device / L. Vasiliev, A. Zhuravlyov, M. Kuzmich, V. Kulikouski // Applied Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 200. – Art. ID 117682. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117682>
11. Кольцевой термосифон для охлаждения теплонаагруженных компонентов электроники / Л. Л. Васильев, А. С. Журавлёв, М. А. Кузьмич [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2023. – Т. 96, № 7. – С. 1740–1747.
12. Фисенко, С. Пленочное течение теплоагента в замкнутом термосифоне / С. Фисенко // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 6. – С. 1148–1152.
13. Modeling and test of a thermosyphon loop for the cooling of a megawatt-range power electronics converter / M. Moustaid, V. Platel, M. Guillet [et al.] // International Journal of Thermofluids. – 2022. – Vol. 13. – Art. ID 100129. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100129>
14. Air-Cooled Loop Thermosyphon Cooling System for High Heat Load CPUs–Part I: Design and Performance Simulation / J. B. Marcinichen, G. S. R. B Armas, G. Rouaze [et al.] // IEEE Transaction Components, Packaging Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 11, iss. 10. – P. 1679–1686. <https://doi.org/10.1109/TCMT.2021.3112080>

15. Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling / H. Tang, Y. Tang, Z. Wan [et al.] // Applied Energy. – 2018. – Vol. 223. – P. 383–400. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.072>
16. Impact of working fluid properties on heat transfer and flow characteristics of two-phase loop thermosyphon with high filling ratios / Y. Cai, X. Hu, J. Lu [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 238. – Art. ID 126482. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4813552>
17. Kalantarpour, R. Enhancing heat transfer in thermosyphons: The role of self-rewetting nanofluids, and filling ratios for improved performance / R. Kalantarpour, K. Vafai // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024. – Vol. 223. – Art. ID 125284. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125284>
18. Gupta, S. Computational fluid dynamics: innovations in numerical techniques, multi-phase flow modeling, and prospects for sustainable energy applications / S. Gupta, M. Kumar // Journal of Sustainable Urban Futures. – 2023. – Vol. 13, iss. 9. – P. 1–20.
19. Zhang, M. The experimental investigation on thermal performance of a flat two-phase thermosyphon / M. Zhang, Z. Liu, G. Ma // International Journal of Thermal Sciences. – 2008. – Vol. 47, iss. 9. – P. 1195–1203. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.10.004>
20. Zhang, M. Numerical simulation and experimental verification of a flat two-phase thermosyphon / M. Zhang, Z. Liu, G. Ma // Energy Conversion and Management. – 2009. – Vol. 50. – P. 1095–1100. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.12.001>
21. Experimental study on the thermal characteristics of micro channel separate heat pipe respect to different filling ratio / L. Ling, Q. Zhang, Y. Yu [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 102. – P. 375–382. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2016.03.016>
22. Experimental study on the influence of initial state parameters on the start-up and heat transfer characteristics of separated heat pipe system / Z. Xinyu, J. Lv, H. Cheng [et al.] // Annals of Nuclear Energy. – 2024. – Vol. 208. – Art. ID 110810. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110810>
23. Experimental investigation of two-phase thermosyphon loop for passive containment cooling / Y. Xuan, J. Hu, X. Chi [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2021. – Vol. 184. – Art. ID 116403. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2020.116403>
24. Sandeep, K. S. Design and thermodynamic analysis of single-loop thermosyphon / K. S. Sandeep, G. Narendra // Proceedings of the Second International Conference on Emerging Trends in Engineering (ICETE 2023). – 2023. – P. 1197–1207. – (Advances in Engineering Research). https://doi.org/10.2991/978-94-6463-252-1_120
25. Nanofluids: key parameters to enhance thermal conductivity and its applications / H. Younes, M. Mao, S. M. Sohel Murshed [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 207. – Art. ID 118202. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2022.118202>
26. Fulpagare, Y. Performance of two-phase loop thermosiphon with graphene nanofluid / Y. Fulpagare, D.-Y. Tsai, C.-C. Wang // Applied Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 200. – Art. ID 117714. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2021.117714>
27. Кисеев, В. М. Экспериментальное исследование кипения наножидкостей в термосифонах / В. М. Кисеев, О. В. Сажин // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93, вып. 10. – С. 1410–1422. <https://doi.org/10.61011/JTF.2023.10.56278.134-23>
28. Khodabandeh, R. Heat transfer, flow regime and instability of a nano- and micro-porous structure evaporator in a two-phase thermosyphon loop / R. Khodabandeh, R. Furberg // International Journal of Thermal Sciences. – 2010. – Vol. 49, iss. 7. – P. 1183–1192. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.01.016>
29. Experimental investigation on air-cooling type loop thermosyphon thermal characteristic with serpentine tube heat exchanger / Y. He, C. Hu, H. Li [et al.] // International Journal of Refrigeration. – 2022. – Vol. 138. – P. 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.03.009>
30. Wagner, A. M. Review of Thermosyphon Applications. Final report ERDC/CRREL TR-14-1 / A. M. Wagner. – Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL), 2014. – URL: <https://dot.alaska.gov/stwddes/research/assets/pdf/erdc-crrel-tr-14-1.pdf>.
31. Системы термостабилизации грунта: опыт и перспективы / Д. А. Сидоров, А. А. Куншин, Г. В. Буслаев [и др.] // Neftegaz.RU. – 2022. – № 12. – С. 88–92. – URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/arktika/761024-sistemy-termostabilizatsii-grunta-opyt-i-perspektivy/>
32. Qin, Y. Wind-driven device for cooling permafrost / Y. Qin, T. Wang, W. Yuan // Nature Communications. – 2023. – Vol. 14. – Art. ID 7558. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43375-z>
33. Thermosyphon-assisted cooling system working in the moderate heat flux range / K. O. Ponomarev, G. V. Kuznetsov, E. G. Orlova, D. V. Feoktistov // Thermal Science and Engineering Progress. – 2022. – Vol. 32. – Art. ID 101330. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101330>
34. Моделирование системы пассивного отвода тепла от шахты-хранилища исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М при помощи термосифонов / С. М. Глухов, А. Д. Лёзов, Д. Е. Шумков [и др.] // Фізика. Технології. Інновації: сб. ст. VIII Міжнар. молодеж. науч. конф. (Екатеринбург, 17–21 мая 2021 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2021. – С. 113–122.
35. Experimental investigation of the heat transfer characteristics, operating limits, and temperature distribution of a prototypically 3 m long two-phase closed thermosyphon for spent fuel pool passive cooling / S. I. C. Castro, M. Kirsch, R. Kulenovic, J. Starflinger // Experimental and Computational Multiphase Flow. – 2024. – Vol. 6. – P. 229–241. <https://doi.org/10.1007/s42757-024-0193-2>
36. Thermal performance improvement by rotating thermosyphon loop in rotor of an interior permanent magnet synchronous electric motor / P. S. Wu, M.-F. Hsieh, Y. E. Lu [et al.] // Inventions. – 2022. – Vol. 7, iss. 2. – P. 37. <https://doi.org/10.3390/inventions7020037>

37. Thermal performance of plate-type loop thermosyphon at sub-atmospheric pressures / V. Tsoi, S. W. Chang, K. F. Chiang, C. C. Huang // Applied Thermal Engineering. – 2011. – Vol. 31, iss. 14–15. – P. 2556–2567. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2011.04.021>
38. Junior, A. Thermal performance of a novel flat thermosyphon for avionics thermal management / A. Junior, M. Mantelli // Energy Conversion and Management. – 2019. – Vol. 202. – Art. ID 112219. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112219>
39. Optimization study on the performance of a thermosyphon-based radiative cooler / B. Yao, K. Zhang, J. Zhu, S. Wu // Indoor and Built Environment. – 2023. – Vol. 32, iss. 2. – P. 425–439. <https://doi.org/10.1177/1420326X221117758>
40. Bijarniya, J. P. Performance improvement of CO₂ air conditioner by integrating photonic radiative cooler as sub-cooler or/and roof envelope / J. P. Bijarniya, J. Sarkar, P. Maiti // Energy Conversion and Management. – 2022. – Vol. 251, iss. 2. – Art. ID 115019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115019>
41. Principles of loop thermosyphon and its application in data center cooling systems: A review / D. Tao, X. Chen, H. Cao [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 150. – Art. ID 111389. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111389>
42. Hu, Y. Thermosyphon-cooled three-dimensional stacked heat sources / Y. Hu, Y. Joshi // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 11, iss. 10. – P. 1695–1702. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2021.3078758>
43. Thermal characteristics of a two-phase loop thermosyphon with micro-grooved structures inside the evaporator / Y. Hua, J. Qu, W. Yang [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2024. – Vol. 224. – Art. ID 125357. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125357>
44. Khrustalev, D. Loop thermosyphons for cooling of electronics / D. Khrustalev // Eighteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. Proceedings 2002 (Cat.No.02CH37311). – IEEE, 2002. – P. 145–150. <https://doi.org/10.1109/STHERM.2002.991360>

References

1. He Y., Hu C., Li H., Hu X., Tang D. Experimental investigation on air-cooling type loop thermosyphon thermal characteristic with serpentine tube heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 2022, vol. 138, pp. 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.03.009>
2. Liu Q., Fukuda K., Sutopo P. F. Experimental Study on Thermosyphon for Shipboard High-Power Electronics Cooling System. *Heat Transfer Engineering*, 2014, vol. 35, pp. 1077–1083. <https://doi.org/10.1080/01457632.2013.863096>
3. Yao M., Gan Y., Luo Q., Li R., Liu R., Feng J., Mao Y., Li Y. Experimental study on the effect of filling ratio on an R141b two-phase thermosyphon loop with a horizontal parallel tube evaporator. *International Journal of Refrigeration*, 2022, vol. 137, pp. 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.02.013>
4. Zamanifard A., Wang C.-C. An experimental evaluation of the performance of a remote 2U loop thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, 2024, vol. 248, part B, art. ID 123243. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2024.123243>
5. Yao H., Pu W., Wang J., Qin Y., Qiao L., Song N. A novel thermosyphon cooling applied to concentrated photovoltaic-thermoelectric system for passive and efficient heat dissipation. *Applied Thermal Engineering*, 2024, vol. 236, part A, art. ID 121460. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2023.121460>
6. Zhang T., Yan Z., Pei G., Zhu Q., Ji J. Experimental optimization on the volume-filling ratio of a loop thermosyphon photovoltaic/thermal system. *Renewable Energy*, 2019, vol. 143, pp. 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.014>
7. Panse S. S., Kandlikar S. G. A thermosiphon loop for high heat flux removal using flow boiling of ethanol in OMM with taper. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 106, pp. 546–557. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.020>
8. Matsubara K., Matsudaira Y., Kourakata I. Thermosiphon loop thermal collector for low-temperature waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 92, pp. 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2015.09.004>
9. Vasiliev L. L., Vassiliev L. L., Jr., Rabetsky M. I., Grakovitch L. P., Zhuravlyov A. S., Shapovalov A. V., Rodin A. V. Long horizontal vopardynamic thermosyphons for renewable energy sources. *Heat Transfer Engineering*, 2019, vol. 40, iss. 3–4, pp. 258–266. <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1426252>
10. Vasiliev L., Zhuravlyov A., Kuzmich M., Kulikouski V. Development and testing of a novel horizontal loop thermosyphon as a kW-class heat transfer device. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 200, art. ID 117682. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2021.117682>
11. Vasiliev L. L., Zhuravlyov A. S., Kuzmich M. A., Kulikovskii V. K., Olekhovich V. A. Loop thermosyphon for cooling heat-loaded electronics components. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2023, vol. 96, no. 7, pp. 1708–1715. <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02840-8>
12. Fisenko S. P. Film flow of the heat-transfer agent in a closed thermosyphon. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2022, vol. 95, no. 6, pp. 1421–1425. <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02610-y>
13. Moustaid M., Platel V., Guillet M., Reynes H., Buttay C. Modeling and test of a thermosyphon loop for the cooling of a megawatt-range power electronics converter. *International Journal of Thermofluids*, 2022, vol. 13, art. ID 100129. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100129>
14. Marcinichen J. B., Armas G. S. R. B., Rouaze G., Thome J. R., Winston Zhang L. Air-Cooled Loop Thermosyphon Cooling System for High Heat Load CPUs—Part I: Design and Performance Simulation. *IEEE Transaction Components, Packaging Manufacturing Technology*, 2021, vol. 11, iss. 10, pp. 1679–1686. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2021.3112080>

15. Tang H., Tang Y., Wan Z., Li J., Yuan W., Lu L., Li Y., Tang K. Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling. *Applied Energy*, 2018, vol. 223, pp. 383–400. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.072>
16. Cai Y., Hu X., Lu J., Li Y., Tang D., Hu C. Impact of working fluid properties on heat transfer and flow characteristics of two-phase loop thermosyphon with high filling ratios. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025, vol. 238, p. 126482. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4813552>
17. Kalantarpour R., Vafai K. Enhancing heat transfer in thermosyphons: The role of self-rewetting nanofluids, and filling ratios for improved performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, vol. 223, art. ID 125284. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125284>
18. Gupta S., Kumar M. Computational fluid dynamics: innovations in numerical techniques, multi-phase flow modeling, and prospects for sustainable energy applications. *Journal of Sustainable Urban Futures*, 2023, vol. 13, iss. 9, pp. 1–20.
19. Zhang M., Liu Z., Ma G. The experimental investigation on thermal performance of a flat two-phase thermosyphon. *International Journal of Thermal Sciences*, 2008, vol. 47, iss. 9, pp. 1195–1203. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.10.004>
20. Zhang M., Liu Z., Ma G. Numerical simulation and experimental verification of a flat two-phase thermosyphon. *Energy Conversion and Management*, 2009, vol. 50, pp. 1095–1100. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.12.001>
21. Ling L., Zhang Q., Yu Y., Liao S., Sha Z. Experimental study on the thermal characteristics of micro channel separate heat pipe respect to different filling ratio. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 102, pp. 375–382. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2016.03.016>
22. Zhou X., Lv J., Cheng H., Fan G., Liu J. Experimental study on the influence of initial state parameters on the start-up and heat transfer characteristics of separated heat pipe system. *Annals of Nuclear Energy*, 2024, vol. 208, art. ID 110810. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110810>
23. Yin X., Hu J., Chi X., Li Y., Nan Z., Wang N. Experimental investigation of two-phase thermosyphon loop for passive containment cooling. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 184, art. ID 116403. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2020.116403>
24. Sandeep K. S., Narendar G. Design and thermodynamic analysis of single-loop thermosyphon. *Proceedings of the Second International Conference on Emerging Trends in Engineering (ICETE 2023). Advances in Engineering Research*, 2023, pp. 1197–1207. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-252-1_120
25. Younes H., Mao M., Sohel Murshed S. M., Lou D., Hong H., Peterson G. P. Nanofluids: key parameters to enhance thermal conductivity and its applications. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 207, art. ID 118202. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2022.118202>
26. Fulpagare Y., Tsai D.-Y., Wang C.-C. Performance of two-phase loop thermosiphon with graphene nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 200, art. ID 117714. <https://doi.org/10.1016/j.aplthermaleng.2021.117714>
27. Kiseev V. M., Sazhin O. V. Experimental investigation of nanofluid boiling in thermosyphons. *Technical Physics*, 2023, vol. 93, iss. 10, pp. 1311–1322. <https://doi.org/10.61011/TP.2023.10.57446.134-23>
28. Khodabandeh R., Furberg R. Heat transfer, flow regime and instability of a nano- and micro-porous structure evaporator in a two-phase thermosyphon loop. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, vol. 49, iss. 7, pp. 1183–1192. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.01.016>
29. He Y., Hu C., Li H., Hu X., Tang D. Experimental investigation on air-cooling type loop thermosyphon thermal characteristic with serpentine tube heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 2022, vol. 138, pp. 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.03.009>
30. Wagner A. M. *Review of Thermosyphon Applications*. Final report ERDC/CRREL TR-14-1. Cold Regions Research and Engineering Laboratory (US), 2014. Available at: <https://dot.alaska.gov/stwddes/research/assets/pdf/erdc-crrel-tr-14-1.pdf>.
31. Sidorov D. A., Kunshin A. A., Buslaev G. V., Lavrik A. Ju., Lavrik A. Ju. Soil thermal stabilization systems: experience and prospects. *Neftegaz.RU*, 2022, no. 12, pp. 88–92. Available at: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/arktika/761024-sistemy-termostabilizatsii-grunta-opyt-i-perspektivy> (in Russian).
32. Qin Y., Wang T., Yuan W. Wind-driven device for cooling permafrost. *Nature Communications*, 2023, vol. 14, art. ID 7558. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43375-z>
33. Ponomarev K. O., Kuznetsov G. V., Orlova E. G., Feoktistov D. V. Thermosyphon-assisted cooling system working in the moderate heat flux range. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, vol. 32, art. ID 101330. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101330>
34. Glukhov S. M., Lezov A. D., Shumkov D. E., Klimova V. A., Tashlykov O. L. Simulation of the passive heat removal system from the storage shaft of the IVV-2M research nuclear reactor using thermosiphons. *Fizika. Tekhnologii. Innovatsii: sbornik statei VIII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii (Ekaterinburg, 17–21 maya 2021 g.)* [Physics. Technologies. Innovations: Collection of articles of the VIII International Youth Scientific Conference (Yekaterinburg, May 17–21, 2021). Yekaterinburg, 2021, pp. 113–122 (in Russian)].
35. Castro S. I. C., Kirsch M., Kulenovic R., Starflinger J. Experimental investigation of the heat transfer characteristics, operating limits, and temperature distribution of a prototypically 3 m long two-phase closed thermosyphon for spent fuel pool passive cooling. *Experimental and Computational Multiphase Flow*, 2024, vol. 6, pp. 229–241. <https://doi.org/10.1007/s42757-024-0193-2>
36. Wu P. S., Hsieh M.-F., Lu Y. E., Cai W. L., Chang S. W. Thermal performance improvement by rotating thermosyphon loop in rotor of an interior permanent magnet synchronous electric motor. *Inventions*, 2022, vol. 7, iss. 2, p. 37. <https://doi.org/10.3390/inventions7020037>

37. Tsoi V., Chang S. W., Chiang K. F., Huang C. C. Thermal performance of plate-type loop thermosyphon at sub-atmospheric pressures. *Applied Thermal Engineering*, 2011, vol. 31, iss. 14–15, pp. 2556–2567. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.021>
38. Junior A., Mantelli M. Thermal performance of a novel flat thermosyphon for avionics thermal management. *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 202, art. ID 112219. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112219>
39. Yao B., Zhang K., Zhu J., Wu S. Optimization study on the performance of a thermosyphon-based radiative cooler. *Indoor and Built Environment*, 2023, vol. 32, iss. 2, pp. 425–439. <https://doi.org/10.1177/1420326X221117758>
40. Prakash Bijarniya J., Sarkar J., Maiti P. Performance improvement of CO₂ air conditioner by integrating photonic radiative cooler as sub-cooler or/and roof envelope. *Energy Conversion and Management*, 2022, vol. 251, iss. 2, art. ID 115019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115019>
41. Ding T., Chen X., Cao H., He Z., Wang J., Li Z. Principles of loop thermosyphon and its application in data center cooling systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 150, art. ID 111389. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111389>
42. Hu Y., Joshi Y. Thermosyphon-cooled three-dimensional stacked heat sources. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2021, vol. 11, iss. 10, pp. 1695–1702. <https://doi.org/10.1109/TCMT.2021.3078758>
43. Hua Y., Qu J., Yang W., Zhang T., Zhao Y. Thermal characteristics of a two-phase loop thermosyphon with micro-grooved structures inside the evaporator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, vol. 224, art. ID 125357. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125357>
44. Khrustalev D. Loop thermosyphons for cooling of electronics. *Eighteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. Proceedings 2002 (Cat.No.02CH3731I)*. IEEE, 2002, pp. 145–150. <https://doi.org/10.1109/STHERM.2002.991360>

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-336-344>

UDC 697.7

Review

**Zhai Hongyuan¹, Zhang Siben¹, Lin Guohai^{1*}, Xu Ting²,
Zhang Yuting³, Zhao Xiaoqing³**

¹*Hongsheng Institute of Building Sciences of Heilongjiang Province,*

Xiangfang district, 325, Xingsheng St., 150040 Harbin, Heilongjiang Province, China

²*International Cooperation Department at the Heilongjiang Provincial Academy of Sciences,*

Nangang district, 204, Zhongshanlu St., 150001, Harbin, Heilongjiang Province, China

³*Institute of High Technology of the Heilongjiang Provincial Academy of Sciences,*

Nangang district, 52, Zhenketsze St., 150001, Harbin, Heilongjiang Province, China

THE USE OF NEW TECHNOLOGIES IN THE CONSTRUCTION AND OPERATION OF PREFABRICATED BUILDINGS WITH ULTRA-LOW ENERGY CONSUMPTION

Abstract. This article provides a brief overview of new technologies developed for use in construction in cold regions of China. These technologies aim to significantly reduce environmental impacts, lower winter heating costs, and create comfortable living spaces during high summer temperatures. Chinese scientists have created ultra-low-energy buildings that are not connected to the central heating system. The following technical solutions are proposed for highly efficient heat conservation in residential spaces during the winter: a prefabricated building structure integrated with a solar heating system; the use of heat accumulators; and the development of a geothermal tunnel ventilation and heating system. To reduce indoor temperatures in the summer, the installation of sun protection systems, as well as thermally insulated roller blinds on doors, windows, and external walls, is proposed. These technological advances have been shown to significantly reduce building operating costs and carbon emissions. The implementation of this integrated technology in the construction of residential buildings in cold climates will enable the commissioning of heating systems without the need for public heating and will reduce carbon emissions over the entire life cycle.

Keywords: ultra-low energy prefabricated buildings, renewable energy, clean energy, district heating

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

Information about the authors: Zhai Hongyuan – Leading Research Engineer, Director at Hongsheng Institute of Building Sciences of Heilongjiang Province, e-mail: 15846627077@163.com; Zhang Siben – Leading Engineer, Head of the Engineering Department at Hongsheng Institute of Construction Sciences of Heilongjiang Province, e-mail: 18645082640@163.com; Lin Guohai – Leading Engineer, Chief Designer at Hongsheng Institute of Construction Sciences, Heilongjiang Province, e-mail: hrbhsjt@163.com; Xu Ting – Master of Science, Leading Engineer of the International Cooperation Department at Heilongjiang Provincial Academy of Sciences, e-mail: 174672366@qq.com; Zhang Yuting – Master of Science, Leading Engineer, Head of the International Cooperation Department at Institute of High Technology of the Heilongjiang Provincial Academy of Sciences, e-mail: yutingzhanghas@126.com; Zhao Xiaoqing – Master of Science, Junior Researcher at Institute of High Technology of the Heilongjiang Provincial Academy of Sciences, e-mail: 79541294@qq.com

Contribution of the authors: the authors contributed equally to the writing of the article.

For citation: Zhai Hongyuan, Zhang Siben, Lin Guohai, Xu Ting, Zhang Yuting, Zhao Xiaoqing. The use of new technologies in the construction and operation of prefabricated buildings with ultra-low energy consumption. *Vestsi Natsyyanal'na akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tehnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 4, pp. 336–344. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-336-344>

Received: 21.01.2025

Modified: 18.11.2025

Approved for publication: 03.12.2025

Signed to the press: 19.12.2025

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку.

Обзор

Чжай Хунюань¹, Чжан Сибэн¹, Линь Гохай^{1*}, Сюй Тин²,
Чжан Юйтин³, Чжао Сяоцин³

¹Институт строительных наук Хуншэн провинции Хэйлунцзян, р-н Сянфан, ул. Синшэн, 325,
150040, Харбин, провинция Хэйлунцзян, Китайская Народная Республика

²Отдел международного сотрудничества Академии наук провинции Хэйлунцзян, р-н Наньган, ул. Чжоншаньлу, 204,
150001, Харбин, провинция Хэйлунцзян, Китайская Народная Республика

³Институт высоких технологий Академии наук провинции Хэйлунцзян, р-н Наньган, ул. Жэнъхэцзе, 52,
150001, Харбин, провинция Хэйлунцзян, Китайская Народная Республика

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СБОРНЫХ ЗДАНИЙ С УЛЬТРАНИЗКИМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ

Аннотация. Выполнен краткий обзор новых технологий, разработанных для использования при строительстве в холодных районах Китая с целью значительного снижения вреда, наносимого экологии, а также уменьшения экономических затрат на оплату теплоснабжения в зимний период и создания комфортного температурного режима в жилых помещениях при высоких летних температурах. Китайскими учеными созданы здания со сверхнизким энергопотреблением, которые не подключены к системе центрального коммунального теплоснабжения. Для высокоэффективного сохранения тепла в жилых помещениях в зимний период предлагается применять следующие технические решения: сборная конструкция здания, интегрированная с системой солнечного отопления; использование теплоаккумуляторов; разработка геотермальной туннельной системы вентиляции и отопления. Для снижения температуры в помещениях в летний период предлагается установка солнцезащитных систем здания, а также систем теплоизоляционных рулонных штор на дверь, окна и наружные стены. Установлено, что использование данных технологических разработок приводит к значительному снижению эксплуатационной себестоимости зданий и количества углеродных выбросов. Внедрение комплексной технологии в строительство жилых зданий в холодных климатических условиях обеспечит введение в эксплуатацию отопительных систем без коммунального теплоснабжения и снижает углеродный выброс за полный жизненный цикл.

Ключевые слова: сборные здания с ультранизким энергопотреблением, возобновляемые источники энергии, экологически чистые источники энергии, централизованное отопление

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Чжай Хунюань – ведущий инженер-исследователь, директор Института строительных наук Хуншэн провинции Хэйлунцзян, e-mail: 15846627077@163.com; Чжан Сибэн – ведущий инженер, начальник отдела техники Института строительных наук Хуншэн провинции Хэйлунцзян, e-mail: 18645082640@163.com; Линь Гохай – ведущий инженер, главный конструктор Института строительных наук Хуншэн провинции Хэйлунцзян, e-mail: hrbhsjt@163.com; Сюй Тин – магистр, ведущий инженер отдела международного сотрудничества Академии наук провинции Хэйлунцзян, e-mail: 174672366@qq.com; Чжан Юйтин – магистр, ведущий инженер, начальник отдела международного сотрудничества Института высоких технологий Академии наук провинции Хэйлунцзян, e-mail: yutingzhanghs@126.com; Чжао Сяоцин – магистр, младший научный сотрудник Института высоких технологий Академии наук провинции Хэйлунцзян, e-mail: 79541294@qq.com.

Вклад авторов: авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Для цитирования: Использование новых технологий при строительстве и эксплуатации сборных зданий с ультранизким энергопотреблением (на англ. яз.) / Чжай Хунюань, Чжан Сибэн, Линь Гохай [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 4. – С. 336–344. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-336-344>

Поступила в редакцию: 21.01.2025

Доработанный вариант: 18.11.2025

Утверждена к публикации: 03.12.2025

Подписана в печать: 19.12.2025

Introduction. Currently, great importance is placed on the development of technologies that conserve natural resources and minimize environmental impacts from industrial activities. These considerations are also taken into account when developing construction technologies.

In recent years, Chinese scientists have been actively developing construction technologies for the construction of ultra-low-energy prefabricated buildings in cold regions, with the goal of eliminating the need for centralized heating provided by municipal heating networks during the winter. To meet residents' needs for comfort, improve quality of life in cold regions, and reduce utility bills for energy consumption, the researchers propose using renewable energy sources.

The document “Plan for Implementing Carbon Peak in Urban and Rural Construction”¹ (abbreviated as “Feasible Project”), jointly adopted by the Ministry of Housing, Urban and Rural Development of China and the National Development and Reform Commission of China, emphasizes that in order to save energy resources and eliminate the use of municipal central heating, it is necessary to promote the construction of buildings with ultra-low energy consumption.

Drawing on innovative developments, patented achievements, and technical know-how, an innovative team from the Hongsheng Institute of Building Sciences in Heilongjiang Province has created a demonstration park of prefabricated, ultra-low-energy buildings, which are proposed for construction in cold regions. All buildings in the park eliminate the need for central heating from the municipal district heating network (the electricity cost for auxiliary heating with electric appliances in winter is approximately one-tenth of the cost of central heating from the municipal district heating network), and are equipped with air conditioning and refrigeration systems for the summer.

The China Society for Construction Engineering Standardization (CECS) has developed relevant industry and local standards (technical codes)² for the construction of ultra-low-energy prefabricated structures. These standards offer an effective solution to the challenges associated with long-term dependence on district heating in buildings in colder climates, which requires high and significant increases in energy consumption, leading to increased carbon emissions. Building operating costs and carbon emissions are significantly reduced by using ultra-low-energy building construction technologies that utilize highly efficient heat conservation methods and a prefabricated structure that can incorporate solar heating systems, heat storage units, low-cost clean-energy heating systems, geothermal ventilation and heating systems, building sun protection systems, and thermal-insulating roller blind systems for doors, windows, and exterior walls.

Setting tasks. To significantly reduce environmental impacts and lower heating costs, Chinese scientists have developed ultra-low-energy building designs that are not connected to the central district heating system.

The researchers' goal was to use a comprehensive “passive priority + active optimization + intelligent control” technology to create ultra-low-energy building construction technologies for highly efficient heat conservation. The design utilizes a solar heating system and heat accumulators; a low-cost, zero-emission heating system powered by renewable energy; a geothermal tunnel ventilation and heating system; sun protection systems and thermally insulated roller blind systems for doors, windows, and exterior walls. These buildings utilize heating in winter without the need for district heating, and cooling in summer without air conditioning, reducing operating costs and carbon emissions. This solution to the problem in extremely cold and frigid regions of China and, for example, in arctic climate zones, makes it possible to abandon the use of central municipal heating during the winter period.

Design features of ultra-low energy buildings. To address these challenges, the authors developed a number of design and engineering solutions.

For example, to ensure maximum sunlight duration and intensity, the building's orientation to the south or southwest should be 5–10°, and the distance between buildings should comply with the current national standard GB 50180–2018 “Urban Residential District Planning and Design Standard”³, ensuring no light is blocked on the winter solstice. Furthermore, the building's shape should be straight, and the distance between two vertical walls should not exceed 12 meters.

Section 4.0.9 of GB 50180 sets out the solar insolation requirements for residential buildings (Table 1).

¹ *城乡建设领域碳达峰实施方案*. URL: https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202207/13/content_5700752.htm (date of access: 15.01.2025).

² 聚苯模块保温墙体应用技术规程. URL: <https://www.gongbiaoku.com/book/5ez18337k1f> (date of access: 15.01.2025) ; 模塑聚苯 (EPS) 模块外保温工程技术规程. URL: <https://www.gongbiaoku.com/book/b0q19850k5n> (date of access: 15.01.2025) ; 模塑聚苯模块混凝土剪力墙建筑技术规程 <https://www.gongbiaoku.com/mobile/read/fyj19619rx4> (date of access: 15.01.2025) ; 装配式聚苯模块保温系统技术规程. URL: <https://csrcare.com/Standard/Show?id=105010> (date of access: 15.01.2025) ; 聚苯模块外墙保温系统应用技术规程 URL: <https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=0EA8236BB0E67B5BE06397BE0A0A2001> (date of access: 15.01.2025) ; 聚苯模块保温系统技术规程 URL <https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=0EA8236BB0E67B5BE06397BE0A0A2001> (date of access: 15.01.2025).

³ *城市居住区规划设计标准*. URL: <https://www.chinesestandard.net/PDF/BOOK.aspx/GB50180-2018> (date of access: 15.01.2025).

1. The solar insolation standard for residential buildings is no less than the solar insolation at 2:00 PM on the winter solstice.

2. Before constructing an addition to a building, it should be taken into account that this will not reduce the solar insolation of adjacent residential buildings. An exception is the installation of an external elevator.

3. The solar insolation duration for new residential buildings during the renovation of older areas should not be less than 1 hour during the Dahan season.

Table 1. Solar insolation requirements for residential buildings (GB 50180–2018, Table 4.0.9)

Parameter	The climate zone in which the construction is carried out				
	Climate zone I, II, III		Climate zone IV		Climate zone V, VI
Number of permanently residing population in cities, million people	> 50	< 50	> 50	< 50	Unlimited
Days characterizing insolation	January 19–21 (Dahan season, “Great Cold”)			December 21 (winter solstice)	
Duration of insolation, h	> 2		> 3		> 1
Effective insolation range (true solar time)	from 8:00 a.m. to 4:00 p.m.			from 9:00 a.m. to 3:00 p.m.	
The beginning of insolation	From the lower level of the window sill*				

* The lower level for the window sill should be no less than 0.9 m.

These conditions are necessary to maximize solar energy gain and reduce the building's heating load.

When designing detached buildings (particularly residential ones), certain conditions should also be taken into account. For example, the usable area of each building should be at least 80 m², so medium-sized and large apartments should be the primary focus. A vestibule should be placed at the entrance to each building, especially in colder areas, to create a buffer space between the outdoor and indoor spaces to conserve heat. At least one living room (at least 4.5 m wide) should be located on the sunny side of the house (on the southern side). Tile or stone, which have significant heat storage properties, is recommended for the flooring in the south-facing living room and bedroom. Flexible flooring can be used for the north-facing bedroom.

The design of a south-facing balcony must meet the following requirements:

a) the distance between the horizontal walls of the balcony must be equal to the width of the living room, with no dividing doors to ensure natural convection of cold and hot air, balance the room temperature, and improve indoor air quality;

b) the balcony overhang must be at least 1.6 m, which maximizes the area of light accumulation in the room;

c) the balcony skylight must be located at ceiling level to maximize sunlight penetration into the room and increase the illuminated floor area;

d) a monolithic thermal-insulating roller blind with a thermal resistance of $R \geq 1,5$ (m²·K)/W must be installed on the inside of the balcony skylight on the south side of the building. Thermal-insulating curtains should also be installed on the inside of balcony windows on other sides of the building to improve (maintain) the thermal regime in this part of the house in winter and to shade the building in summer;

e) place at least 300 mm of planting soil on the balcony floor and install pots of soil on the inside of both walls to absorb solar thermal energy through the skylight and store it in the soil during the day (Figure 1). This is called light accumula-



Figure 1. An example of the placement of soil and plants on a balcony

tion and is calculated using the formula: $Q = C \cdot M \cdot (T_2 - T_1)$, where Q is the heat accumulated in the soil, J; C is the specific heat of the soil, J/(kg °C); M is the volume of soil, m³; T_1 , T_2 are the initial and final soil temperatures, respectively, in °C. Based on the calculation formula, it can be concluded that the greater the volume of planting soil, the more thermal energy accumulates during the day and the higher the possibility of maintaining the thermal regime and increasing the temperature in unheated rooms.

These unique solar thermal energy accumulators on south-facing balconies act as renewable active heat sources, used in the design of ultra-low-energy buildings. Furthermore, other natural or non-standard heat accumulators can be used to accumulate solar thermal energy to increase and maintain a comfortable indoor temperature.

Design of an ultra-low energy building envelope. According to Fourier's law: $Q = K \cdot F \cdot \Delta T$, where Q is the building's thermal load, W; K is the heat transfer coefficient of the building's enclosing structure, W/(m · K); F is the area of the building's enclosing structure, m²; ΔT is the temperature difference between the inside and outside of the building, K. The formula shows that the thermal load is directly proportional to the components on the right-hand side of the equation. After determining the building design scheme, F and ΔT are quantitative values, and only K is variable.

Furthermore, the developed structures must meet the requirements of the current state standards GB 50016–2018 “Code for Fire Protection Design of Buildings”¹ (Article 6.7 “Building Thermal Insulation and Exterior Finishes”) and GB 55037–2022 “General Code for Building Fire Protection”² (Article 6.6 “Building Thermal Insulation”). To reduce the U-value of the enclosing structure, the authors did not limit themselves to a single type, but used suitable materials and technical means.

As an example, consider a residential building with a height of 3.0 m. The thermal energy consumption for heating 1 m² of residential space in winter should not exceed 10 kW h/(m² year). To achieve this figure, the enclosing structure must meet the following requirements:

external wall heat transfer coefficient $K \leq 0.15 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;

heat transfer coefficient $K \leq 1.20 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;

structure airtightness class – not lower than 6, door airtightness class – not lower than class 8; airtightness classes must comply with GBT 7106 “Methods for testing airtightness, watertightness, and wind resistance in external doors and windows of buildings”;

the heat-transfer coefficient of the external window is $K \leq 0.80 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, the air-tightness class is at least 8;

the heat-transfer coefficient of the roof is $K \leq 0.10 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;

the heat-transfer coefficient on the first floor is $K \leq 0.10 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ if the building has no basement; $K \leq 0.15 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ – when the building has a basement, and the basement roof is the first floor; $K \leq 0.10 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ – when the basement roof is exposed to the air;

the heat-transfer coefficient of the walls between apartments is $K \leq 1.50 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;

the floor of a basement used as a garage with a separate entrance and a depth of at least 4.0 m should not be insulated, although insulation is required on the basement roof. If the basement does not have a separate entrance and is used in conjunction with a vertical ground floor connection, a translucent floor (Figure 2) should be designed in the room with a south-facing ground floor to directly allow light into the basement. A heat accumulator at least 100 mm thick should be installed on the underside of the



Figure 2. Light-permeable floor on the ground floor of a building with ultra-low energy consumption

¹ 建筑设计防火规范. URL: <https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/GB50016-2018> (date of access: 15.01.2025).

² 建筑防火通用规范. URL: <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GB55037-2022?Redirect> (date of access: 15.01.2025).

floor base, allowing direct illumination of the basement through the translucent floor and accumulating heat through daylight;

the enclosing structure of the balcony located on the north side of the building must meet the performance requirements of ultra-low energy buildings in cold regions.

The window area to floor ratio of external north-facing windows should be equal to the lower limit established by the current national standard of the People's Republic of China GB 55016–2021 "Standard for Daylighting Design of Buildings"¹.

According to Article 3.2.1 of this normative document, the determination of the level of solar light acquisition during design should be based on architectural characteristics and operational functions (Table 2).

Table 2. Values of the natural illumination coefficient under different lighting conditions (GB 55016–2021, Table 3.2.2-1)

Level of sunlight reception	Lateral natural lighting		Overhead natural lighting	
	standard value of natural illumination coefficient, %	standard value of the coefficient of natural illumination in a room, %	standard value of natural illumination coefficient, %	standard value of the coefficient of natural illumination in a room, %
I	5	750	5	750
II	4	600	3	450
III	3	450	2	300
IV	2	300	1	150
V	1	150	0.5	75

Heating in winter of rooms with low light, low temperature and high humidity. In winter, when light levels are low, temperatures are low, and humidity is high, solar thermal energy accumulators on south-facing balconies (see Figure 1) temporarily lose their ability to heat the space. Therefore, electric heat accumulators equipped with built-in heat-accumulating material should be used (Figure 3).

Compared to other heating technologies, using an electric heat accumulator offers advantages such as ease of installation, high efficiency and energy savings, safety and reliability, fully automatic control, and maintenance-free operation.

Other important advantages of heat storage devices as a source of room temperature maintenance are worth mentioning.

First, energy savings. In Harbin, during the cold season, heating using the centralized municipal heating network lasts 180 days, starting on October 20th each year and ending on April 20th of the following year. This heating period can be divided into three 60-day periods: early winter, late winter, and spring.



Figure 3. Operating scheme (a) and installation of an electric heat accumulator in the room (b)

¹ 建筑环境通用规范. URL: <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GB55016-2021?Redirect> (date of access: 15.01.2025).

For ease of management and to reduce unnecessary energy consumption, early winter is also divided into three periods: slightly cold, cold, and very cold. During the slightly cold and cold periods, a comfortable room temperature is maintained using a solar thermal energy harvesting device. During the very cold season, residents can decide to activate an electric heat storage device for heating based on the previous day's weather. Off-peak periods for the municipal electric network are from 10:00 PM to 5:00 AM each day. During the very cold period, the time required to connect to the electric current is typically 2 to 2.5 hours.

During the 60 days of late winter, the time required to connect to the electric current for indoor heating is typically 3 to 5 hours. The late winter phase (60 days) also has three periods: very cold, cold, and slightly cold. During these periods, the electric current is used to maintain the temperature, as in early winter.

The three periods of early spring (60 days total) – extreme cold, moderate cooling, and micro-cold – are characterized by the use of electric heating to generate additional heat in buildings, as in early winter. Overall, using inexpensive, clean energy for heating not only fully embodies behavioral energy conservation but also ensures that people can regulate the temperature in their buildings as they wish. It's worth noting that by using different heat sources during different periods, people can independently set their own comfortable indoor temperature.

Secondly, reducing heating costs. In Harbin, the winter district heating fee for the municipal heating network (or so-called heating fee) is 38.32 yuan/m² for residential buildings and 43.30 yuan/m² for non-residential buildings. According to monitoring data over the past three years, in ultra-low-energy buildings, the cost of heating with electricity was approximately 4 yuan/m², or approximately 1/10th of the district heating fee for the municipal heating network.

Another way to conserve and save heat is to install a fresh air supply line along the outer perimeter of the building's foundation and the inside of the basement's outer wall from an underground ground source. The fresh air temperature in the supply system varies depending on external sources (in particular, the temperature of the soil, the basement, etc.).

As a rule, an exhaust fan (noise level ≤ 30 dB) is installed in the kitchen. Each block of the building should have a separate, insulated, and sealed fresh air intake vent. A sealed, insulated tunnel ventilation system should be designed for each entrance, ensuring fresh air flow into the rooms from the tunnel ventilation. A check valve should be installed at the inlet end of the ventilation system. All ventilation openings should be located on the north side of the building and terminated with rain caps.

Fresh air intake vents and ventilation controls should also be installed in each room. A wind indicator panel should be placed at the top of the vent. A dynamic temperature indicator meter should be installed at the main fresh air intake. The number of fresh air intake vents in each room is individually designed based on the area used and the number of permanent residents.

Building sun protection system. When operating ultra-low-energy buildings, sun protection, which is necessary during hot periods, must also be considered (for example, in Harbin, from July to August, maximum outdoor temperatures can reach 30 °C and above).

Two shading methods are used in the design. *The first method* is protection from the outside of the building: installation of sun-protection curtains and awnings (Figure 4, *a, b*), planting tall broad-leaved trees on the southern side of the building, etc. *The second method* is sun-protection covering inside the building: installation of sun-protection curtains on the inner side of the southern light orientation to prevent daylight (Figure 4, *c*).

Energy-efficient reconstruction of existing buildings. To reduce energy consumption, existing buildings should be retrofitted according to technological requirements. However, several conditions must be considered.

1. The orientation and shape of the building being renovated must comply with the requirements for ultra-low-energy buildings.

2. When converting an existing building to a very low-energy building, a solar thermal storage unit capable of fully absorbing solar thermal energy should be installed on the sunny side of the building. Inside, potting soil should be used on balconies, and household items that are good heat carriers should be used indoors.



Figure 4. Examples of the use of external (a, b) and internal (c) building sun protection systems

3. The surface of the skylight, consisting of lightweight steel structures and glass curtain walls, adjoins the southern exterior wall of the building, forming a solar thermal energy collector. The surface heat transfer coefficient of the skylight is $K \leq 2.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, the illumination angle is from 43° to 47° , the upper surface must be covered with sun protection roller blinds and thermal insulating roller blinds that meet regulatory requirements ($R \geq 1.5 \text{ (m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$) and are height-adjustable (thermal insulating roller blinds can also be located on the lower surface of the skylight).

4. The foundation depth must be no less than the standard freezing depth multiplied by 0.7. The soil on the balcony, floors, walls, and furniture in living spaces must meet technical requirements. The underground surface must be covered with a thermal insulation layer with a heat transfer coefficient of $K \geq 0.15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. The heating method in the room must correspond to the illumination, humidity, and temperature levels at which the building is used. It is also necessary to install a ventilation system, open-light windows on the south wall of the building, and a fan in the upper part of the open-light window.

Monitoring energy consumption dynamics. As an example, we will consider an ultra-low-energy administrative building. A heat accumulator is used to collect thermal energy, and electrical equipment serves as the primary energy source for maintaining the building's heat. In winter, the building maintains a temperature of approximately $18\text{--}24^\circ\text{C}$. To accurately track the relationship between temperature and energy consumption, a system for collecting and monitoring temperature dynamics in rooms was installed. Sensors were installed on each floor and in the main room to track not only temperature changes but also other indicators, particularly environmental ones.

Figure 5 shows the data (temperature, PM2.5 content, carbon dioxide concentration, humidity, total volatile organic compounds, and formaldehyde) collected by the dynamic data collection and monitoring system on various dates. The resulting data is used to analyze the building's performance.



Figure 5. Information received by the data collection and monitoring system on January 8, 2023 (a) and January 2, 2024 (b)

By monitoring changes in indoor environmental parameters in ultra-low-energy buildings during 2023–2024, the accuracy of the dynamics and operational reliability of the developed thermal energy collection system were established.

Conclusion. The economic and environmental benefits of using the technologies described in this article for the construction of prefabricated ultra-low-energy buildings in extremely cold regions of China are studied. Specifically, there is no need to connect such buildings to the district heating network during the winter or use air conditioners for cooling during the summer. The construction of ultra-low-energy buildings seamlessly combines prefabricated construction with new highly efficient heat conservation and cooling technologies, significantly reducing the building's operating costs and carbon emissions.

The use of the technologies described in this article yields significant economic benefits. By eliminating the need for connection to the district heating network, the cost of the entire construction cycle (including initial investment and operating costs) is significantly reduced compared to the traditional model. At the same time, environmental issues associated with carbon emissions and the extraction of fossil fuels used in thermal energy production are addressed. Furthermore, increasing energy self-sufficiency reduces consumers' dependence on district heating and increases the resilience of the energy system.

The described new construction technologies make it possible to eliminate the need for centralized public heating in ultra-low-energy buildings located in extremely cold regions of China and are promising for the design of energy-efficient construction and optimization of the energy system in similar climate zones.

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-345-352>
УДК 621.039



Оригинальная статья

И. О. Мороз*, А. Г. Трифонов

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

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ И РАДИОНУКЛИДОВ ПОД ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ АЭС-2006

Аннотация. На основе международной терминологии определен и сформулирован термин «источник»: величина, представляющая физическую и химическую форму, а также учитывающая время выброса продуктов деления и других аэрозолей из материалов активной зоны и бетона в атмосферу первичной защитной оболочки или в бассейн выдержки. Рассмотрены химические формы продуктов деления и радионуклиды, которые могут выделяться из активных зон современных легководных реакторов. Выполнено моделирование динамики распространения источника радиоактивных веществ с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics методом LES с подсеточной моделью Смагоринского. Получены физически не противоречивые результаты, что указывает на корректную работу модели. Создан механизм для анализа распространения многокомпонентных потоков внутри защитной оболочки АЭС-2006. Работа поможет в уточнении данных для усовершенствования модели, созданной с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics для моделирования пространственного распространения многокомпонентных потоков газов и радиоактивных аэрозолей под защитной оболочкой АЭС-2006 при авариях с выходом радиоактивных веществ и продуктов деления.

Ключевые слова: продукты деления, термин источник, атомная электростанция, расчетный модуль, COMSOL Multiphysics, контейнер

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Мороз Ирина Олеговна – научный сотрудник научно-исследовательского отдела «Экспертный научно-технический центр Национальной академии наук Беларусь» Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларусь, e-mail: lonitkoira@gmail.com; Трифонов Александр Георгиевич – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Энергетическое планирование, разработки технических нормативных актов, экспертный анализ материалов и научно-организационное обеспечение Государственной программы» Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларусь, e-mail: tral@sosny.bas-net.by

Вклад авторов: Мороз Ирина Олеговна – написание текста рукописи, анализ международной терминологии, рассмотрение химических форм продуктов деления и радионуклидов, которые могут выделяться из активных зон современных легководных реакторов, создание модельного аналога в COMSOL Multiphysics, формулировка выводов и интерпретация результатов; Трифонов Александр Георгиевич – постановка исследовательских целей и задач, отладка модельного аналога, формулировка выводов и интерпретация результатов, редактирование.

Для цитирования: Мороз, И. О. Анализ динамики распространения продуктов деления и радионуклидов под защитной оболочкой АЭС-2006 / И. О. Мороз, А. Г. Трифонов // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 4. – С. 345–352. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-345-352>

Поступила в редакцию: 26.09.2024

Доработанный вариант: 21.11.2025

Утверждена к публикации: 03.12.2025

Подписана в печать: 19.12.2025

*Original article***Irina O. Moroz*, Alexander G. Trifonov***The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus, PO box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus***ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF DISTRIBUTION OF FISSION PRODUCTS AND RADIONUCLIDES UNDER THE CONTAINMENT OF NPP-2006**

Abstract. The term “source” is defined in the article on the basis of international terminology as a value representing the physical and chemical form, as well as taking into account the time of release of fission products and other aerosols from core materials and concrete into the atmosphere of the primary containment or into the suppression pool. Chemical forms of fission products and radionuclides that can be released from the cores of modern light water reactors are considered. Modeling of the dynamics of the spread of the source of radioactive substances was simulated using the COMSOL Multiphysics software package using the LES method with the Smagorinsky subgrid model. Physically consistent results were obtained, indicating that the model functions correctly. A mechanism was developed to analyze the propagation of multicomponent flows under the containment of NPP-2006. The work will help to clarify the data needed to improve the model created using the COMSOL Multiphysics software package for simulating the spatial distribution of multicomponent gas flows and radioactive aerosols under the containment of NPP-2006 during accidents involving the release of radioactive substances and fission products.

Keywords: fission products, source term, nuclear power plant, calculation module, COMSOL Multiphysics, containment

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

Information about the authors: Irina O. Moroz – Researcher at the Research Department “Expert Scientific and Technical Center of the National Academy of Sciences of Belarus” at Joint Institute for Energy and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: lonitkoira@gmail.com; Alexander G. Trifonov – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory “Power Engineering Planning, Technical Regulatory Acts Drawing, Expert Analysis of Materials, and Scientific and Organizational Support for State Programme” at Joint Institute for Energy and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: tral@sosny.bas-net.by

Contribution of the authors: Irina O. Moroz – writing the text of the manuscript, analysis of international terminology, consideration of the chemical forms of fission products and radionuclides that can be released from the active zones of modern light-water reactors, creation of a model analogue in COMSOL Multiphysics, formulation of conclusions and interpretation of the results; Alexander G. Trifonov – setting research goals and tasks, debugging the model analog, formulating conclusions and interpreting results, editing.

For citation: Moroz I. O., Trifonov A. G. Analysis of the dynamics of distribution of fission products and radionuclides under the containment of NPP-2006. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 4, pp. 345–352 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-345-352>

Received: 26.09.2024

Modified: 21.11.2025

Approved for publication: 03.12.2025

Signed to the press: 19.12.2025

Введение. Концепция безопасности проектов АЭС основывается на максимальном снижении воздействия возможных аварийных выбросов на внешнюю среду. Эффективная ликвидация и максимальное снижение последствий аварийных выбросов требуют точной оценки динамики выброса и возможных трансформаций отдельных компонентов с учетом инфраструктуры и состояния внешней среды в зоне аварийного воздействия. Величину радиационных последствий определяют качественный и количественный составы радиоактивных веществ в теплоносителе первого и второго контуров.

Радиоактивность теплоносителя обусловлена наведенной активностью самого теплоносителя, а также активностью продуктов коррозии, загрязняющих его. Кроме того, радиоактивные продукты деления могут попасть в теплоноситель в случае нарушения герметичности тепловыделяющих элементов. Физические характеристики реактора, такие как плотность нейтронного потока и энергетический спектр нейтронов, а также параметры контуров циркуляции, которые зависят от конструктивных решений (например, период циркуляции теплоносителя, время его облучения и проч.), и используемые материалы конструкции также влияют на долю вклада различных источников в радиоактивность теплоносителя.

Количество продуктов деления, которое может быть выброшено из атомной электростанции в результате аварии, является фундаментальным параметром для оценки последствий аварии для людей и окружающей среды.

Нормативно-правовая среда и промышленные ожидания в разных странах различаются. Однако существует явное сходство в отношении необходимости определения эталонной величины, называемой либо «источник выброса», либо «источник в защитной оболочке».

Цель работы – сформировать понятие «источник», основываясь на международной терминологии, описать теплогидравлические процессы в активной зоне и определить основные составляющие выброса и их химические формы.

Выполнение работы поможет в уточнении данных для усовершенствования модели, созданной с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics для моделирования пространственного распространения многокомпонентных потоков газов и радиоактивных аэрозолей под защитной оболочкой АЭС при авариях [1].

Международная терминология. Исходный термин «источник выброса» должен быть таким, чтобы у регулирующих органов и специалистов отрасли была уверенность в том, что системы защитной оболочки и связанные с безопасностью конструкции и компоненты, которые были спроектированы с использованием этого исходного термина, обеспечат приемлемый уровень безопасности. Таким образом, требуется, чтобы данный термин был репрезентативным для всех последовательностей с преобладанием риска, связанных с частичным или полным расплавлением активной зоны.

В нормативных документах Республики Беларусь нет четко сформулированного термина, применяемого в отношении выброса в пределах защитной оболочки АЭС. В Законе Республики Беларусь «О радиационной безопасности» приведен обобщенный термин «источник ионизирующего излучения – радиоактивное вещество либо радиационное устройство»¹.

В российской документации аналогичный термин раскрыт немного шире: «Источник ионизирующего излучения – радиоактивное вещество или устройство, испускающие или способные испускать ионизирующее излучение, на которые распространяется действие норм радиационной безопасности»².

В нормативных документах Республики Беларусь и Российской Федерации имеются термины «источник выделения загрязняющих веществ» и «источник выброса»³.

Источники выделения загрязняющих веществ – технологическое и иное оборудование, машины, механизмы, в которых происходит образование и от которых происходит выделение загрязняющих веществ, либо технологические процессы, при осуществлении которых происходят образование и выделение загрязняющих веществ⁴.

Источник выброса – это сооружение, техническое устройство, оборудование, которые выделяют в атмосферный воздух вредные вещества⁵. Следовательно, это любые объекты, которые распространяют в окружающий атмосферный воздух загрязняющие вещества, вредные для здоровья людей и природы.

В 1999 г. Международным агентством по атомной энергии был разработан технический документ IAEA-TECDOC-1127 [2], который описывает упрощенный подход для оценки источника выброса. Согласно [2], исходный термин включает в себя временные рамки, доли (фракции), состав продуктов деления, выбрасываемых в защитную оболочку во время тяжелой аварии, и их поведение во взвешенном состоянии в атмосфере защитной оболочки. Этот термин следует использовать при решении следующих задач:

- 1) определение способности контейнера к удержанию продуктов деления;
- 2) оценка внешних последствий в сопоставлении с критериями приемлемости;

¹ О радиационной безопасности: Закон Респ. Беларусь, 18 июня 2019 г., № 198-З // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=h11900198> (дата обращения: 25.06.2025).

² Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПин 2.6.1.2523-09. URL: <https://www.ntcexpert.ru/documents/docs/nrb-99-2009.pdf> (дата обращения: 25.06.2025).

³ Об охране атмосферного воздуха: Федер. закон от 4 мая 1999 г. № 96-ФЗ // КонсультантПлюс. Россия: справ. правовая система. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22971 ; О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране атмосферного воздуха»: Федер. закон от 13 июня 2023 г. № 255-ФЗ // Там же. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_449482 ; Об охране атмосферного воздуха: Закон Респ. Беларусь 16 дек. 2008 г. № 2-З // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=H10800002> (дата обращения: 25.06.2025).

⁴ Об охране атмосферного воздуха: Закон Респ. Беларусь от 16 дек. 2008 г. № 2-З.

⁵ Об охране атмосферного воздуха: Федер. закон от 4 мая 1999 г. № 96-ФЗ.

- 3) проектирование некоторых систем защитной оболочки;
- 4) проведение экологической экспертизы и оценки живучести ключевых компонентов;
- 5) обеспечение адекватной защиты от прямого излучения для персонала в блочном щите управления (БЩУ) и в других местах, куда имеется доступ.

Термин «источник» будем принимать как некую величину, представляющую физическую и химическую форму, а также учитывающую время выброса продуктов деления и других аэрозолей из материалов активной зоны и бетона в атмосферу первичной защитной оболочки или в бассейн выдержки. Таким образом, источник представляет собой материал, который выбрасывается в защитную оболочку как из контура теплоносителя реактора, так и из источников вне корпуса.

В свою очередь источник в защитной оболочке – это переносимая по воздуху радиоактивность и ее физико-химическая форма в атмосфере первичной защитной оболочки в зависимости от времени. Таким образом, данный термин представляет собой радиоактивность, которая может быть высвобождена из первичной защитной оболочки, и ее поведение в защитной оболочке.

Важнейшим барьером на пути выхода продуктов деления в окружающую среду является защитная оболочка. Для смягчения последствий тяжелых аварий важно, чтобы защитная оболочка сохраняла свою способность служить эффективным барьером. Активности продуктов деления в защитной оболочке и эффективность систем безопасности должны приводить к приемлемым радиологическим последствиям, как определено в [3] для станций нового поколения.

Химический состав. Химические формы продуктов деления и радионуклиды, которые могут выделяться из активных зон современных легководных реакторов, должны быть аналогичны тем, которые применимы к существующим легководным реакторам. В [4] приведены данные об измеренной активности некоторых радионуклидов в теплоносителе реактора типа ВВЭР-440 и их вкладе в дозу. Анализируя эти данные, стоит обратить внимание на следующие вносящие большой вклад в дозу радионуклиды: ^{110m}Ag , ^{60}Co , ^{58}Co , ^{54}Mn . Вклад изотопа ^{16}N в активность теплоносителя, который образуется в реакторе в результате активации кислорода в воде быстрым потоком нейтронов ($^{16}\text{O}(\text{n},\text{p})\text{ }^{16}\text{N}$), является основным источником γ -излучения в первом контуре реактора.

Активность теплоносителя первого контура обусловлена продуктами деления, активации и коррозии.

Продукты деления. Стабильные и некоторые радиоактивные продукты деления, находясь в поле нейтронов работающего реактора, захватывают тепловые нейтроны, образуя новые радионуклиды и новые радиоактивные цепочки. В зависимости от физико-химического состояния и особенностей поведения в технологических системах АЭС и окружающей среде продукты деления классифицируются следующим образом [5]:

- 1) благородные газы (аргон, криpton, ксенон);
- 2) летучие/слаболетучие вещества (йод, цезий);
- 3) тритий и углерод;
- 4) нелетучие вещества (лантан, стронций, рубидий и др.).

Продукты активации. Нейтронное облучение некоторой части оборудования контура вызывает образование и накопление радиоактивных продуктов неосколочного происхождения. На АЭС с реакторами, охлаждаемыми водой высокой степени очистки, основная активность теплоносителя образуется в результате активации кислорода воды. При этом образуются радионуклиды ^{16}N , ^{13}N , ^{18}F , которые являются β - и γ -излучателями. Кроме того, возможна активация примесей, недостаточно полно удаленных в процессе водоподготовки. Это изотопы ^{23}Na , ^{41}K , ^{27}Al , ^{40}Ar [5].

Продукты коррозии. Весьма важным источником активности теплоносителя всех реакторов являются продукты коррозии. Данные радионуклиды образуются в материалах активной зоны, внутрикорпусных устройств, в теплоносителе первого контура, и их перечень определяется преимущественно элементным составом материалов, контактирующих с теплоносителем первого контура. Основная доля радионуклидов, определяющих радиационную обстановку за счет отло-

жений продуктов коррозии на внутренних поверхностях контура, приходится на изотопы ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{58}Co , ^{59}Fe .

Все внутрикорпусные устройства, находящиеся в поле нейтронов, сохраняют длительное время наведенную активность и представляют собой источники повышенной опасности при демонтаже, обслуживании и ремонте [5].

Радионуклиды, которые могут оказывать значимое воздействие на окружающую среду при работе АЭС и других предприятий ядерного топливного цикла, принято называть биологически значимыми радионуклидами. При нормальной работе АЭС к группе биологически значимых газообразных нуклидов относят те, период полураспада которых превышает несколько минут. С точки зрения радиационной опасности для персонала АЭС и населения, кроме нуклидов криптона, ксенона и йода, наибольшее значение имеют радионуклиды ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{144}Ce и др.

К наиболее распространенным и биологически значимым для человека и живой природы радионуклидам техногенного происхождения (с точки зрения оценки опасности) специалисты относят ^{137}Cs . Для этого нуклида характерны высокий выход при делении ^{235}U и период полу-распада, соизмеримый с продолжительностью жизни человека (30,05 лет) [6]. При распаде ^{137}Cs образуются электроны с энергиями до 1,17 МэВ и γ -кванты в основном с энергией 662 кэВ. Таким образом, ^{137}Cs со своим дочерним изотопом может создавать дозы как внешнего, так и внутреннего облучения различных объектов. Совокупность перечисленных характеристик этого радионуклида и обуславливает его выбор в качестве реперного [6].

Моделирование аварийного сценария. Для анализа динамики распространения радиоактивных веществ используются математические модели, основанные на уравнениях конвекции, диффузии и реакционной способности и проч. [7].

Главной задачей при моделировании реальных процессов является решение мультифизической задачи, сочетающей несколько взаимосвязанных физических процессов в одной модели. Используя моделирование на основе уравнений, можно работать с функциями, содержащими общие переменные. При этом средства моделирования предоставляют возможность вносить любые изменения в набор и настройки используемых в расчете модулей (режимов).

Моделирование проводилось с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics, имеющего несколько режимов. Каждый режим соответствует определенному физическому процессу (например, теплопередаче) или набору уравнений (к примеру, уравнения Навье–Стокса). После определения геометрии необходимо выбрать режим моделирования и задать в полях редактирования свойства материалов и ограничения. Для моделирования нескольких физических процессов достаточно выбрать дополнительные режимы и добавить их к уже существующим режимам.

Модули COMSOL Multiphysics предоставляют дополнительные режимы моделирования и удобную рабочую среду. Модули используют стандартную терминологию, библиотеки материалов, специализированные решатели и графические инструменты – в соответствии с областью применения. В то же время модули полностью интегрируются с COMSOL Multiphysics и друг с другом.

При различных категориях аварий выбрасываются преимущественно йод и цезий в виде аэрозольных частиц размером до 1 мм. Процесс осаждения радиоактивных веществ на характерные поверхности внутри АЭС зависит также и от состояния шероховатости и наличия смоченной поверхности. Предполагается, что в случае образования смоченной поверхности все аэрозольные частицы осядут на нее. Эффективность осаждения аэрозолей на твердой поверхности определяется структурой потока и свойствами аэрозоля.

Расчетная оценка начинается с определения сценария аварии. Авторами был рассмотрен сценарий с потерей теплоносителя первого контура. Данное событие может привести к расплавлению топлива и выбросу продуктов деления.

Для моделирования этого процесса, как правило, используются математические модели, учитывающие направление и скорость выброса; температурные градиенты; конфигурацию реакторного зала и защитной оболочки; наличие физических препятствий.

В данной работе в рамках формализованных шаблонов программного пакета COMSOL Multiphysics для моделирования были использованы следующие модули¹:

Heat Transfer in Fluids (ht) – теплопередача в жидкостях. Используется для моделирования теплопередачи в жидкостях посредством проводимости, конвекции и излучения;

Transport of Diluted Species (tds) – перенос разбавленных веществ. Применяется для расчета поля концентрации разбавленного растворенного вещества в растворителе. Транспорт и реакции веществ, растворенных в газе, жидкости или твердом теле, могут обрабатываться с помощью этого интерфейса. Движущими силами для транспорта могут быть диффузия по закону Фика, конвекция в сочетании с полем потока и миграция в сочетании с электрическим полем;

LES Smagorinsky (spf). Уравнения, решаемые интерфейсом LES Smagorinsky, представляют собой уравнение непрерывности для сохранения массы и уравнение Навье–Стокса, дополненное членом турбулентной вязкости.

Динамика распространения источника радиоактивных веществ. В рамках исследования авторами рассмотрена авария с потерей теплоносителя первого контура. Геометрические размеры расчетной области соответствовали проектным характеристикам реакторов типа ВВЭР-1200. В расчетную область включены основные элементы гермообъема. При расчете также учитывался теплосъем через систему пассивного отвода тепла из-под защитной оболочки. Задавались следующие параметры: диаметр течи – 50 мм, начальная температура истекающей жидкости – 400 К, максимальная скорость выброса – 15,8 м/с, давление внутри защитной оболочки – 101 325 Па.

Принятый нами термин «источник» учитывает физические и химические формы продуктов деления и радионуклидов, которые могут выделяться из активной зоны реактора. Следовательно, при моделировании процессов, протекающих внутри защитной оболочки при авариях, важно учитывать не только характеристики и свойства парогазового потока, но и присутствующие в нем продукты деления, активации и коррозии и их физико-химические свойства. В качестве одного из условий моделируемой аварии в замкнутом пространстве под оболочкой АЭС рассматривался многокомпонентный газовый поток с примесью аэрозольных частиц. Относительная концентрация компонентов принята следующей: водород – 5 %, водяной пар – 85 %, инертные газы – 6 % криптона и 4 % ксенона. Скорость осаждения аэрозольных частиц принята равной 0,02 м/с.

В результате численного моделирования системы уравнений многомерных уравнений сохранения и учета замыкающих соотношений для компонентов смеси получены газодинамические характеристики турбулентного потока в замкнутом объеме.

На рис. 1 отображено пространственное распространение относительной концентрации аэрозольных частиц и область их осаждения, время расчета – 300 с после начала аварии. На рис. 2 представлены результаты пространственного распределения относительной концентрации водяного пара и водорода. Красными линиями на рисунке обозначено направление поля скоростей. Время расчета составило 2000 с.

Анализируя полученные результаты численного моделирования, можно отметить следующее: несмотря на достаточно высокую максимальную горизонтальную скорость в первые секунды струйного выброса, регистрируется подъем компонента водорода сразу вверх, а не вдоль начального направления. Такой эффект фиксируется и в ряде экспериментальных наблюдений. С увеличением времени моделирования наблюдается стратификация компонентов газовой смеси. Водород как наиболее легкий газовый компонент скапливается преимущественно в верхней части оболочки. Было установлено, что на относительно высоких скоростях истечения газового потока приемлемая сходимость численных результатов достигалась только при использовании метода LES с подсеточной моделью Смагоринского. Осаждение аэрозольных частиц происходило на всех поверхностях, находящихся на пути движения потока.

На основе анализа полученных физически непротиворечивых данных можно сделать вывод, что результаты данного исследования могут служить основой для дальнейшего совершенство-

¹ User's Guide COMSOL Multiphysics. URL: <https://doc.comsol.com/6.3/docserver/#!com.comsol.help.comsol/helpdesk/helpdesk.html> (date of access: 03.02.2025).

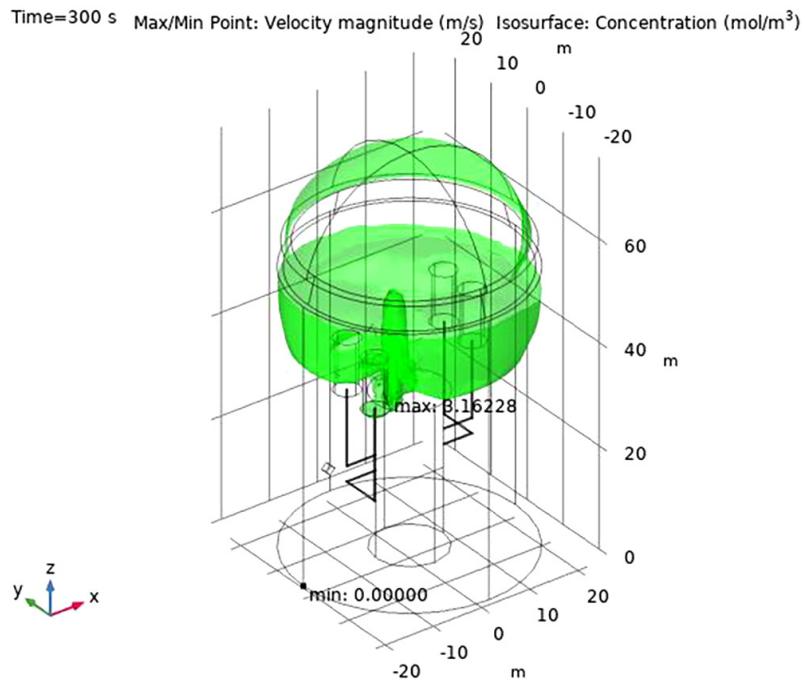


Рис. 1. Пространственное распределение относительной концентрации аэрозольных частиц
 Fig. 1. Spatial distribution of the relative concentration of aerosol particles

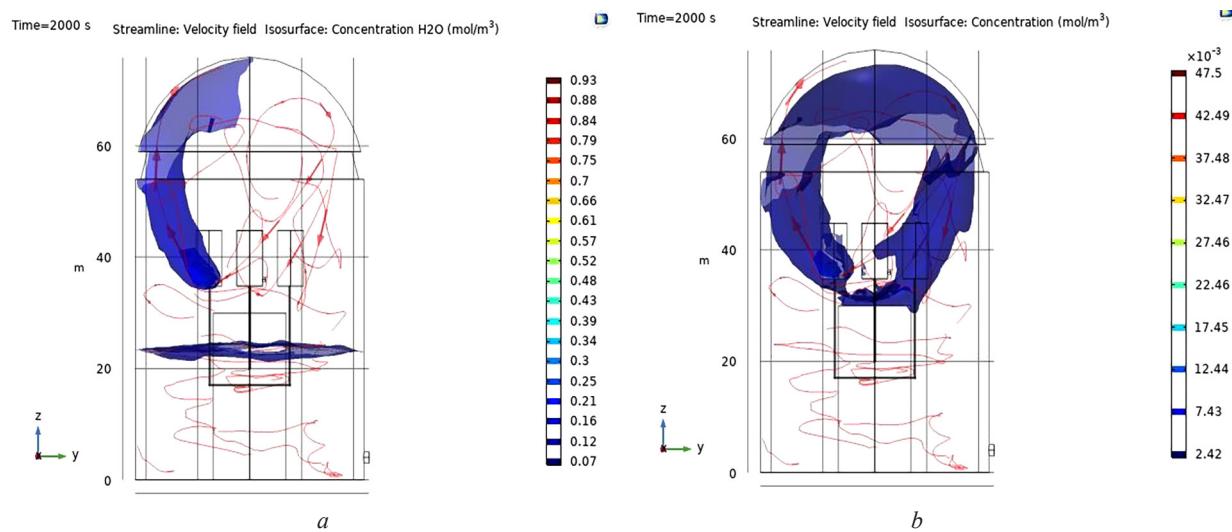


Рис. 2. Пространственное распределение относительной концентрации водяного пара (а) и водорода (б).
 Время расчета – 2000 с

Fig. 2. Spatial distribution of relative concentration of water vapor (a) and hydrogen (b).
 Time of calculation – 2000 s

вания предложенной модели и программных модулей для анализа аварийных ситуаций на современных АЭС. Разработанный механизм моделирования движения многокомпонентных газов и аэрозолей внутри защитной оболочки АЭС-2006 позволит улучшить существующие модели и повысить безопасность реакторов.

Заключение. Исходя из нормативных документов термин «источник» определен как величина, представляющая физическую и химическую форму, а также учитывающая время выброса продуктов деления и других аэрозолей из материалов активной зоны и бетона в атмосферу первичной защитной оболочки или в бассейн выдержки.

Химические формы продуктов деления, которые могут выбрасываться из активной зоны реактора, для будущих конструкций, вероятно, будут такими же, как и для нынешних конструкций.

ций активной зоны. Все продукты деления должны быть сконденсированы до входа в атмосферу защитной оболочки, за исключением инертных газов и небольшой доли йода. Таким образом, для получения члена источника в защитной оболочке все неблагородные газы и продукты деления в атмосфере первичной защитной оболочки можно считать присутствующими в виде аэрозолей.

В ходе работы выполнено моделирование турбулентного газового потока в гермообъеме с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics методом LES с подсеточной моделью Смагоринского. Получены физически непротиворечивые результаты, что указывает на корректную работу модели. Создан механизм для анализа распространения многокомпонентных потоков внутри защитной оболочки АЭС. Теплогидравлические алгоритмы необходимо использовать вместе с автономной моделью продуктов деления или аэрозоля для прогнозирования выброса из активной зоны.

Не существует уникальной последовательности, которая приводит к ограничению выброса продуктов деления. В случае выброса в защитную оболочку продуктов деления и их поведения в защитной оболочке предложен разумно ограничивающий метод. Численные значения не приводятся, но принят параметрический подход, который позволит оценить исходный термин «источник» в защитной оболочке.

Список используемых источников

1. Мороз, И. О. Моделирование распространения многокомпонентных потоков газов и радиоактивных аэрозолей под оболочкой АЭС / И. О. Мороз, А. Г. Трифонов // XVI Минский международный форум по тепло- и массообмену: тез. докл. и сообщений. – Минск, 2022. – С. 408–412.
2. A simplified approach to estimating reference source terms for LWR designs: IAEA-TECDOC-1127. – Vienna: IAEA, 1999. – 73 p. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1127_prn.pdf
3. Development of Safety Principles for the Design of Future Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-801. – Vienna: IAEA, 1995. – 64 p. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_801_web.pdf
4. Воронин, Л. М. Некоторые вопросы радиационной безопасности АЭС с ВВЭР-440 / Л. М. Воронин, А. П. Волков, В. Ф. Козлов // Атомная энергия. – 1976. – Т. 41, вып. 4. – С. 235–238.
5. Характеристика продуктов аварии при радиоактивном загрязнении местности при авариях на АЭС и других РОО / П. В. Данилов, К. В. Жиганов, А. В. Пронин, Е. С. Титова // Молодой ученый. – 2017. – № 15 (149). – С. 35–38.
6. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома / под общ. ред. И. И. Линге, И. И. Крышева. – М.: САМ полиграфист, 2015. – 296 с.
7. Жуков, В. Т. Математическая модель течения многокомпонентной смеси газов с учетом возможности возникновения жидкой фазы / В. Т. Жуков, Ю. Г. Рыков, О. Б. Феодоритова. – М.: Ин-т приклад. математики им. М. В. Келдыша, 2018. – 36 с. – (Препринт/ ИПМ им. М. В. Келдыша. 2018. № 183).

References

1. Moroz I. O., Trifonov A. G. Modeling of the distribution of multicomponent flows of gases and radioactive aerosols under the NPP shell. *XVI Minskii mezhdunarodnyi forum po teplo- i massoobmenu Tezisy dokladov i soobshchenii dopolnitel'noe izdanie* [XVI Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer: Abstracts of Reports and Messages]. Minsk, 2022, pp. 408–412 (in Russian).
2. IAEA. *A simplified approach to estimating reference source terms for LWR designs: IAEA-TECDOC-1127*. Vienna, 1999. 73 p. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1127_prn.pdf
3. IAEA. *Development of Safety Principles for the Design of Future Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-801*. Vienna, 1995. 64 p. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_801_web.pdf
4. Voronin L. M., Volkov A. P., Kozlov V. F. Problems of radiation safety in nuclear power stations containing VVER-440 reactors. *Atomic Energy*, 1976, vol. 41, iss. 4, pp. 867–870. <https://doi.org/10.1007/bf01118775>
5. Danilov P. V., Zhiganov K. V., Pronin A. V., Titova E. S. Characteristics of accident products during radioactive contamination of the area during accidents at nuclear power plants and others RHO. *Molodoi uchenyi* [Young Scientist], 2017, no. 15 (149), pp. 35–38 (in Russian).
6. Linge I. I., Kryshev I. I. (eds.). *Radioecological Situation in the Regions where Rosatom Enterprises are Located*. Moscow, SAM poligrafist Publ., 2015. 296 p. (in Russian).
7. Zhukov V. T., Rykov Yu. G., Feodoritova O. B. *Mathematical Model of the Flow of a Multicomponent Mixture of Gases, Taking into Account the Possibility of the Emergence of a Liquid Phase*. Moscow, Keldysh Institute of Applied Mathematics, 2018. 36 p. (in Russian).