ВЕСЦІ нацыянальнай акадэміі навук беларусі

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2025. Т. 70, №2

ИЗВЕСТИЯ национальной академии наук беларуси

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2025. Т. 70, №2

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

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

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

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

Главный редактор

Сергей Антонович Чижик –

Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Редакционная коллегия

- С. С. Щербаков Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь (заместитель главного редактора)
- И. А. Старостина (ведущий редактор журнала)
- Д. Басаран Университет Буффало, Буффало, Соединенные Штаты Америки
- **П. А. Витязь** Управление аэрокосмической деятельности аппарата Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

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

- **В. Г. Залесский** Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- **В. В. Зильбершми**дт 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. Ласковнёв** Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. М. Маляревич Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь
- В. П. Маркевич Институт фотоники Университета г. Манчестер, Манчестер, Великобритания
- **Н. А. Махутов** Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация
- **В. В. Митюшев** Краковский политехнический университет им. Тадеуша Костюшко, Краков, Республика Польша
- **Н. К. Мышкин** Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь
- **Нгуен-Ву Тронг** Национальный институт прикладной механики и информатики Вьетнамской академии наук и технологий, Хошимин, Социалистическая Республика Вьетнам
- С. В. Панин Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Российская Федерация
- О. Г. 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 Беларуси по материаловедению, Минск, Республика Беларусь
- **М. Л. Хейфец** Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Шуньин Цзи Совместный институт Даляньского политехнического университета и Белорусского государственного университета, Далянь, Китайская Народная Республика

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

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2025. Т. 70, №2

Выходит на русском, белорусском и английском языках

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

Подписано в печать 20.06.2025. Выход в свет 27.06.2025. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 58 экз. Заказ 127. Цена номера: индивидуальная подписка – 14,48 руб., ведомственная подписка – 33,64 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013. ЛП № 02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220084, г. Минск, Республика Беларусь

© Оформление. РУП «Издательский дом «Беларуская навука», Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2025

PROCEEDINGS of the national academy of sciences of belarus

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2025, vol. 70, no. 2

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

Issued four times a year

Founder is the National Academy of Sciences of Belarus

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

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

> > Editor-in-Chief

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

Editorial Board

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

Irina A. Starostsina (lead editor)

- Cemal Basaran University of Buffalo, Buffalo, United States of America
- **Pyotr A. Vityaz** Department of Aerospace Activities of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
- Zefeng Wang Southwest Jiaotong University, Chengdu, People's Republic of China
- Vitali G. Zalesski Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
- Vadim V. Silberschmidt International Centre of Vibro-Impact Systems, Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering at Loughborough University, Loughborough, United Kingdom
- Aliaksandr Ph. Ilyshchanka State Scientific and Production Association of Powder Metallurgy -

Academician O. V. Roman Institute of Powder Metallurgy, Minsk, Republic of Belarus

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

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

- Sergei M. Kostromitsky Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
- Alexander G. Kravtsov Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
- Leonid G. Krasnevski Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

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

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

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS. Physical-technical series, 2025, vol. 70, no. 2

Printed in Russian, Belarusian and English languages

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

It is sent of the press 20.06.2025. Appearance 27.06.2025. Format $60 \times 84^{1/8}$. Offset paper. The press digital. Printed pages 10,23. Publisher's signatures 11,3. Cir culation 58 copies. Order 127. Number price: individual subscription – 14,48 byn., departmental subscription – 33,64 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.

> © Formalization. RUE "Publishing House "Belaruskaya navuka", Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Антонов А. С., Прокопчук Н. Р., Клочко П. В., Нахват Д. В. Разработка функциональных полимерных	
покрытий для узлов трения автомобильных агрегатов	95
Гурецкий С. А., Карпинский Д. В., Труханова Е. Л., Новицкий Н. Н. Технологические параметры	
выращивания монокристаллов КҮ _{1-х} Үb _х (WO ₄) ₂ модифицированным методом Чохральского	105
Рева О. В., Богданова В. В., Шукело З. В., Кобец О. И. Обеспечение водостойкости поверхностной	
огнезащиты полиэфирных текстильных материалов различной плотности обработкой неорганическими	
составами	111
Чекулаев А. В., Бородавко В. И., Витязь П. А. Получение алюминиево-магниевых сплавов с улуч-	
шенными свойствами при их кристаллизации в условиях высоких центробежных сил	124

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

Пинчук В. В., Гинзбург А. А., Гурбан О. К. Оптимизация параметров соединительно-монтажных	
модулей при конструировании гидроблоков управления машин	136

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

Василевич С. В., Дегтеров Д. В., Юхневич С. Д. Кинетика термического разложения гексафторсиликата	
натрия в изотермических условиях	145

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Хмарский П. А. Обобщенная методика оптимизации параметров траекторных измерителей координат	
и параметров движения в системах мониторинга воздушной и наземной обстановки (на английском языке)	159

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

Петкевич М. Н., Юшкевич В. Ю. Разработка и машинное обучение многокритериальной модели рас	-
пределения дозы ионизирующего излучения в системе планирования лечения Eclipse	. 166

CONTENTS

MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

Antonov A. S., Prokopchuk N. R., Klochko P. V., Nakhvat D. V. Development of functional polymer coatings	
for friction components in automotive assemblies	95
Guretskii S. A., Karpinsky D. V., Trukhanova K. L., Novitskii N. N. Technological parameters of growing	
$KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$ single crystals by the modified Czochralski method	105
Reva O. V., Bogdanova V. V., Shukelo Z. V., Kobets O. I. Providing water resistance of surface fire protection	
of polyester textile materials of various density by treatment with inorganic compositions	111
Chekulayeu A. V., Baradavka V. I., Vityaz P. A. Production of aluminum-magnesium alloys with improved	
properties during their crystallization under conditions of high centrifugal forces	124

MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

Pinchuk V. V., Ginzburg A. A., Gurban O. K. Optimization of parameters of connecting and mounting modules	
in the design of hydraulic control units of machines	136

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

Vasilevich S. V., Degterov D. V., Yukhnevich S. D. Kinetics of thermal decomposition of sodium hexafluorosili-	
cate under isothermal conditions	145

RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

Khmarskiy P. A. Generalized technique for optimizing tracking the parameters of estimators of coordinates and	
motion parameters in air and ground situation monitoring systems	159

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

Pietkevich M. N., Yushkevich V. Yu. Development and machine learning of a multi-criteria ionizing radiation	
dose distribution model in the Eclipse treatment planning system	166

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-95-104 УДК 004.925.84:544.023.26:621.825.63

Оригинальная статья

А. С. Антонов^{1*}, Н. Р. Прокопчук², П. В. Клочко¹, Д. В. Нахват¹

 ¹Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, ул. Ожешко, 22, 230023, Гродно, Республика Беларусь
 ²Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Аннотация. Рассмотрены физико-химические, структурные и конструкционные условия моделирования и оптимизации триботехнических покрытий на основе полиамидов в узлах трения автомобильных и специальных агрегатов. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов карданной передачи, осуществленный в CAE-системах Pro/ENGINEER Mechanica и LS-DYNA, позволил установить оптимальную толщину триботехнического покрытия с минимальными напряжениями. Разработаны составы композиционных материалов на основе промышленно выпускаемого полиамида ПА-6 и адгезионного подслоя для формирования триботехнических покрытий на деталях карданного вала грузового автомобиля и специальной техники. Предложено в состав композиционного материала вводить полиамидную смолу на основе аминоамидов смоляных кислот канифоли, которая обладает высокой совместимостью с полиамидной матрицей, обеспечивает пластифицирующий эффект и равномерное распределение дисперсных частиц модификатора по объему композита. При использовании полиамидной смолы в качестве адгезионного подслоя на поверхностях элементов карданной передачи обеспечивается повышенное взаимодействие на границе «покрытие – подслой». Разработанные составы композиционных покрытий и адгезионных подслоев, оптимизированные по конструктивным решениям, апробированы в конструкциях карданных валов, производимых ОАО «Белкард» в качестве полноценной альтернативы импортным аналогам.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, метод конечных элементов, функциональное покрытие, композиционный материал, полиамид, карданный вал

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2024–2025 годы, задание 8.4.1.51 «Концепт многоуровневого модифицирования в материаловедении и технологии нанокомпозитов на основе смесей термопластов».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Антонов Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и ресурсосберегающих технологий Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. https://orcid.org/0000-0002-6155-4635. E-mail: antonov.science@gmail.com; Прокопчук Николай Романович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов Белорусского государственного технологического университета. https://orcid.org/0000-0001-7290-1199. E-mail: nrprok@gmail.com; Клочко Павел Валентинович – магистр педагогических наук, начальник цикла тактических дисциплин военного факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. https://orcid.org/0009-0007-1285-140X. E-mail: klochko_pv@grsu.by; Haxват Денис Викторович – магистр педагогических наук, начальник кафедры тылового обеспечения военного факультета, аспирант кафедры материаловедения и ресурсосберегающих технологий инженерного факультета Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. https://orcid.org/0009-0006-5301-5339. E-mail: naxvat_dv@grsu.by

(cc) BY 4.0

^{*} Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Вклад авторов: Антонов Александр Сергеевич – разработка методологии исследования, создание модели исследования, компьютерное моделирование, интерпретация результатов исследования, написание и оформление текста рукописи; Прокопчук Николай Романович – обоснование концепции исследования, интерпретация результатов, редактирование текста рукописи, формулировка выводов; Клочко Павел Валентинович – компьютерное моделирование, подготовка образцов, проведение исследования параметров деформационно-прочностных и адгезионных характеристик полимерных композитов; Нахват Денис Викторович – сбор и систематизация данных, подготовка образцов, проведение исследования параметров триботехнических характеристик полимерных композитов.

Для цитирования: Разработка функциональных полимерных покрытий для узлов трения автомобильных агрегатов / А. С. Антонов, Н. Р. Прокопчук, П. В. Клочко, Д. В. Нахват // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларуси. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 2. – С. 95–104. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-95-104

Поступила в редакцию: 15.08.2024 Доработанный вариант: 02.05.2025 Утверждена к публикации: 12.06.2025 Подписана в печать: 19.06.2025

Original article

Alexander S. Antonov^{1*}, Nikolay R. Prokopchuk², Pavel V. Klochko¹, Denis V. Nakhvat¹

¹Yanka Kupala State University of Grodno 22, Ozheshko St., 230023, Grodno, Republic of Belarus ²Belarusian State Technological University, 13a, Sverdlov St., 220006, Minsk, Republic of Belarus

DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL POLYMER COATINGS FOR FRICTION COMPONENTS IN AUTOMOTIVE ASSEMBLIES

Abstract. Physico-chemical, structural and engineering prerequisites of modeling and optimization of tribological coatings based on polyamides in friction units of automobile and special units are considered. The analysis of the stress-strain state of the elements of the cardan transmission, carried out in CAE-systems Pro/ENGINEER Mechanica and LS-DYNA, allowed establishing the optimal thickness of tribological coating with minimum stresses. Composite materials based on commercially available polyamide PA-6 and adhesive sublayer for formation of tribological coatings on parts of the cardan shaft of trucks and special equipment are developed. It is proposed to introduce a polyamide resin based on aminoamides of resin acids of rosin, which has high compatibility with the polyamide matrix, provides plasticizing effect and uniform distribution of dispersed particles of modifier over the composite volume. When polyamide resin is used as an adhesive sublayer on the surfaces of the cardan transmission elements, increased interaction at the boundary "coating – sublayer" is provided. The developed composite coatings and adhesive sublayers, optimized by design solutions, have been tested in the cardan shafts produced by Belkard OJSC as a full-fledged alternative to imported analogues.

Keywords: computer modeling, finite element method, functional coating, composite material, polyamide, cardan shaft Acknowledgments: the work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Belarus within the framework of the State Scientific Research Program "Materials science, new materials and technologies" for 2024–2025, task 8.4.1.51 "Concept of multilevel modification in materials science and technology of nanocomposites based on thermoplastic mixtures".

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

Information about the authors: Alexander S. Antonov – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Materials Science and Resource-Saving Technology Department at Yanka Kupala State University of Grodno. https://orcid.org/0000-0002-6155-4635. E-mail: antonov.science@gmail.com; Nikolay R. Prokopchuk – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Professor of Polymer Composite Materials Department at Belarusian State Technological University. https://orcid.org/0000-0001-7290-1199. E-mail: nrprok@gmail.com; Pavel V. Klochko – Master of Sciences (Pedagogy), Head of the Cycle of Tactical Disciplines of the Military Faculty at Yanka Kupala State University of Grodno. https://orcid.org/0009-0007-1285-140X. E-mail: klochko_pv@grsu.by; Denis V. Nakhvat – Master of Sciences (Pedagogy), Head of the Military Logistics Department of the Military Faculty, Postgraduate Student of Materials Science and Resource-Saving Technology Department of the Engineering Faculty at Yanka Kupala State University of Grodno. https://orcid.org/0009-0007-1285-140X. E-mail: klochko_pv@grsu.by; Denis V. Nakhvat – Master of Sciences (Pedagogy), Head of the Military Logistics Department of the Military Faculty, Postgraduate Student of Materials Science and Resource-Saving Technology Department of the Engineering Faculty at Yanka Kupala State University of Grodno. https://orcid.org/0009-0006-5301-5339. E-mail: naxvat_dv@grsu.by

Contribution of the authors: Alexander S. Antonov – methodology, model development, computer simulation, interpretation of the results, writing and formatting of the text of the manuscript; Nikolay R. Prokopchuk – conceptualization, interpretation of the results, review and editing, supervision; Pavel V. Klochko – computer simulation, sample preparation, investigation of the stress-strain and adhesion properties of the polymer composites; Denis V. Nakhvat – analysis and generalization of literature data, sample preparation, investigation of the tribological properties of the polymer composites.

For citation: Antonov A. S., Prokopchuk N. R., Klochko P. V., Nakhvat D. V. Development of functional polymer coatings for friction components in automotive assemblies. *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. 2, pp. 95–104 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-95-104

Received: 15.08.2024 *Modified:* 02.05.2025 *Approved for publication:* 12.06.2025 *Signed to the press:* 19.06.2025 **Введение.** В современном машиностроении широко применяют карданные передачи, предназначенные для передачи крутящего момента между элементами агрегатов, имеющими в процессе эксплуатации относительные перемещения [1–5]. При проектировании и расчете карданной передачи следует знать, в какие эксплуатационные условия будет поставлена разрабатываемая конструкция, определить все виды действующих нагрузок не только по величине, но и по времени их действия. Для надежной эксплуатации транспортного средства или специальной техники необходимо, чтобы карданная передача не выходила из строя по причине преждевременной поломки ее деталей (обладала заданными параметрами прочности) или их изнашивания (имела определенный срок службы). Таким образом, при конструировании карданных передач используют два вида расчетов: на прочность и на износ.

В традиционных методиках расчета вызывает сложность прочностной расчет, поскольку качество карданной передачи определяется не столько ее статическими характеристиками, сколько динамическими. Переход к расчету карданных валов на прочность с помощью компьютерных методов инженерного анализа предполагает прежде всего максимальную оптимизацию конструкции, то есть снижение расхода металла с одновременным его перераспределением для повышения прочности.

В современных конструкциях карданных передач, применяемых в автотракторном машиностроении и специальной технике, используют функциональные покрытия, наносимые на подвижные элементы с целью снижения нагрузок, действующих на передачу в момент запуска и остановки, а также снижающие потери на трение и интенсивность изнашивания при установившемся режиме эксплуатации [3–5]. К числу распространенных функциональных покрытий элементов карданных передач относятся покрытия на основе алифатических полиамидов, оказывающие многофакторное действие на работоспособность элементов при различных условиях эксплуатации [4, 5].

Целью настоящего исследования являлась оптимизация геометрических размеров функционального покрытия на элементах карданной передачи с использованием компьютерных технологий и разработка составов и технологии композиционных материалов на основе алифатических полиамидов для его формирования.

Методика исследований. Объектом исследования было выбрано шлицевое соединение конструкции карданного вала, применяемого для комплектации грузовых автомобилей и специальной техники.

Подвижные шлицевые соединения карданного вала изготавливают с многофункциональным покрытием на основе алифатических полиамидов [3–5]. В качестве модельных покрытий использовали покрытие на основе полиамида 11 (Rilsan[®]) фирмы Elf Atochem (Франция), широко применяемого в настоящее время в конструкциях карданных передач, и полиамида-6 (ПА-6), промышленно выпускаемого на филиале «Завод Химволокно» ОАО «Гродно Азот»¹. Покрытие формировали из псевдоожиженного слоя, осаждая порошкообразный продукт с размером частиц 80–200 мкм на подготовленную поверхность, содержащую слой адгезива типа Primgreen. После формирования полученное покрытие подвергали механической обработке с целью достижения заданных размеров, соответствующих технической документации.

Для построения геометрии и определения оптимальной технологии сборки элементов карданной передачи использовали CAD-модуль интегрированной системы автоматизированного моделирования Pro/ENGINEER Wildfire 5.0, который обеспечивает сквозной процесс проектирования, инженерного анализа и подготовки производства изделий любой сложности и назначения, включая создание интерактивной документации и обмен данными с другими системами.

Анализ напряженно-деформированного состояния элементов карданной передачи осуществляли в CAE-модуле Pro/ENGINEER Mechanica, реализующем метод конечных элементов. Для расчета напряженно-деформированного состояния элементов шлицевого соединения были заданы параметры прочностных и теплофизических характеристик материалов, соответствующих значениям характеристик стали 45 для элементов втулки и вала, а также ПА-6 и ПА-11 (полиамид-11) марки Rilsan[®] (концерн Arkema) – для покрытия. Динамический анализ проводили

¹ «GRODNAMID 27» (относительная вязкость – 2,70±0,04) по ТУ РБ 500048054.009-2001.

на основе параллельных высокопроизводительных вычислений с помощью кластерных суперкомпьютерных конфигураций семейства «СКИФ» в многоцелевой многопроцессорной программной системе конечно-элементного анализа LS-DYNA версии 970. Для реализации параллельных вычислений применяли суперкомпьютерную установку ВМ 5100, которая представляет собой 16-узловой опытный образец ЭКСС КУ с топологией двумерного тора в следующей конфигурации: 16 узлов в конструктиве 1U (каждый узел содержит двухпроцессорную системную плату Intel[®]SCB2, два микропроцессора Pentium III 1,4 Ггц, оперативную память объемом 1024 Мбайт, жесткий диск SCSI объемом 18 Гбайт, два встроенных сетевых адаптера Fast Ethernet, высокоскоростной адаптер SCI PCI-64/66 D335), коммутатор сети Fast Ethernet, управляющая машина. Базовая операционная система для управляющей ЭВМ и вычислительных узлов – Linux Fedora Core 2.

Подготовку технической документации на оптимизированную конструкцию карданной передачи в соответствии с требованиями ЕСКД осуществляли в среде объектно-ориентированного пакета дву- и трехмерного геометрического моделирования AutoCAD Mechanical 2023 [6, 7].

Результаты и их обсуждение. Функциональные покрытия на основе полимерных матриц позволяют усовершенствовать конструкцию карданного вала и обеспечить ее эффективную эксплуатацию в автотракторной и специальной технике [4, 5]. Для определения геометрических параметров покрытия, обеспечивающих оптимальную эксплуатацию карданного вала, были проведены модельные исследования шлицевого соединения при нанесении ПА-11 по технологии, рекомендованной его разработчиком [8].

В наших предыдущих исследованиях [9, 10] показана эффективность использования в качестве матричного компонента для формирования функциональных покрытий ПА-6 отечественного производства взамен импортного ПА-11 и влияние состава композиционного материала, технологических режимов формирования покрытий на параметры их деформационно-прочностных, адгезионных, триботехнических и защитных характеристик. Вместе с тем важным фактором, который обуславливает и эксплуатационные характеристики функциональных покрытий, формируемых на металлических субстратах, является толщина формируемого слоя. Правильно подобранная толщина обеспечивает устойчивость покрытия к деформациям и повреждениям, что способствует увеличению технического ресурса изделия. Неверно подобранная толщина приводит к образованию таких дефектов покрытия, как шагрень («апельсиновая корка»), поры, пузыри и вздутия. Кроме того, оптимизация толщины покрытия позволяет снизить расход полимерного материала, что важно с точки зрения экономии и ресурсосбережения.

В связи с этим весьма актуальной научной и практической задачей является определение оптимальных геометрических характеристик функциональных покрытий для заданных составов полимерных композиционных материалов. Для оценки и прогнозирования напряженно-деформированного состояния системы «покрытие – подложка» эффективным инструментом выступают численные методы анализа, применяемые при решении задач механики деформируемого тела методом конечных элементов, с использованием прикладных пакетов программ.

Повышение технического ресурса шлицевого соединения карданного вала – это многофакторная задача, которая обусловливает эффективность его эксплуатации. Превалирующими критериями оптимизации шлицевого соединения являются состав полимерного покрытия, определяющий прежде всего параметры деформационно-прочностных и триботехнических характеристик, и его геометрия (толщина), которая влияет на параметры ударной прочности, адгезионных характеристик и качество поверхностного слоя (шероховатость). В связи с тем что несущая способность композиционного полимерного покрытия определяется параметрами деформационно-прочностных характеристик матричного компонента, оптимизацию толщины покрытия осуществляли для материала ПА-6. Для расчета напряженно-деформированного состояния покрытия при различных значениях толщины слоя h (мм) использовали следующие параметры физико-механических характеристик материала:

модуль упругости E = 2 620 МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,34$; модуль сдвига G = 970,4 МПа; массовая плотность $\rho = 1$ 120 кг/м³; предел прочности при растяжении $\sigma_p = 90$ МПа; предел текучести $\sigma_r = 103,6$ МПа;

коэффициент теплопроводности (теплоемкость материала) $\lambda = 0,233$ Вт/(м \cdot K);

удельная теплоемкость C = 1 601 Дж/(кг · К).

Для реализации поставленной цели моделирования и оптимизации функциональных покрытий на основе алифатических полиамидов по критерию геометрических параметров (толщины) в системе Pro/ENGINEER была разработана модель шлицевого соединения. С целью снижения затрат компьютерного времени при расчете модель представляла собой 1/8 часть вала с тремя шлицами (рис. 1).

Был проведен расчет разработанной модели шлицевого соединения на статические напряжения в среде Pro/ENGINEER Mechanica, к созданной модели приложена нагрузка и установлены ограничения (рис. 2). По технической документации вал должен выдерживать момент, равный 5 500 кН · мм без разрушения. В связи с тем что модель втулки является 1/8 частью реальной детали, то нагрузку принимали равной 687,5 кН · мм.

Результат расчета (рис. 3, *a*) показал, что максимальные напряжения сосредоточены в области разделения соединения слоем покрытия. Исходя из результатов виртуальных испытаний, подтвержденных анализом локальной и глобальной чувствительности оптимизируемых параметров, была определена оптимальная толщина покрытия, равная 200 мкм, которая позволила обеспечить минимальный уровень контактных напряжений (рис. 3, *b*).



Рис. 1. 3d-Модель шлицевого соединения Fig. 1. 3d Model of splined joint



Рис. 2. Граничные условия модели шлицевого соединения Fig. 2. Boundary conditions of the splined joint model

Аналогичным образом для изучения распределения напряжения в шлицах карданной передачи с полимерным покрытием в среде LS-DYNA была смоделирована пара «шлиц втулки – шлиц вала» карданного вала. Испытания моделировались в режиме старта для моделей с различной толщиной полимерного покрытия – 100 и 200 мкм. Нами установлено, что наиболее оптимальная толщина полимерного покрытия равна 200 мкм (рис. 4), при ней возникающие напряжения минимальны. При этом выявлено, что в начальный период работы шлицевого соединения в шлицах карданной передачи наблюдаются максимальные напряжения, которые с течением времени



Рис. 3. Результат расчета напряженно-деформированного состояния шлицевого соединения в среде Pro/ENGINEER Mechanica: *a* – до оптимизации; *b* – после оптимизации
Fig. 3. The result of the calculation of the stress-strain state of the splined joint in the Pro/ENGINEER Mechanica: *a* – before optimization; *b* – after optimization



Рис. 4. Зависимость напряжения, возникающего в шлице карданной передачи, от времени в двух произвольных взятых сечениях шлица при толщине полимерного покрытия 100 мкм (*a*) и 200 мкм (*b*)

Fig. 4. Dependence of the stress arising in the cardan drive spline on time in two arbitrary sections of the spline with a polymer coating thickness of 100 μm (*a*) and 200 μm (*b*)

резко уменьшаются. Применение полимерного покрытия толщиной в 100–200 мкм позволяет существенно снизить значения напряжений в процессе эксплуатации шлицевого соединения. Таким образом, проведенные исследования позволили определить оптимальные геометрические параметры покрытий шлицевых соединений карданных валов.

Вторым направлением исследования стало повышение параметров триботехнических характеристик (коэффициент трения и износостойкость) путем направленного модифицирования полиамидной матрицы дисперсными компонентами целлюлозосодержащих продуктов.

С целью повышения эксплуатационных параметров карданного вала были разработаны составы композиционных материалов для формирования функциональных покрытий и технология его формирования в шлицевом соединении карданных валов грузовых автомобилей и специальной техники¹. В разработанном составе композиционного материала на основе ПА-6 в качестве модификатора использовали высокодисперсные частицы целлюлозы или целлюлозосодержащих продуктов (1–20 мас.%) и полиамидную смолу, которую получают на основе канифоли (1–5 мас.%).

Особенностью используемой полиамидной смолы является хорошая термодинамическая совместимость с полиамидной матрицей, выбранной из групп промышленных полиамидов – полиамида-6, полиамида-6.6, полиамида-11. Схема получения (синтеза) полиамидной смолы на основе аминоамидов смоляных кислот канифоли состоит в следующем [11]:



¹ Состав композиционного материала : пат. ВУ 24250 / В. А. Струк, А. С. Антонов, А. Н. Лесун, П. В. Клочко, Д. В. Нахват, Ю. С. Ковалевский, И. В. Капцевич. Опубл. 05.04.2024.

Для получения полиамидной смолы используют следующие продукты процесса модифицирования смоляных кислот талловой канифоли диэтилентриамином, осуществляемого при температуре 190–210 °С при мольном соотношении канифоли и диэтилентриамина 1,0 : 1,2. В результате был получен водорастворимый и термически устойчивый до 230 °С продукт. В качестве модификатора использовали аминоамиды смоляных кислот канифоли при соотношении канифоль : дикарбоновая кислота : диэтилтриамин – 1 : (4–12) : (4–12). На первой стадии осуществляли синтез смоляных кислот талловой кислоты с диэтилентриамином, получая монозамещенные аминоамиды смоляных кислот, на второй стадии – синтез полиамидной смолы на основе адипиновой кислоты $R=(-CH_2)_4-R_i=OH$. Для повышения параметров триботехнических характеристик в состав композиционного материала вводили сухие смазки.

Механизм действия модификаторов на полиамидную матрицу заключается в следующем. Частицы микроцеллюлозы и целлюлозосодержащих продуктов под действием технологических факторов процесса литья под давлением (температуры вязко-текучего состояния полиамидной матрицы и термомеханического воздействия шнека) испытывают характерные трансформации, обусловленные процессами термоокислительной деструкции и механодеструкции.

Данные процессы приводят к активации целлюлозосодержащих частиц, которая проявляется в образовании активных функциональных групп (–OH=CO; –COOH–) и радикальных продуктов. Вследствие этого целлюлозосодержащие частицы существенно изменяют свои энергетические характеристики, что согласуется с концептом энергетического и технологического соответствия компонентов, предложенным нами в ряде публикаций [12, 13].

На параметры деформационно-прочностных и триботехнических характеристик композитов существенное влияние оказывает распределение частиц модификатора по матричному полимеру. Для обеспечения равномерного распределения частиц целлюлозосодержащих компонентов в матричном полиамиде использовали полиамидную смолу на основе аминоамидов смоляных кислот канифоли. Данная смола водорастворима и обладает способностью равномерно распределяться в матричном полимере. При этом она проникает в результате диффузии в структуру базового полиамида, преимущественно в микродефекты надмолекулярного строения, изменяя их неблагоприятное действие на процессы разрушения полиамидной матрицы.

При обработке гранул (порошка) базового матричного полиамида раствором полиамидной смолы формируются благоприятные условия для закрепления целлюлозосодержащих частиц на поверхности частиц полиамида. Таким образом, слой полиамида на основе аминоамидов смоляных кислот канифоли выполняет функцию модификатора матричного полиамида и способствует распределению целлюлозосодержащих частиц в объеме матричного связующего. Полиамидная смола на основе аминоамидов смоляных кислот канифоли обладает выраженным гидрофобным действием, что благоприятно сказывается на параметрах служебных характеристик композитов на основе промышленных полиамидов.

Таким образом, совместное введение в состав базового промышленного полиамида полиамидной смолы на основе аминоамидов смоляных кислот канифоли и целлюлозосодержащих продуктов позволяет достичь синергического эффекта повышения показателей деформационно-прочностных и триботехнических характеристик композиционных материалов на основе полиамидов.

В ходе исследования для изготовления композиционных материалов на основе промышленных полиамидов применяли гранулированные продукты, производимые на филиале «Завод Химволокно» ОАО «ГродноАзот», ПА-6 и ПА-6.6. В качестве полиамидной смолы использовали водный раствор продукта, выпускаемого по ТУ ВҮ 1526670.005–2018, который имеет следующие характеристики: массовая доля сухого вещества – до 10–12 %, динамическая вязкость при 25 °С не менее 10 сР, водородный показатель рН 8,0–11,5, кислотное число абсолютно сухого вещества > 40 мг КОН/г. Для модифицирования полиамидных матриц применяли микроцеллюлозу, карбоксилметилцеллюлозу, диэтиламинцеллюлозу, ацетилцеллюлозу, а также продукт, полученный на основе натуральной древесины, – древесный лигноцеллюлозный наполнитель, содержащий лигнин и целлюлозу.

Дисперсность частиц целлюлозосодержащих продуктов составляла 1–100 мкм. Для приготовления композиционного материала использовали порошкообразные продукты, полученные криогенным измельчением гранулированных полуфабрикатов промышленно выпускаемых полиамидов (ПА-6, ПА-6.6), которые обрабатывали соответствующим количеством водного раствора полиамидной смолы.

Разработанный композиционный материал на основе ПА-6 обладает повышенными параметрами эксплуатационных характеристик (таблица).

Varautarus	Параметр для композиционного материала			
Характеристика	I*	II**	III ^{***}	
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа				
исходное	76	73	75	
после 1 000 ч термоокисления на воздухе при температуре 25 °C	49	47	49	
Адгезионная прочность, Н/см, не менее	32	30	33	
Коэффициент трения				
при 5 МПа	0,10	0,09	0,10	
при 10 МПа	0,10	0,08	0,10	
Интенсивность изнашивания, $I \times 10^{-7}$ мм ³ /(H · м)				
при 5 МПа	0,6	0,5	0,6	
при 10 МПа	0,7	0,5	0,7	

Параметры характеристик композиционных материалов на основе полиамидов Parameters of characteristics of composite materials based on polyamides

Примечание: *- состав I содержит 5 мас.% микроцеллюлозы; ** - состав II содержит 10 мас.% микроцеллюлозы; *** - состав III содержит 5 мас.% ацетилцеллюлозы. Во всех составах содержится сухая смазка - коллоидный графит в количестве 2,5-3,0 мас.%.

N o t e: * - composition I contains 5 wt.% microcellulose; ** - composition II contains 10 wt.% microcellulose; - composition III contains 5 wt.% acetylcellulose. All formulations contain a dry lubricant - colloidal graphite in an amount of 2.5–3.0 wt.%.

Сравнительный анализ триботехнических и адгезионных характеристик полимерных покрытий проводили для композитов на основе ПА-6 и ПА-11 (Rilsan[®]), который характеризуется следующими параметрами: коэффициент трения f = 0,12 (без подвода смазочного материала), интенсивность изнашивания $I = 0,8 \cdot 10^{-7}$ мм³/(Н · м) и прочность адгезионного соединения 0,31 Н/см.

Результаты сравнительного анализа триботехнических и адгезионных характеристик, представленные в таблице, свидетельствуют о достижении значимого технического эффекта повышения триботехнических характеристик при модифицировании полиамидных матриц целлюлозосодержащими модификаторами.

Для повышения адгезионных характеристик покрытий из композиционных материалов на основе полиамида-6 разработан состав адгезионного слоя, наносимого на поверхность металлической детали (специальный подслой). Его формировали из композиционного материала на основе полиамидной смолы, полученной на основе канифоли¹. В состав водного раствора вводили наноразмерные частицы коллоидного графита ультрадисперсных алмазов (УДА, УДАГ), целлюлозосодержащих продуктов (микроцеллюлозы, этилцеллюлозы, карбоксилцеллюлозы и др.) в количестве 0,01-0,10 мас.%. Полученный состав наносили на подготовленную поверхность металлического субстрата, очищенную от загрязнений и различных органических и неорганических соединений, с применением, например, обработки гибкими металлическими элементами металлической фрезы. После этого адгезионный слой подсушивали на воздухе для удаления растворителя (воды) при температуре 30-80 °C в течение 10-20 мин. Затем металлическую подложку с нанесенным адгезионным слоем подвергали термоактивационной обработке при температуре 280-320 °C в течение 10-15 мин и извлекали для нанесения покрытия методом псевдоожиженного слоя, используя порошкообразную субстанцию композита на основе ПА-6. Применение адгезионного слоя на основе канифоли позволило на 10-15 % увеличить адгезионную прочность покрытия, снизить интенсивность изнашивания при эксплуатации без подвода внешней смазки.

¹ Состав адгезионного слоя : заявка ВУ 20220237 / В. А. Струк, А. С. Антонов, Г. А. Костюкович, А. Н. Лесун, П. В. Клочко, Д. В. Нахват. Опубл. 13.01.2023.

Апробирование разработанных подходов к оптимизации состава и геометрических параметров функционального покрытия на основе алифатических полиамидов промышленного производства осуществляли на лабораторно-технологической базе ОАО «Белкард», производящем широкий ассортимент карданных валов для автотракторной, железнодорожной и специальной техники. Результаты проведенных испытаний позволили принять решение об использовании импортозамещающих материалов на основе полиамидных композитов в конструкциях карданных валов.

Заключение. На основе результатов численного моделирования установлена связь между толщиной функционального покрытия и уровнем контактных напряжений в шлицевом соединении карданных передач. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов карданных передач в CAE-системах Pro/ENGINEER Mechanica и LS-DYNA позволил установить оптимальную толщину функционального покрытия в шлицевом соединении, равную 200 мкм и обеспечивающую минимальный уровень контактных напряжений и снижение потерь на преодоление сил трения при бросках мощности. Разработаны оптимизированные составы и технология формирования покрытия из композиционного материала на рабочих поверхностях шлицевого соединения карданного вала на основе промышленно выпускаемых в Республике Беларусь полиамидов (ПА-6, ПА-6.6), которые по параметрам адгезионной прочности не уступают зарубежным аналогам (покрытиям дорогостоящего полиамида-11 (Rilsan®)), а по параметрам износостойкости превосходят их в 1,2–1,6 раза при более низкой себестоимости.

Результаты исследований вносят существенный вклад в расширение марочного ассортимента композиционных материалов на основе промышленных термопластов отечественного производства и представляют практический интерес для технологического обеспечения формирования функциональных полимерных покрытий на металлических субстратах и разработки конкурентоспособных наукоемких изделий нового поколения для машиностроения, в том числе для автотракторной и специальной техники.

Список использованных источников

1. Проектирование универсальных шарниров и ведущих валов / А. Х. Беркер, И. Р. Вагнер, Н. В. Вебстер [и др.]; пер. с англ. Ю. В. Попова. – Л.: Машиностроение, 1984. – 463 с.

2. Sehher-Thoss, H. C. Universal Joints and Driveshafts: Analysis, Design, Applications / H. C. Seherr-Thoss, F. Schmelz, E. Aucktor; transl. by J. A. Tipper, S. J. Hill. – Springer, 2006. – 373 p. https://doi.org/10.1007/3-540-30170-4

3. Кравченко, В. И. Структура и технология композиционных материалов для конструкций карданных передач серии «Белкард-2000»: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Кравченко Виктор Иванович; Полоцк. гос. ун-т. – Новополоцк, 2001. – 22 с.

4. Костюкович, Г. А. Композиционные материалы для универсальных шарниров нагруженных карданных передач автотракторной и сельскохозяйственной техники: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Костюкович Геннадий Александрович; Физ.-техн. ин-т Нац. акад. наук Беларуси. – Минск, 2003. – 25 с.

5. Кравченко, В. И. Карданные передачи: конструкции, материалы, применение / В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, В. А. Струк; под ред. В. А. Струка. – Минск: Тэхналогія, 2006. – 410 с.

6. Кунву Ли. Основы САПР (САД/САМ/САЕ) / Кунву Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.

7. Большаков, В. П. Твердотельное моделирование деталей в CAD-системах: AutoCAD, KOMПAC-3D, SolidWorks, Inventor, Creo / В. П. Большаков, А. Л. Бочков, Ю. Т. Лячек. – СПб.: Питер, 2015. – 480 с.

8. Rilsan[®] PA11 Fine Powders Application Process // Arkema Global. – URL: https://hpp.arkema.com/en/product-families/rilsan-pa11/rilsan-fine-powders-application-process/ (date of access: 24.05.2025).

9. Триботехнические покрытия для узлов трения различных агрегатов / В. Я. Щерба, А. С. Антонов, В. А. Струк [и др.] // Горная механика. – 2008. – № 2. – С. 31–40.

10. Структура и технология триботехнических покрытий на деталях трения металлополимерных систем / В. А. Струк, Е. В. Овчинников, Е. И. Эйсымонт [и др.] // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта. Серыя 6, Тэхніка. – 2011. – № 1. – С. 62–68.

11. Флейшер, В. Л. Модифицированная канифоль: получение, свойства и применение / В. Л. Флейшер, Н. В. Черная. – Минск: БГТУ, 2019. – 305 с.

12. Methods for implementing the concept of energy and technological compliance of components in the technology of highly filled composites / S. Avdeychik, A. Antonov, A. Lesun [et al.] // Machines. Technologies. Materials. – 2022. – Vol. 16, Iss. 2. – P. 62–65.

13. Implementation of the concept of energy and technological compliance of components in the technology of fluorocomposites / S. Avdeychik, A. Antonov, A. Lesun [et al.] // Journal of Materials Science and Engineering A. – 2022. – Vol. 12, Iss. 1–3. – P. 28–39. https://doi.org/10.17265/2161-6213/2022.1-3.004

References

1. Berker A. Kh., Vagner I. R., Vebster N. V., Dodzh D. Kh., Zhimanskii L. V., Zeigler S. M., Kuni S. I., Miller V. F., Neidzhel F. S. *Universal Joint and Driveshaft Design Manual*. Society of Automotive Engineers, 1979. 440 p. (Advances in Engineering Series ; Iss. 7).

2. Seherr-Thoss H. C., Schmelz F., Aucktor E. Universal Joints and Driveshafts: Analysis, Design, Applications. Springer, 2006. 373 p. https://doi.org/10.1007/3-540-30170-4

3. Kravchenko V. I. Structure and Technology of Composite Materials for Designs of Cardan Gears of Belkard-2000 Series [dissertation abstract]. Novopolotsk, 2001. 22 p. (in Russian).

4. Kostyukovich G. A. Composite Materials for Universal Joints of Loaded Cardan Gears of Automotive Tractor and Agricultural Machinery [dissertation abstract]. Minsk, 2003. 25 p. (in Russian).

5. Kravchenko V. I., Kostyukovich G. A., Struk V. A. Cardan Gears: Construction, Materials, Application. Minsk, Tehnalogiya Publ., 2006. 410 p. (in Russian).

6. Kunwoo Lee. Principles of CAD/CAM/CAE. Pearson, 1999. 608 p.

7. Bol'shakov V. P., Bochkov A. L., Lyachek Yu. T. Solid Modeling of Parts in CAD Systems: AutoCAD, KOMIIAC-3D, SolidWorks, Inventor, Creo. St. Petersburg, Piter Publ., 2015. 480 p. (in Russian).

8. Rilsan[®] PA11 Fine Powders Application Process. *Arkema Global*. Available at: https://hpp.arkema.com/en/product-families/rilsan-pa11/rilsan-fine-powders-application-process/ (accessed 24 May 2025).

9. Shcherba V. Ya., Antonov A. S., Struk V. A., Ovchinnikov E. V., Gusev S. V., Ovsyanko V. A. Tribological coatings for friction units of various aggregates. *Gornaya mekhanika* [Mining Mechanical Engineering], 2008, no. 2, pp. 31–40 (in Russian).

10. Struk V. A., Ovchinnikov E. V., Eysymont E. I., Prushak D. A., Antonov A. S., Kravchenko V. I. Structure and technology of tribological coatings on friction elements of metal-polymer systems. *Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science*, 2011, no. 1, pp. 62–68 (in Russian).

11. Fleisher V. L., Chernaya N. V. *Modified Rosin: Preparation, Properties and Application*. Minsk, Belarusian State Technological University, 2019. 305 p. (in Russian).

12. Avdeychik S., Antonov A., Lesun A., Struk V., Goldade V. Methods for implementing the concept of energy and technological compliance of components in the technology of highly filled composites. *Machines. Technologies. Materials*, 2022, vol. 16, iss. 2, pp. 62–65.

13. Avdeychik S., Antonov A., Lesun A., Struk V., Goldade V. Implementation of the concept of energy and technological compliance of components in the technology of fluorocomposites. *Journal of Materials Science and Engineering A*, 2022, vol. 12, iss. 1–3, pp. 28–39. https://doi.org/10.17265/2161-6213/2022.1-3.004

ISSN 1561-8358 (Print) ISSN 2524-244X (Online) https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-105-110 УДК 373.1



Оригинальная статья

С. А. Гурецкий, Д. В. Карпинский, Е. Л. Труханова*, Н. Н. Новицкий

Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ КҮ_{1-х}Үb_x(WO₄)₂ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

Аннотация. Представлены результаты по выращиванию кристаллов $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$ (KYW:Yb) из раствора-расплава модифицированным методом Чохральского. Разработана и изготовлена термоустановка для полуавтоматического выращивания, определены методические особенности и температурные условия выращивания кристаллов на ней. Установлены основные параметры выращивания: температурный диапазон 985–900 °C, диапазон скоростей вращения 85–15 об/мин, скорость снижения температуры 0,5–6,0 °C/сут, температура переохлаждения 0,5–2,0 °C. Исследованы условия эффективного тепломассопереноса для выращивания кристаллов высокого качества. Разработана методика наплавления шихты для выращивания кристаллов с постоянным весовым контролем. Изучены температурно-концентрационные поля кристаллизации для осуществления управляемого выращивания кристаллов KYW:Yb модифицированным методом Чохральского. Установлено, что осевой градиент температур над поверхностью раствора-расплава должен быть 5–7 °C/см. Результаты исследования могут быть использованы для разработки технологии выращивания монокристаллов KYW и создания на их основе элементной базы для лазерных систем, излучающих на длине волны около 1,0 мкм.

Ключевые слова: монокристаллы двойных калиевых вольфраматов, модифицированный метод Чохральского, раствор-расплав, управляемый рост, температурно-концентрационное поле кристаллизации, схема термоустановки

Благодарности: работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф23МЭ-015).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Гурецкий Сергей Арсеньевич* – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: crystal2@physics.by; *Карпинский Дмитрий Владимирович* – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией, заместитель генерального директора Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. https://orcid.org/0000-0002-1046-543X. E-mail: dmitry.karpinsky@gmail.com; *Труханова Екатерина Леонидовна* – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. https://orcid.org/0000-0002-9218-8826. E-mail: trukhanava@physics.by; *Новицкий Николай Николаевич* – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. https://orcid.org/0000-0002-6607-4681. E-mail: novitski@physics.by

Вклад авторов: Гурецкий Сергей Арсеньевич – обоснование концепции исследования, разработка дизайна экспериментального исследования, планирование исследования, проведение эксперимента; Карпинский Дмитрий Владимирович – проведение эксперимента, интерпретация результатов исследования, критический пересмотр текста рукописи; Труханова Екатерина Леонидовна – проведение инструментальных исследований, написание текста рукописи; Новицкий Николай Николаевич – разработка дизайна экспериментального исследования, интерпретация результатов исследования, анализ и обобщение данных литературы.

Для цитирования: Технологические параметры выращивания монокристаллов KY_{1-x}Yb_x(WO₄)₂ модифицированным методом Чохральского / С. А. Гурецкий, Д. В. Карпинский, Е. Л. Труханова, Н. Н. Новицкий // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 2. – С. 105–110. https://doi. org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-105-110

Поступила в редакцию: 12.12.2024 Доработанный вариант: 13.02.2025 Утверждена к публикации: 12.06.2025 Подписана в печать: 19.06.2025

^{*} Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Sergei A. Guretskii, Dmitry V. Karpinsky, Katsiaryna L. Trukhanova*, Nickolaj N. Novitskii

Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, 19, P. Brovka St., 220072, Minsk, Republic of Belarus

TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF GROWING $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$ SINGLE CRYSTALS BY THE MODIFIED CZOCHRALSKI METHOD

Abstract. The results of growing $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$ (KYW:Yb) crystals from a melt solution by the modified Czochralski method are presented. A thermal setup for semi-automatic growth has been developed and manufactured. The methodological features and temperature conditions for growing crystals on this setup have been worked out. The conditions for efficient heat and mass transfer for growing high-quality crystals have been studied. A method for fusing the charge for growing crystals with constant weight control has been determined. The temperature-concentration fields of crystallization were studied for the controlled growth of KYW:Yb crystals using the modified Czochralski method. It has been found that the axial temperature gradient above the melt solution surface should be 5–7 °C/cm. The results of the study can be used to develop a technology for growing KYW single crystals and to create, on their basis, an element base for laser systems emitting at a wavelength of about 1.0 μ m.

Keywords: single crystals of double potassium tungstates, modified Czochralski method, solution-melt, controlled growth, temperature-concentration field of crystallization, scheme of a thermal installation

Acknowledgements: this research was funded by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (grant no. F23ME-015).

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

Information about the authors: Sergei A. Guretskii – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: crystal2@ physics.by; Dmitry V. Karpinsky – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Head of the Laboratory, Deputy Director at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. https://orcid.org/0000-0002-1046-543X. E-mail: dmitry.karpinsky@gmail.com; Katsiaryna L. Trukhanava – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Senior Researcher at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. https://orcid.org/0000-0002-9218-8826. E-mail: trukhanava@physics.by; Nickolaj N. Novitskii – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Senior Researcher at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. https://orcid.org/0000-0002-9218-8826. E-mail: trukhanava@physics.by; Nickolaj N. Novitskii – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Senior Researcher at Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus. https://orcid.org/0000-0002-6607-4681. E-mail: novitski@physics.by

Contribution of the authors: Sergei A. Guretskii – justification of the concept, development of the design of an experimental study, planning of the investigations, conducting an experiment; Dmitry V. Karpinsky – conducting of the experiment, interpretation of the research results, critically revising the manuscript text; Katsiaryna L. Trukhanava – carrying out instrumental research, writing the text of the manuscript; Nickolaj N. Novitskii – development of experimental research design, interpretation of research results, analysis and synthesis of literature data.

For citation: Guretskii S. A., Karpinsky D. V., Trukhanova K. L., Novitskii N. N. Technological parameters of growing $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$ single crystals by the modified Czochralski method. *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. 2, pp. 105–110 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-105-110

Received: 12.12.2024 Modified: 13.02.2025 Approved for publication: 12.06.2025 Signed to the press: 19.06.2025

Введение. Кристаллы калий-иттриевого вольфрамата вызывают большой интерес как активные среды для создания лазеров с диодной накачкой, излучающих в спектральном диапазоне около 1 мкм. Данные кристаллы нашли применение в лазерных системах с пассивной синхронизацией мод для генерации импульсов ультракороткой длительности. Достоинствами этих материалов являются: интенсивная полоса поглощения около 980 нм, позволяющая использовать для накачки промышленно выпускаемые InGaAs лазерные диоды; широкая полоса усиления, что необходимо для создания перестраиваемых лазеров и получения ультракоротких импульсов; высокие сечения стимулированного излучения; а также малый стоксов сдвиг порядка 4–5 %, что снижает уровень тепловых потерь. Кристаллы двойных вольфраматов относятся к одним из самых востребованных и перспективных активных лазерных материалов [1–3]. Они применяются в качестве лазерных элементов в электронной технике. Однако широкое использование этих материалов сдерживается трудностями получения больших монокристаллов высокого оптического качества, которые плавятся инконгруентно, что делает невозможным их выращивание традиционными методами из расплава.

Высокотемпературные растворы-расплавы заслуживают более детального рассмотрения, потому что позволяют осуществить процесс выращивания монокристаллов почти всех извест-

ных оксидных соединений в условиях, когда не требуются сложная аппаратура, высокое давление или температура, а следовательно, снижаются производственные затраты. Они также дают возможность глубже познать особое состояние жидких растворов в области высоких температур, выявить параметры этого состояния и тем самым получить возможность практического использования и управления процессом раствор-расплавного выращивания [4].

Следует отметить, что перспективы получения совершенных кристаллов семейства двойных вольфраматов из растворов-расплавов в обязательном порядке должны быть связаны с развитием метода управляемой кристаллизации для данного типа материалов [5, 6]. Лишь в этом случае целесообразно ставить вопрос о программировании и автоматизации всех этапов ростового процесса. Разработка массовой технологии изготовления высокоэффективных активных однородных элементов требует использования модифицированного метода Чохральского.

Таким образом, проблема выращивания высококачественных кристаллов из растворов-расплавов неразрывно связана, с одной стороны, с углубленным изучением процесса кристаллизации, с другой – с разработкой технологических устройств для обеспечения надежной управляемой кристаллизации. Также следует отметить, что из-за высоких требований к структурному составу кристаллов для лазерной техники необходимо классифицировать дефекты структуры, выяснить причины возникновения и разработать методы их устранения на качественно новой основе.

Цель данной работы – определить методические особенности и температурные условия выращивания кристаллов на изготовленной термоустановке для полуавтоматического выращивания кристаллов КҮШ из раствора-расплава модифицированным методом Чохральского; исследовать условия эффективного тепломассопереноса для выращивания кристаллов высокого качества и изучить температурно-концентрационные поля кристаллизации для осуществления управляемого роста кристаллов.

Методика проведения эксперимента. Для получения массивных монокристаллических буль KYW:Yb использовался модифицированный метод Чохральского, который заключался в вытягивании кристаллов из раствора-расплава при постоянном снижении температуры [1].

На рис. 1 изображена схема термоустановки для выращивания монокристаллов двойных вольфраматов в полуавтоматическом режиме. Тигель с расплавом (5) был вывешен в термоустановке на пружинном амортизаторе, перемещение которого фиксировалось электронным микрометром (8) в зависимости от массы тигля при вытягивании кристалла. Раствор-расплав находился в платиновом тигле диаметром 80 или 100 мм. Высота раствора-расплава изменялась в пределах 50–70 мм. В качестве растворителя использовался бивольфрамат калия (K₂W₂O₇).

Выращивание проводилось в температурном диапазоне ниже температуры фазового перехода (900–985 °C) на вытягиваемую ориентированную кристаллическую затравку при медленном охлаждении раствора-расплава. Температура роста сохранялась на уровне 0,5–2,0 °C ниже температуры ликвидуса. Скорости вращения и вытягивания кристаллов поддерживались в высоко стабильном состоянии на всем протяжении выращивания.



Рис. 1. Схема термоустановки для полуавтоматического выращивания монокристаллов КҮW:Уb с использованием модифицированного метода Чохральского: 1 – раствор-расплав, 2 – теплоотвод в контур охлаждения, 3 – кристалл, 4 –
вращающийся шток, 5 – тигель, 6 – поток тепла от контура нагрева, 7 – пружинное основание, 8 – микрометр, 9 – шаговый двигатель, 10 – блок управления шаговым двигателем, 11 – мобильная связь

Fig. 1. Scheme of a thermal installation for semi-automatic growth of KYW:Yb single crystals using the modified Czochralski method: *1*- solution-melt, *2* - heat removal into the cooling circuit, *3* - crystal, *4* - rotating rod, *5* - crucible, *6* - heat flow from heating circuit, *7* - spring basis, *8* - micrometer, *9* - stepper motor, *10* - control block of stepper motor, *11* - mobile communication

Предназначенный для кристаллизации раствор-расплав нагревался в тигле до температуры 1010–1030 °С и проводилась его гомогенизация в течение 12 ч. Далее температура опускалась до значения на 3–5 °С выше температуры насыщения (970–985 °С). При обеспечении корректных значений критических параметров полученные кристаллы характеризовались высокой степенью структурного совершенства.

Критическими факторами, определяющими качество кристаллов, являются следующие параметры: величина переохлаждения (должна быть в диапазоне 0,5–2,0 °C); скорость роста кристаллов (оптимальное значение в пределах 1,5–4,0 мм/сут); скорость вращения штока (должна быть в диапазоне от 85 об/мин в начале синтеза до 15 об/мин в конце синтеза). Распределение температур оказывает существенное влияние на массообмен и, как следствие, на оптическое качество выращенных кристаллов. Распределение температур в объеме раствора-расплава и над поверхностью представлено в таблице.

Аксиальный градиент температуры в растворе-расплаве при выращивании монокристаллов KYW Axial temperature gradient in the solution-melt during the growth of KYW single crystals

Температура на дне тигля Temperature at the bottom of the crucible	– 20 мм – 20 mm	— 10 мм — 10 mm	— 5 мм — 5 mm	Температура на поверхности раствора-расплава Temperature at the surface of the solution-melt	+ 5 мм + 5 mm	+ 10 мм + 10 mm
7,5−8,3 °C	4,6−5,3 °C	3,7–4,2 °C	3,2–3,6 °C	0 °C	4,0–4,6 °C	4,8−5,5 °C

Рост монокристаллов KYW:Yb модифицированным методом Чохральского представляет собой сложный физико-химический процесс, в котором важную, зачастую определяющую, роль играет тепло- и массоперенос. При выращивании монокристаллов должен строго соблюдаться заданный температурный режим.

Основополагающим условием выращивания из раствора-расплава модифицированным методом Чохральского является создание градиента концентрации, обеспечивающего диффузию растворенного вещества в направлении поверхности роста на внесенном в раствор-расплав затравочном кристалле. Градиент концентрации создается с помощью температурного перепада между зоной перегретого раствора-расплава и зоной кристаллизации. Указанные условия в полной мере обеспечивают необходимый процесс питания кристалла на различных стадиях роста.

Для создания необходимых температурных градиентов термоустановка для выращивания кристаллов модифицированным методом Чохральского (см. рис. 1) была оснащена двухзонной шахтной печью-кристаллизатором с каркасными нагревателями. Во время проведения эксперимента при помощи двухзонных нагревателей изменялся вертикальный температурный градиент для повышения эффективности механического перемешивания и предотвращения «запаразичивания» придонной области раствора-расплава. Температурный осевой градиент над поверхностью раствора-расплава формировался за счет изменения толщины и профиля верхней части кристаллизатора. Затравочный элемент в форме цилиндра диаметром 8 мм и длиной 8–12 мм ориентировался с точностью ≤ 5′ вдоль оси [010].

Высота кристалла определялась высотой вытяжки и размером части кристалла, выросшего под поверхностью раствора-расплава. За это время температура раствора-расплава снизилась на 80–90 °С. После достижения нижней границы температурного уровня диапазона выращивания кристалл KYW:Yb отрывали от поверхности раствора-расплава, вытягивание и вращение при этом было остановлено. Затем проводилось охлаждение термоустановки до комнатной температуры со скоростью 25–30 °С/ч.

Определение температурно-концентрационных характеристик при выращивании монокристаллов $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$. Для осуществления управляемого выращивания легированных редкоземельным элементом кристаллов KYW модифицированным методом Чохральского необходимо определение температурно-концентрационных полей кристаллизации. Решение поставленной задачи важно для определения режимов кристаллизации, фиксирующих состояние раствора-расплава на особо ответственных стадиях выращивания: начальной и последующей, определяющей качественный рост призматической части кристалла. Используемый нами вариант проведения поисковых работ по определению температурно-концентрационных характеристик раствора-расплава для выращивания кристаллов KYW модифицированным методом Чохральского из K₂W₂O₇ состоял из нескольких этапов:

1) определение температурного диапазона выращивания;

2) установление температуры насыщения в зависимости от концентрации кристаллобразующих компонент;

3) определение массы выбираемых кристаллов при снижении температуры на 1 °С в пересчете на условную единицу раствора-расплава;

4) оптимизация распределения температур в объеме раствора-расплава.

С учетом специфики выращивания из раствора в расплаве, когда не существует способов прямого контроля за степенью растворения исходных веществ, вышеперечисленные пункты исследования становятся крайне необходимы, особенно при выращивании кристаллов на затравках модифицированным методом Чохральского.

Все поисковые работы велись в условиях, аналогичных условиям длительного синтеза, то есть при интенсивном перемешивании раствора-расплава платиновым кристаллоносцем с пробными кристаллами. Некоторое усложнение методики окупается высокой точностью определения температурно-концентрационных характеристик раствора-расплава.

Эксперимент сводился к следующему: после предварительной гомогенизации, начиная с температуры на 20–30 °C выше насыщения, охладили раствор со скоростью 5–10 °C/ч до окончательного нахождения температуры насыщения, которую определили, периодически внося пробные затравки в раствор с последующим визуальным контролем их состояния. Известно, что если среда ненасыщенная – затравка растворяется, если пересыщена – ограняется. Использование пробных затравок позволяет оперативно находить состояние равновесия системы для заданного состава, причем при переходе от одной концентрации раствора к другой не требуется остановки эксперимента, поскольку при наличии открытой поверхности тигля создается возможность без выключения печи производить изменение в составе раствора путем добавления недостающих порций растворяемого вещества или растворителя.

После определения оптимального состава раствора-расплава в зависимости от требуемых размеров массы кристалла рассчитывались масса раствора-расплава и температурный диапазон выращивания. Далее на основании полученных данных рассчитывался режим снижения температуры на всем протяжении эксперимента. При этом соблюдалось необходимое условие: скорость роста каждой грани не должна превышать оптимальную и не изменяется на всем протяжении выращивания.

Отметим, что скорость роста зависит от температуры снижения, находящейся в пределах от 0,5 °C/сут в начале синтеза до 6,0 °C/сут в конце синтеза. Невыполнение этого условия приводит к росту в виде параллельных сростков, двойникованию, блочному росту либо к появлению внутренних механических напряжений, приводящих к растрескиванию кристалла при остывании до комнатной температуры и при механической обработке.

Следует считать оптимальным увеличение скорости вращения с 15 по 85 об/мин в процессе выращивания кристалла, что оказывает положительное влияние на качество выращиваемых кристаллов. При увеличении скорости вращения (более 90 об/мин) не обеспечивается надежность механического крепления кристаллодержателя, что приводит к колебаниям положения фронта кристаллизации и, как следствие, к искажению формы растущего кристалла и увеличению суммарного угла разориентировки блоков. При уменьшении скорости вращения менее 15 об/мин из-за недостаточного перемешивания раствор-расплава в кристаллах образуются субмикронные включения растворителя.

Представляется целесообразным выращивать кристаллы по направлению (010) с минимальным коэффициентом теплопроводности. При этом большая теплопроводность кристалла в радиальном направлении обеспечивает минимальные радиальные градиенты температуры в кристалле, что способствует созданию плоского фронта кристаллизации в процессе роста кристаллов. Низкий коэффициент линейного расширения по оси кристалла в данном случае позволяет обеспечить минимальные выращиваемом кристалле.

Проведенные исследования показали необходимость строгого согласования скорости роста, скорости охлаждения раствор-расплава и осевого градиента температуры над поверхностью



Рис. 2. Кристалл $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$, выращенный модифицированным методом Чохральского

Fig. 2. $KY_{1-x}Yb_x(WO_4)_2$ crystal grown by the modified Czochralski method раствор-расплава. В результате определен режим выращивания, обеспечивающий получение кристаллов массой до 0,5 кг с воспроизводимыми характеристиками (рис. 2).

Заключение. Разработана и изготовлена термическая камера для лабораторного макета ростовой установки. Проведены испытания температурных параметров установки для выращивания кристаллов. Разработана методика наплавления шихты для выращивания кристаллов с постоянным весовым контролем. Исследованы температурно-концентрационные характеристики кристаллизации. Установлено, что осевой градиент температур над поверхностью раствора-расплава должен быть 5–7 °С/см. Скорость роста вдоль оси [В] составляет 3,5 мм в сутки, скорость вращения изменяется от 85 об/мин в начале синтеза до 15 об/мин в конце синтеза. Процесс выращивания осуществляется в температурном диапазоне 915–985 °С, при этом исходная концентрация кристаллобразующих оксидов равна 40 мас.%. Длительность выращивания составляет 20–25 сут.

Результаты исследования могут быть использованы для получения кристаллов калий-редкоземельных вольфраматов, легированных ионами иттербия, которые найдут применение в лазерной оптике как лазерные системы, работающие по принципу тонкого диска, где необходимо обеспечить эффективное поглощение излучения накачки на малой тол-

щине активного элемента (около 100 мкм). Такие системы позволяют получать выходные мощности излучения в десятки и сотни ватт и поэтому востребованы при обработке материалов.

Список использованных источников

1. Generation of 150-fs pulses from a diode-pumped Yb:KYW nonlinear regenerative amplifier / J. Pouysegur, M. Delaigue, C. Hönninger [et al.] // Optics Express. – 2014. – Vol. 22, Iss. 8. – P. 9414–9419. https://doi.org/10.1364/OE.22.009414

2. Efficient high-power femtosecond Yb^{3+} :KY(WO₄)₂ laser / A. A. Kovalyov, V. V. Preobrazhenskii, M. A. Putyato [et al.] // Laser Physics Letters. – 2015. – Vol. 12, No 7. – P. 075801. https://doi.org/10.1088/1612-2011/12/7/075801

Growth, optical characterization, and laser operation of a stoichiometric crystal KYb(WO₄)₂ / M. Pujol, M. Bursukova,
 F. Güell [et al.] // Physical Review B. – 2002. – Vol. 65, Iss. 16. – Art. ID 165121. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.165121
 Features of the KGd(WO₄)₂:Nd³⁺ single-crystal growth control / S. A. Guretskii, A. M. Luginets, I. M. Kolesova [et al.] //

4. Features of the KGd(WO₄)₂:Nd⁻¹ single-crystal growth control / S. A. Guretskii, A. M. Luginets, I. M. Kolesova [et al.] // Journal of Crystal Growth. – 2009. – Vol. 311, Iss. 6. – P. 1529–1532. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.01.085

5. Tm³⁺:KY(WO₄)₂ single crystals: Controlled growth and spectroscopic assessment / S. A. Guretskii, E. L. Trukhanova, A. V. Kravtsov [et al.] // Optical Materials. – 2021. – Vol. 120. – Art. ID 111451. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111451

6. Crystal growth, optical and spectroscopic characterisation of monoclinic $KY(WO_4)_2$ co-doped with Er^{3+} and Yb^{3+} / X. Mateos, R. Solé, Jna. Gavalda [et al.] // Optical Materials. – 2006. – Vol. 28, Iss. 4. – P. 423–431. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2004.12.024

References

1. Pouysegur J., Delaigue M., Hönninger C., Georges P., Druon F., Mottay E. Generation of 150-fs pulses from a diode-pumped Yb:KYW nonlinear regenerative amplifier. *Optics Express*, 2014, vol. 22, iss. 8, pp. 9414–9419. https://doi. org/10.1364/OE.22.009414

2. Kovalyov A. A., Preobrazhenskii V. V., Putyato M. A., Rubtsova N. N., Semyagin B. R., Kisel V. E., Rudenkov A. S. [et al.]. Efficient high-power femtosecond Yb^{3+} : $KY(WO_4)_2$ laser. *Laser Physics Letters*, 2015, vol. 12, no. 7, pp. 075801. https://doi.org/10.1088/1612-2011/12/7/075801

3. Pujol M. C., Bursukova M. A., Güell F., Mateos X., Solé R., Gavaldà J., Aguiló M. [et al.]. Growth, optical characterization, and laser operation of a stoichiometric crystal KYb(WO₄)₂. *Physical Review B*, 2002, vol. 65, iss. 16, art. ID 165121. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.165121

4. Guretskii S. A., Luginets A. M., Kolesova I. M., Kravtsov A. V., Malyutin V. B., Ermolaev A. A., Karpenko S. A. Features of the KGd(WO₄)₂:Nd³⁺ single-crystal growth control. *Journal of Crystal Growth*, 2009, vol. 311, iss. 6, pp. 1529–1532. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.01.085

5. Guretskii S. A., Trukhanova E. L., Kravtsov A. V., Gusakova N. V., Gorbachenya K. N., Kisel V. E., Yasukevich A. S. [et al.]. Tm³⁺:KY(WO₄)₂ single crystals: Controlled growth and spectroscopic assessment. *Optical Materials*, 2021, vol. 120, art. ID 111451. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111451

6. Mateos X., Solé R., Gavalda Jna., Aguiló M., Massons J., Díaz F. Crystal growth, optical and spectroscopic characterization of monoclinic $KY(WO_4)_2$ co-doped with Er^{3+} and Yb^{3+} . *Optical Materials*, 2006, vol. 28, iss. 4, pp. 423–431. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2004.12.024

ISSN 1561-8358 (Print) ISSN 2524-244X (Online) https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-111-123 УДК 546.185+677.494.674+699.81



Оригинальная статья

О. В. Рева^{1*}, В. В. Богданова², З. В. Шукело², О. И. Кобец²

¹Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, ул. Машиностроителей, 25, 220118, Минск, Республика Беларусь ²Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт

учрежовние Белорусского госубирственного университета «научно-исслебовательский институт физико-химических проблем», ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВОДОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОГНЕЗАЩИТЫ ПОЛИЭФИРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ ОБРАБОТКОЙ НЕОРГАНИЧЕСКИМИ СОСТАВАМИ

Аннотация. Разработаны рецептуры неорганических фосфор-галогенсодержащих огнезамедлительных составов и технология поверхностной обработки ими полиэфирных тканевых материалов различной плотности, обеспечивающие долгосрочный водостойкий огнезащитный эффект. Для реализации химического взаимодействия поверхности полиэфирного материала и огнезамедлительной системы осуществлена предварительная активация подложки и введен ряд модификаторов в огнезащитную композицию. Исследованиями методом электронной электроскопии доказано, что хемособция компонентов огнезащитной композиции на активированной полиэфирной подложке происходит при наличии в ее объеме устойчивых коллоидных частиц с размером 4–8 нм, формирующихся в присутствии соединений двухвалентного олова. Сопоставительными термическими и аналитическими исследованиями огнезащищенных полиэфирных материалов после стирок установлено хемосорбционное взаимодействие компонентов замедлителей горения с полиэтилентерефталатом (ПЭТФ). Определены концентрационные пределы содержания ингибирующих элементов и медиативного агента на ПЭТФ ткани после стирки, в которых достигается долгосрочная огнезащита за счет изменения условий тепломассопереноса между пиролизующимся в конденсированной фазе материалом и пламенной зоной. Полученный результат можно использовать при производстве водостойких огнезащищенных материалов для защитной одежды пожарных, металлургов, сварщиков, а также текстильных изделий в местах массового пребывания людей.

Ключевые слова: фосфор-галогенсодержащие огнезамедлительные системы, модифицирующие добавки, полиэфирный тканый материал, огнезащитная обработка, хемосорбционное взаимодействие

Благодарности: работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия» на 2021–2025 годы, задание № 2.1.07.01.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Рева Ольга Владимировна* – кандидат химических наук, доцент, профессор кафедры химической, биологической, радиационной и ядерной защиты Университета гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. https://orcid.org/0000-0003-4006-8678. E-mail: volhal07@rambler. ru; *Богданова Валентина Владимировна* – доктор химических наук, профессор, заведующая лабораторией огнетушащих материалов Учреждения Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем». https://orcid.org/0000-0002-8557-9925. E-mail: bogdanova@bsu.by; *Шукело Зоя Витальевна* – ведущий химик лаборатории огнетушащих материалов Учреждения Белорусского государственного Учреждения Белорусского государственного учиверситета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем». E-mail: pani.marta.08@gmail.com; *Кобец Ольга Игоревна* – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории огнетушащих материалов Учреждения Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем». E-mail: pani.marta.08@gmail.com; *Кобец Ольга Игоревна* – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории огнетушащих материалов Учреждения Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем». E-mail: pani.marta.08@gmail.com; *Кобец Ольга Игоревна* – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории огнетушащих материалов Учреждения Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем». E-mail: pani.marta.08@gmail.com; *Кобец Ольга Игоревна* – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории огнетушащих материалов Учреждения Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», https://orcid.org/0000-0002-6702-7430. E-mail: kobetsoi@mail.ru

Вклад авторов: *Рева Ольга Владимировна* – формулирование идеи, исследовательских целей и задач, формулировка выводов, критический пересмотр текста рукописи; *Богданова Валентина Владимировна* – планирование исследований; формулирование исследовательских целей и задач, интерпретация результатов исследования, написание текста рукописи; *Шукело Зоя Витальевна* – сбор и систематизация данных, пробоподготовка образцов, обобщение результатов исследования, работа с графическим материалом; *Кобец Ольга Игоревна* – сбор данных литературы, анализ и обобщение данных литературы, редактирование текста рукописи, оформление рукописи.

Для цитирования: Обеспечение водостойкости поверхностной огнезащиты полиэфирных текстильных материалов различной плотности обработкой неорганическими составами / О. В. Рева, В. В. Богданова, З. В. Шукело, О. И. Кобец // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларуси. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 2. – С. 111–123. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-111-123

Поступила в редакцию: 10.02.2025 Доработанный вариант: 10.03.2025 Утверждена к публикации: 12.06.2025 Подписана в печать: 19.06.2025

Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Olga V. Reva^{1*}, Valentina V. Bogdanova², Zoya V. Shukelo², Olga I. Kobets²

¹University of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, 25, Mashinostroiteley St., 220118, Minsk, Republic of Belarus ²Institution of the Belarusian State University "Research Institute of Physical and Chemical Problems", 14, Leningradskaya St., 220030, Minsk, Republic of Belarus

PROVIDING WATER RESISTANCE OF SURFACE FIRE PROTECTION OF POLYESTER TEXTILE MATERIALS OF VARIOUS DENSITY BY TREATMENT WITH INORGANIC COMPOSITIONS

Abstract. Formulations of inorganic phosphorus-halogen-containing fire-retardant compositions and technology of surface treatment of polyester fabric materials of various densities with them, providing a long-term water-resistant fire-protective effect, have been developed. For implementation the chemical interaction between the surface of the polyester material and the fire-retardant system, preliminary activation of the substrate was carried out and a number of modifiers were introduced into the fire-retardant composition. Electron microscopic studies have shown that chemisorption of components of the fire-retardant composition on an activated polyester substrate occurs in the presence of stable colloidal particles with a size of 4–8 nm, formed in the presence of divalent tin compounds. Comparative thermal and analytical studies of fire-protected polyester materials after washing have established the chemisorption interaction of the flame retardants components with polyethylene terephthalate. The concentration limits of the content of inhibitory elements and mediating agent on PET fabric after washing are determined, in which long-term fire protection is achieved by changing the conditions of heat and mass transfer between the material pyrolyzing in the condensed phase and the flame zone. Practical application of research results relates to the introduction of water-resistant fire-resistant materials for protective clothing of fire-fighters, metallurgists, welders and products made from them in public places through the use of new non-toxic, economical fire-retardant compositions.

Keywords: phosphorus-halogen-containing fire-retardant systems, modifying additives, polyester woven material, fire-retardant treatment, chemisorption interaction

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the State Scientific Research Program "Chemical processes, reagents and technologies, bioregulators and bioorganic chemistry" for 2021–2025, task no. 2.1.07.01.

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

Information about the authors: Olga V. Reva – Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor, Professor the Department of Chemical, Biological, Radiation and Nuclear Protection at University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus. https://orcid.org/0000-0003-4006-8678, SPIN-code: 9028-4876. E-mail: volha107@ rambler.ru; Valentina V. Bogdanova – Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Head of the Laboratory of Fire Extinguishing Materials at Research Institute for Physical Chemical Problems the Belarusian State University. https://orcid.org/0000-0002-8557-9925, SPIN-code: 5367-7201. E-mail: bogdanova@bsu.by; Zoya V. Shukelo – Leading Chemist of the Laboratory of Fire Extinguishing Materials at Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University; Olga I. Kobets – Cand. Sci. (Chemistry), Leading Researcher of the Laboratory of Fire Extinguishing Materials at Research Institute for Physical Chemical Problems of Fire Extinguishing Materials at Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University; Olga I. Kobets – Cand. Sci. (Chemistry), Leading Researcher of the Laboratory of Fire Extinguishing Materials at Research Institute for Physical Chemical Problems of State University; Olga I. Kobets – Cand. Sci. (Chemistry), Leading Researcher of the Laboratory of Fire Extinguishing Materials at Research Institute for Physical Chemical Problems of Fire Extinguishing Materials at Research Institute for Physical Chemical Problems of The Belarusian State University. https://orcid.org/0000-0002-6702-7430, SPIN-code: 7365-1743. E-mail: kobetsoi@mail.ru

Contribution of the authors: Olga V. Reva – formulation of the idea, research goals and objectives, formulation of conclusions, critical revision of the manuscript text; Valentina V. Bogdanova – research planning; formulation of research goals and objectives, interpretation of research results, writing the text of the manuscript; Zoya V. Shukelo – collection and systematization of data, sample preparation, generalization of research results, work with graphic material; Olga I. Kobets – collection of literature data, analysis and synthesis of literature data, editing the text of the manuscript, design of the manuscript.

For citation: Reva O. V., Bogdanova V. V., Shukelo Z. V., Kobets O. I. Providing water resistance of surface fire protection of polyester textile materials of various density by treatment with inorganic compositions. *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. 2, pp. 111–123 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-111-123

Received: 10.02.2025 Modified: 10.03.2025 Approved for publication: 12.06.2025 Signed to the press: 19.06.2025

Введение. Полиэфирные текстильные материалы различной плотности и структуры повсеместно применяются как в повседневной жизни (мебель, шторы, постельные принадлежности), так и в профессиональной деятельности (специальная одежда сварщиков, электриков, пожарных) и промышленности (нетканые утеплители стен, изоляция воздуховодов и др.). Одним из основных требований, предъявляемых к этим изделиям, является их долгосрочная пониженная горючесть [1–7]. Огнезащищенные волокна можно получить введением замедлителей горения в реакционную смесь на стадии синтеза полимера или на стадии формования волокна [8, 9]. Однако эти способы требуют применения нерастворимых соединений, химически не меняющихся в условиях высокотемпературного формования из расплава полимера. Кроме того, часто при использовании наполнителей наблюдается резкое снижение физико-механических характеристик волокон и нитей [10–12].

Для придания полимерным волокнам специфических свойств (гидрофобности, огнестойкости, дезодорируемости) проводится их поверхностная модификация с применением лазерного или рентгеновского излучения, плазменно-растворной модификации, озонолиза [13–15], ориентационного вытягивания [13]. Такая подготовка материала предполагает образование пор, дефектов или реакционноспособных центров, в результате чего возникает вероятность закрепления целевых модификаторов на поверхности полимера. Вместе с тем применение указанных способов подготовки таких полимеров, как полиэтилентерефталат (ПЭТФ) и полиамид с монолитной структурой, не содержащей пор, совместимых по размеру с молекулами и ионами замедлителей горения, а также с отсутствием реакционно-активных групп, не позволяет достичь длительного огнезащитного эффекта [16–18].

Имеются сведения о достижении при использовании органических азот-фосфорсодержащих соединений устойчивой к стиркам огнезащиты синтетических текстильных материалов [19–22]. При этом условия синтеза и технология применения данных соединений не разглашаются, что проблематично для воспроизведения данных этих исследований.

В ряде работ огнезащитный эффект достигается применением замедлителей горения в смеси с пленкообразующими агентами либо использованием интумесцентных (вспенивающих) составов [23–25]. Следует подчеркнуть, что текстильные материалы с пленочными или специальными покрытиями не подвергаются стандартным испытаниям на устойчивость огнезащитного эффекта к водным обработкам, что вызывает сомнения в их долговечности, поскольку текстильные материалы бытового назначения нуждаются в систематических гигиенических обработках.

Еще одним подходом к приданию огнезащитных свойств полимерным текстильным материалам является использование золь-гель метода [26–28], при котором защита поверхности волокна или ткани осуществляется в результате образования поверхностного барьера (органического, неорганического или гибридного), способного препятствовать диффузии кислорода к материалу, замедлять его пиролиз и горение. Однако в результате исследования устойчивости к стиркам огнезащиты образцов, полученных по данной технологии, установлено, что после водных обработок огнезащитный эффект отсутствует [29, 30]. Вследствие этого применение золь-гель метода ограничивается обработкой текстильных материалов технического назначения, не подвергающихся стиркам.

Таким образом, проблема придания синтетическим текстильным материалам устойчивого к стиркам огнезащитного эффекта методами поверхностной обработки распространенными малотоксичными неорганическими замедлителями горения до настоящего времени не решена. Устойчивость огнезащитного эффекта к стиркам может быть обеспечена химическим взаимодействием между полимерной матрицей и соединениями, входящими в состав огнезащитного средства [31–33], что требует адресного подхода к выбору химического и гранулометрического состава замедлителя горения и технологии его нанесения для каждого вида не только полимера, но и текстильного материала одной химической природы.

Ранее нами показана принципиальная возможность достижения устойчивого к водным обработкам огнезащитного эффекта путем поверхностного нанесения неорганических замедлителей горения на волокнистые (нетканые) полиэфирные материалы, тогда как при аналогичной обработке плотных тканевых полиэфирных материалов огнезащитный эффект после их стирок отсутствовал [34–39].

Цель данной работы состояла в разработке рецептур неорганических огнезамедлительных систем и технологии поверхностной обработки ими полиэфирных тканевых материалов различной плотности, обеспечивающих химическое взаимодействие компонентов антипирена с ПЭТФ и, как следствие, водостойкость огнезащитной обработки.

Материалы и методы исследования. Объектами исследования являлись текстильные полиэфирные материалы различного назначения: подкладочная, гардинная, фильтрующая и портьерная ткани с соответствующими значениями плотности – 65; 114; 145 и 204 г/м². Огнезащитную обработку проводили синтезированным нами неорганическим огнезащитным составом (OC_{6a3}), содержащим фосфор, хлор, азот в массовом соотношении P : Cl : N = 1 : 2,2 : 2. На различных этапах исследования данный состав в виде водного раствора модифицировали введением реакционноспособных медиативных агентов как индивидуально, так и в различных сочетаниях. В качестве модифицирующих агентов использовали хлорид двухвалентного олова (SnCl₂), проявляющий способность к образованию на полимерной подложке хемосорбированного медиативного слоя из наноразмерных коллоидных частиц [38, 39], а также полиэтиленгликоль (ПЭГ) и гипофосфит натрия (ГПФ, NaH₂PO₂) – в качестве редокс-системы, способствующей изменению свойств поверхности текстильного материала и проницаемости волокон [40, 41]. Модификаторы добавляли к базовому составу в следующих количествах: 1,5 % SnCl₂; 3 % ГПФ; 10 % ПЭГ, при соответствующем снижении количества базового состава из расчета общего содержания всех компонентов в рабочих растворах огнезащитных составов 100 %.

На предыдущем этапе исследований нами установлено, что устойчивость огнезащитного эффекта к стиркам возрастает при предварительном травлении полиэфирных образцов в щелочном комплексном растворе при 70 °C в течение 30 мин [42, 43]. После проточной отмывки от травильного раствора образцы помещали в раствор огнезащитного состава на 20 мин, затем отжимали методом плюсовки при комнатной температуре или при нагревании до 60–70 °C в течение от 30 до 60 мин в зависимости от плотности ткани. Сушку образцов осуществляли при температуре 140 °C в течение 15 мин, термофиксацию – при температуре 220 °C в течение 2 мин. Огнезащитную обработку полиэфирных материалов различной плотности проводили одинаковыми объемами исследуемых вариантов составов, при этом мокрый и сухой привес на огнезащищенном полиэфирном материале (O3M) составлял 99–100 % и 30,2–34,4 % соответственно. Стирку образцов выполняли по ГОСТ 30157.1–95¹ при 40 °C в течение 15 мин.

Устойчивость к горению огнезащищенных образцов определялась по ГОСТ Р 50810–95². Согласно данному нормативному документу классификации «трудновоспламеняемый» соответствует материал, не поддерживающий самостоятельного горения (не более 5 с) при средней длине обугливания не более 150 мм. При несоблюдении этих условий материал является легковоспламеняемым.

Исследования методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) исходных и огнезащищенных тканей после стирки проводили на приборе Netzch STA 449С (Германия) в воздушной атмосфере при скорости подъема температуры 10 °С/мин в интервале температур 30–600 °С. Суммарное теплопоглощение ($\Sigma Q_{_{3K30}}$, Дж/г) рассчитывали с использованием программного приложения по площади комплексных пиков экзо- и эндоэффектов. Содержание фосфора и хлора (основных компонентов синергической композиции) на полиэфирных тканях после стирок определяли на спектрометре фирмы PANalytical с автоматической обработкой данных по программе Epsilon 3.

Размеры коллоидных частиц в объеме исследуемых синтетических замедлителей горения определяли с использованием просвечивающего электронного микроскопа LEO-906 Е (производство ZEISS). Частицы препарировали нанесением на медную сеточку с пленкой коллодия капли исследуемого раствора, после высыхания капли сеточку промывали дистиллированной водой для удаления растворимых солей. Минимально различимые в электронном микроскопе частицы имели размер ~ 1 нм. Фазовый состав соединений в замедлителе горения исследовали на дифрактометре ДРОН-2 (Си*К*_а-излучение). Кристаллические фазы идентифицировали с помощью программного обеспечения JCDD [42]. Спектроскопическое исследование исходных и огнезащищенных образцов после стирки проводили на инфракрасном спектрометре с Фурье-преобразованием Alpha (производство Bruker). Калибровка прибора выполнена с использованием стандартного образца – пленки полистирола N 0101, по ГОСТ 12998–85³. Для достоверности получае-

¹ ГОСТ 30157.1–95. Полотна текстильные. Методы определения изменения размеров после мокрых обработок или химической чистки. URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4294813/4294813973.pdf

² ГОСТ Р 50810–95. Пожарная безопасность текстильных материалов. Ткани декоративные. Метод испытания на воспламеняемость и классификация. М.: Госстандарт России, 1995. 9 с.

³ ГОСТ 12998–85. Пленка полистирольная. Технические условия: межгосударственный стандарт. М: ИПК Издательство стандартов, 1999. 11 с.

мых экспериментальных данных измеряемые характеристики определялись из среднеарифметических значений трех-шести измерений в соответствии с требованиями ГОСТ 8.207-76¹.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты испытаний огнезащищенных материалов (O3M) различной плотности (табл. 1) показали, что огнезащитный эффект после стирок для образцов с низкой плотностью (65 и 114 г/м²) сохраняется при всех рецептурных вариантах исследуемых огнезащитных составов (ОС). Номера ОС и обработанных ими О3M совпадают.

Таблица 1. Содержание основных компонентов замедлителей горения и характеристики горючести полиэфирных материалов различной плотности после стирки

Эксперимен- тальная серия	Номер огнезащитного состава и обработанного им экспериментального образца	Компоненты огнезащитного состава	Содержание компонентов, мас.%	Горючесть полиэфирных тканей различной плотности, г/м ² Flammability* of polyester fabrics of various densities, g/m ²			
Experimental series	of fire-proof polyester materials	Flame retardant components	Component content, wt.%	65	114	145	204
	1	OC _{баз} : H ₂ O	25 : 75	_	_	+	+
I	2	$OC_{\delta a_3}$: $\Gamma\Pi\Phi$: H_2O	22:3:75	-	_	+	+
	3	OC_{5a3} : $\Pi \Im \Gamma$: H_2O	25:10:65	-	-	+	+
	4	$OC_{\text{dag}}: \Gamma\Pi\Phi:\Pi\Im\Gamma:H_2O$	22:3:10:65	-	-	+	+
II	5	OC_{6a3} : $SnCl_2$: H_2O	23,5 : 1,5 : 75	_	_	+	+
	6	$OC_{\delta a_3}$: $SnCl_2$: $\Gamma\Pi\Phi$: H_2O	20,5 : 1,5 : 3 : 75	_	_	+	+
	7	$OC_{\delta a_3}$: $SnCl_2 : \Pi \Im \Gamma : H_2O$	23,5:1,5:10:65	_	_	+	+
	8	OC_{6a_3} : $SnCl_2$: $\Gamma\Pi\Phi$: $\Pi\Im\Gamma$: H_2O	20,5 : 1,5 : 3 : 10 : 65	-	-	-	-



Примечание: OC_{баз} – неорганический огнезащитный состав, ГПФ – гипофосфит натрия, ПЭГ – полиэтиленгликоль; ^{*} – категория воспламеняемости: + легковоспламеняемый, – трудновоспламеняемый.

N o t e: $OC_{\delta a_3}$ – inorganic flame retardant, $\Gamma\Pi\Phi$ – sodium hypophosphite, $\Pi\Theta\Gamma$ – polyethylene glycol; * – flammability category according: + flammable, – flame-retardant

Однако устойчивого огнезащитного эффекта для тканей плотностью 145 и 204 г/м² с использованием огнезащитных составов ОС1–ОС4 достичь не удалось. Для усиления реакционной способности базового и модифицированных составов (ОС1–ОС4, серия I) проведена их дополнительная модификация введением в реакционную смесь коллоидного раствора хлорида олова (ОС5–ОС8, серия II).

Как видно из полученных данных, сохранение огнезащитного эффекта после стирок на плотных тканях (145 и 204 г/м²) удалось получить только с использованием OC8, содержащего полный набор модифицирующих агентов. Рентгенофазовым исследованием синтетического OC_{баз} и OC1–OC8 на его основе, модифицированных введением дополнительных компонентов, установлено, что все изученные OC состоят из аморфных и кристаллических неидентифицируемых соединений, что также характерно для продуктов их термообработки.

С целью нахождения факторов, оказывающих определяющее влияние на получение устойчивого огнезащитного эффекта, проведены термические исследования как самих замедлителей горения (OC1–OC8), так и огнезащищенной ими полиэфирной ткани плотностью 204 г/м² (O3M1–O3M8). Для получения сопоставимых данных при проведении комплексного термического анализа использовали близкие навески для всех образцов. Одновременно в тканевых стираных образцах определяли содержание фосфора, хлора и олова, входящих в состав исследуемых OC.

¹ ГОСТ 8.207-76. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения: межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2008. 9 с.



Рис. 1. Данные дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК): *а* – для огнезащитных составов (кривая *l* – OC8; кривая *2* – OC5); *b* – для полиэфирной ткани плотностью 204 г/м² (кривая *l* – исходный образец; кривая *2* – O3M8 после стирки)

Fig. 1. Differential scanning calorimetry (DSC) data for: a – fire-retardant compounds (curve 1 – OC8; curve 2 – OC5; b – polyester fabric with a density of 204 g/m² (curve 1 – original sample; curve 2 – O3M8 after washing). Here and further: OC – fireprotecting composition, O3M – fireprotected material

Термические превращения огнезащитных составов серий I и II характеризуются наличием двух эндоэффектов при температурах ~ 200 °C и ~ 260 °C. В присутствии модифицирующих добавок в этих ОС при сохранении температурных интервалов эндоэффектов наблюдается снижение суммарного теплопоглощения, а в присутствии гипофосфита натрия (ОС2; ОС4; ОС6; ОС8) существенно снижается потеря массы (рис. 1, *a*, табл. 2).

Эксперимен- тальная серия Experimental series	Огнезащитный состав Flame retardant	$T_{начала потери массы, °С Mass loss onset temperature , °С$	T _{1 эндоэффекта} , °C Temperature of the first heat absorption effect, °C	$T_{2 \text{ эндоэффекта}},$ °C Temperature of the second heat absorption effect, °C	$\Sigma Q_{_{ m Эндо}},$ Дж/г Total heat absorption, J/g	Остаток массы, % Remaining mass, %
Ι	OC1	219	192	258	1673	32,70
	OC2	219	194	248	1128	45,14
	OC3	199	196	236	1285	32,31
	OC4	203	193	239	728	40,41
II	OC5	223	193	259	1516	25,81
	OC6	180	194	256	1437	44,96
	OC7	205	195	253	1043	21,18
	OC8	228	197	236	1180	34,26

Таблица 2. Результаты комплексного термического анализа огнезащитных составов Table 2. Results of complex thermal analysis of fire-retardant compositions

Иная картина характерна для комплексного термического анализа постиранных огнезащищенных образцов ткани I и II серий (обработанных соответствующими OC), где для всех O3M зарегистрирован сдвиг второго экзоэффекта пиролиза полиэфирной матрицы в высокотемпературную область при одновременном снижении суммарного количества выделяющегося тепла (см. рис. 1, *b*). Кроме того, наблюдается очевидная разница в количественном значении термических параметров образцов I и II серий. Так, для O3M8, в отличие от O3M4, не содержащего олова при одинаковом содержании других компонентов, регистрируется в 1,4 раза меньшее тепловыделение и более существенный сдвиг второго экзоэффекта в высокотемпературную область на 33 °C и 23 °C по сравнению с исходной тканью (табл. 3). Эти данные согласуются с результатами химического анализа постиранных образцов I и II серий (табл. 4): содержание ингибирующих элементов (P, Cl) на тканевых образцах второй серии в 1,7–1,8 раза выше на всех этапах модифицирования по сравнению с образцами серии I, не содержащими хлорид олова.

Таблица 3. Термические характеристики огнезащищенной полиэфирной ткани плотностью 204 г/м² Table 3. Thermal characteristics of flame-retardant polyester fabric with a density of 204 g/m²

Эксперимен- тальная серия Experimental series	Homep экспериментального образца огнезащищенных полиэфирных материалов The number of the experimental sample fire-resistant polyester materials	T _{начала потери} массы, °С Mass loss onset temperature, °С	$T_{1 \text{ > sx a o s \phi \phi e k r a}}$ °C Temperature of the first heat absorption effect, °C	$T_{2 \text{ экзоэффекта}}, ^{\circ}C$ Temperature of the second heat absorption effect, $^{\circ}C$	Высота второго экзо-эффекта, мВт/мг Height of the second heat absorption effect, mW/mg	ΣQ _{экзо} , Дж/г Total heat absorption, J/g
Исходная ткань original fabric		408	437	520	14,2	7687
	O3M1	405	437	543	12,5	6799
т	O3M2	400	430	558	5,3	4309
1	O3M3	381	436	551	8,5	4902
	O3M4	389	435	543	7,4	4746
Ш	O3M5	403	438	542	10,8	6692
	O3M6	404	437	555	7,7	5259
	O3M7	400	437	556	7,2	3856
	O3M8	403	433	553	7,2	3355

Таблица 4. Аналитические характеристики огнезащищенной полиэфирной ткани плотностью 204 г/м² после стирки

Table 4.	Analytical	characteristics	of flame-ret	ardant polyester	• fabric wit	h a density	of 204 g/m ²
----------	------------	-----------------	--------------	------------------	--------------	-------------	-------------------------

Эксперимен- тальная серия	Номер экспериментального образца огнезащищенных полиэфирных материалов	Содержание ингибирующих элементов, % The content of inhibitory elements, %			
Experimental series	series The number of the experimental sample fire-resistant polyester materials		Cl	Sn	
	Исходная ткань original fabric	_	_	_	
	O3M1	0,158	0,077	-	
т	O3M2	0,161	0,085	-	
1	O3M3	0,164	0,103	_	
	O3M4	0,249	0,116	_	
	O3M5	0,169	0,138	0,029	
II	O3M6	0,294	0,147	0,029	
11	O3M7	0,296	0,166	0,030	
	O3M8	0,448	0,198	0,084	

Таким образом, из результатов комплексного термического анализа исходной и огнезащищенной полиэфирной ткани после стирки следует, что каждый из компонентов ОС по отдельности и в сочетании друг с другом оказывает существенное влияние на ее термические характеристики: сдвиг максимума второго экзоэффекта, соответствующего полному разложению полимерной матрицы, в высокотемпературную область и снижение суммарного количества тепла при термолизе полиэфирного материала. Вместе с тем, несмотря на одинаковые тенденции в термическом поведении огнезащищенных различными вариантами ОС полиэфирных материалов, требуемой категории по горючести «трудновоспламеняемый» после стирки соответствует только материал ОЗМ8, термические параметры которого в наибольшей степени отличаются от аналогичных характеристик исходного материала (см. рис. 1, b, табл. 3). Достижение такого результата обусловлено более высоким количественным содержанием ингибирующих элементов (P - 0,448 %, Cl - 0,198 %) в O3M8 по сравнению с другими вариантами модификации OC, что позволило изменить условия тепло- и массопереноса между пиролизирующимся в конденсированной фазе полимерным материалом и пламенной зоной. Соединения фосфора образуют термоизолирующие расплавы и карбонизованные структуры на горящей поверхности, а галогенсодержащие летучие продукты ингибируют радикальные реакции в газовой фазе.

Проведением термических и аналитических исследований ОЗМ с плотностью 65 и 114 г/м² и, следовательно, более низкой пожарной нагрузкой установлено, что для этих материалов перманентный огнезащитный эффект достигается при содержании фосфора 0,047 и 0,076 %; хлора – 0,108 и 0,127 % соответственно. Полученные данные свидетельствуют, что перманентный эффект огнезащиты для материалов различной плотности может быть получен при достижении определенного количества компонентов замедлителя горения, зависящего от плотности содержания ингибирующих элементов, хемосорбированных на инертной полимерной поверхности. Этот факт необходимо учитывать как при разработке рецептур замедлителей горения, так и технологии их применения.

Для выяснения причин более высокой реакционной способности оловосодержащих замедлителей горения проведены электронно-микроскопические исследования коллоидной фазы в объеме огнезащитных составов ОС4 и ОС8 с одинаковым набором модифицирующих агентов, кроме отсутствия в рецептуре ОС4 хлорида олова. Как видно из рис. 2, размер первичных коллоидных частиц в объеме обоих составов одинаков и составляет 4–8 нм. Однако в композиции ОС8 эти частицы не агломерируют в течение длительного времени и равномерно распределены по всему объему, тогда как в композиции ОС4 первичные частицы собираются в более крупные и неравномерно распределенные агломераты, что, очевидно, связано с комплексным составом и прочностью сольватной оболочки частиц.

В соответствии с полученными данными можно предположить, что устойчивость к стиркам полиэфирных материалов, обработанных OC8, обусловлена взаимодействием реакционноспособных коллоидных частиц в объеме OC8 с поверхностными активными группами полиэфирной матрицы, приводящим к прочной хемосорбции антипирирующих соединений.

Для проверки этого предположения проведено ИК-спектроскопическое исследование материалов, обработанных ОС8, после стирок. На рис. 3 показаны ИК-спектры исходной и огнезащищенной полиэфирной ткани после стирки, которые имеют существенные отличия, заключающиеся в появлении новых полос. Так, в области валентных колебаний С=О для огнезащищенного образца наблюдается уширение характеристичной полосы эфирной связи в области 1726,1 см⁻¹ [45, 46].

Кроме того, появление характеристических полос $-CH_2-O-CH_2-$ в области 1066–1471 см⁻¹ свидетельствует о разрушении эфирных связей полимера. Этот факт подтверждает участие карбонильной группы на поверхности ПЭТФ в химическом взаимодействии с компонентами огнезамедлительной системы. Также обращают на себя внимание изменения ИК-спектра в области от 2000 до 3000 см⁻¹, что может служить доказательством активации поверхности ПЭТФ, в том числе и за счет появления ОН-групп, колебания которых зарегистрированы в диапазоне 3000–3500 см⁻¹.

Данные ИК-спектроскопического исследования согласуются с результатами количественного содержания ингибирующих элементов на полиэфирной матрице после стирки, где наиболее



Рис. 2. ПЭМ-фотографии частиц в объеме составов ОС4 (*a*) и ОС8 (*b*) Fig. 2. TEM photographs of particles in the bulk of compositions OC4 (*a*) and OC8 (*b*)



Рис. 3. ИК-спектр исходного (*a*) и обработанного ОС8 полиэфирного материала после стирки (*b*) Fig. 3. IR spectrum of the original (*a*) and treated with OC8 polyester material after washing (*b*)

высокое их присутствие обнаружено на ткани, обработанной OC8 с полным набором модифицирующих агентов. Это позволяет предположить образование между активными группами полимерной матрицы и компонентами огнезащитной композиции химических связей типа:

Следует отметить, что ранее методом рентгенофотоэлектронной спектроскопии нами обнаружен факт химического взаимодействия компонентов огнезамедлительной смеси при наличии или направленном формировании активных центров на поверхности инертного полимера [36, 38, 47].

Заключение. Методом поверхностной огнезащитной обработки полиэфирных текстильных материалов различной плотности синтетической композицией неорганических замедлителей горения получен устойчивый к стиркам эффект огнезащиты, достигаемый за счет хемосорбционного взаимодействия компонентов антипиреновой композиции с полимерной матрицей. Установлен фактор, влияющий на возможность хемосорбции компонентов огнезамедлительной системы на поверхности полиэфирной ткани: присутствие в пропиточном составе медиативного агента – хлорида олова (II).

Определены концентрационные пределы содержания ингибирующих элементов и медиативного агента на ПЭТФ ткани после стирки, в которых достигается долгосрочная огнезащита за счет изменения условий тепломассопереноса между пиролизующимся в конденсированной фазе материалом и пламенной зоной.

Результаты данных исследований позволят оптимизировать технологии поверхностной огнезащитной обработки применением новых нетоксичных экономичных замедлителей горения с получением водостойких огнезащищенных материалов из полиэфирных волокон для защитной одежды пожарных, металлургов, сварщиков и текстильных изделий в местах массового пребывания людей.

Список использованных источников

1. Зубкова, Н. С. Снижение горючести текстильных материалов – решение экологических и социально-экономических проблем / Н. С. Зубкова, Ю. С. Антонов // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева). – 2002. – Т. XLVI, № 1. – С. 96–102.

2. Оценка пожарной опасности материалов палаток детских временных лагерей отдыха / Н. И. Константинова, А. В. Зубань, Е. А. Поединцев, Н. В. Голов // Пожаровзрывобезопасность. – 2021. – Т. 30, № 2. – С. 5–15. https://doi. org/10.22227/PVB.2021.30.01.5-15

3. Сабирзянова, Р. Н. Современные тенденции в производстве огнестойких текстильных материалов / Р. Н. Сабирзянова, И. В. Красина // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 9, № 5. – С. 75–79.

4. Horrocks, A. R. Flame retardant textile finishes / A. R. Horrocks // Textile Finishing: Recent Developments and Future Trends / eds: K. L. Mittal, T. Bahners. – Wiley, 2017. – Ch. 2. – P. 69–127. https://doi.org/10.1002/9781119426790.ch2

5. Шебеко, А. Ю. Пожарная опасность текстильных материалов на основе полиэфирных волокон для вагонов железнодорожного транспорта / А. Ю. Шебеко, Н. И. Константинова, С. Г. Цариченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – Т. 29, № 1. – С. 32–42. https://doi.org/10.18322/PVB.2020.29.01.32-42

6. Перепелкин, К. Е. Горючесть текстиля как одна из его важнейших характеристик / К. Е. Перепелкин // Химические волокна. – 2001. – № 5. – С. 8–42.

7. Кричевский, Г. Е. Роль химии в производстве текстиля. Эволюция и революция в текстильной химии / Г. Е. Кричевский // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева). – 2002. – Т. XLVI, № 1. – С. 5–8.

8. Перепелкин, К. Е. Современные химические волокна и перспективы их применения в текстильной промышленности / К. Е. Перепелкин // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева). – 2002. – Т. XLVI, № 1. – С. 31–47.

9. Морыганов, А. П. Разработка новых способов получения и модификации перспективных текстильных материалов на основе отечественного сырья / А. П. Морыганов // Текстильная химия. – 1998. – № 1. – С. 82–95.

10. Wail, E. D. Flame retardants in commercial use or development for textiles / E. D. Wail, S. V. Levchik // Journal of Fire Sciences. - 2008. - Vol. 26, Iss. 3. - P. 243-281. https://doi.org/10.1177/0734904108089485

11. Horrocks, A. R. Flame retardant challenges for textile and fibers: New chemistry versus innovatory solutions / A. R. Horrocks // Polymer Degradation and Stability. – 2011. – Vol. 96, Iss. 3. – P. 377–392. http://doi.org/10.1016/j. polymdegradstab.2010.03.036

12. Химические волокна, основы получения, методы исследования и модифицирования: учеб. пособие для хим.технол. фак. высш. учеб. заведений / под ред. Т. В. Дружининой. – М.: Моск. госуд. текстил. ун-т им. А. Н. Косыгина, 2006. – 472 с.

13. Модифицирование полиолефинов – современное направление создания полиолефиновых материалов с новым комплексом свойств / И. Н. Мешкова, Т. М. Ушакова, Н. М. Гульцева [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2008. – Т. 50, № 11. – С. 1985–1989.

14. Высокочастотная плазменная обработка в динамическом вакууме капиллярно-пористых материалов: теория и практика применения / И. Ш. Абдуллин, Л. Н. Абуталипова, В. С. Желтухин, И. В. Красина. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2004. – 428 с.

15. Модификация синтетических волокон и нитей: обзор / И. П. Ершов, Е. А. Сергеева, Л. А. Зенитова, И. Ш. Абдуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 18. – С. 136–143.

16. Волынский, А. П. Крейзинг полимеров в жидких средах – универсальный непрерывный способ введения в полимерное волокно модифицирующих добавок / А. П. Волынский, Л. М. Ярышева, Н. Ф. Бакеев // Химические волокна. – 2006. – № 2. – С. 46–50.

17. Пророкова, Н. П. Химический способ поверхностной активации волокнистых материалов на основе полиэтилентерефталата. Ч. 1: Исследование модифицирующего действия растворов гидроксида натрия и препаратов на основе четвертичных аммониевых солей / Н. П. Пророкова, А. В. Хорев, С. Ю. Вавилова // Химические волокна. – 2009. – № 3. – С. 11–16.

18. Плазменно-растворная модификация полиэтилентерефталатного волокнистого материала / С. М. Кузьмин, Н. П. Пророкова, А. В. Хорев, С. Ю. Вавилова // Химические волокна. – 2010. – № 1. – С. 26–30.

19. Carosio, F. Influence of surface activation by plasma and nanoparticle adsorption on the morphology thermal stability and combustion of PET fabrics / F. Carosio, G. Alongi, A. Frache // European Polymer Journal. – 2011. – Vol. 47, Iss. 5. – P. 893–902. https://doi.org/10.1016/j.europlymj.2011.01.009

20. Salmeia, K. A. Recent advances for flame retardancy of textiles based on phosphorus chemistry / K. A. Salmeia, S. Gaan, G. Malucelli // Polymers. – 2016. – Vol. 8, Iss. 9. – P. 319–355. https://doi.org/10.3390/polym8090319

21. Константинова, Н. И. О требованиях к проведению огнезащиты текстильных материалов / Н. И. Константинова, А. В. Зубань // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 57–62. https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-1-57-62

22. Durable flame-retardant finishing for silk fabric using boron hybrid silica sol / Q. H. Zhang, J. Gu, G. Q. Chen, T. L. Xing// Applied Surface Science. – 2016. – Vol. 387. – P. 446–453. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.06.119

23. Проблемные вопросы придания текстильным материалам специальных защитных свойств / С. А. Сырбу, О. Г. Циркина, А. Х. Салихова [и др.]. // Современные проблемы гражданской защиты. – 2023. – № 2 (47). – С. 133–139.

24. Спиридонова, В. Г. Обоснование актуальных подходов к оценке пожароопасных свойств текстильных материалов и способов огнезащиты тканей различного функционального назначения / В. Г. Спиридонова, Д. В. Сорокин, А. Л. Никифоров // Современные проблемы гражданской защиты. – 2023. – № 2 (47). – С. 125–132.

25. Flame retardant based on amino silanes and phenilphosphonic asid / R. S. Kappes, T. Urbainczyk, U. Artz [et al.] // Polymer Degradation and Stability. – 2016. – Vol. 129. – P. 168–179. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.04.012

26. Comparative analysis Nanaparticle Adsorption as Fire-Protection approach for Fabrics / Y. Alagni, Y. Tata, F. Carosio [et al.] // Polymers. – 2015. – Vol. 7, Iss. 1. – P. 47–68. https://doi.org/10.3390/polym7010047

27. Wan Norfazilah Wan Ismail. Sol-gel technology for innovative fabric finishing – A Review / Wan Norfazilah Wan Ismail // Journal of Sol-Gel Science and Technology. – 2016. – Vol. 78. – P. 698–707. https://doi.org/10.1007/s10971-016-4027-y

28. Malucelli, G. Surface-Engineered Fire Protective Coatings for Fabrics through Sol-Gel and Layer-by-Layer Methods: An Overview // Coatings. – 2016. – Vol. 6, № 3. – P. 33–56. https://doi.org/10.3390/coatings6030033 29. Thermal stability and flame retardancy of polyester, cotton and relative blend textile fabrics subjected to sol-gel treatments / G. Alongi, M. Cuofanu, J. Tata [et al.] // Journal of Applied Polymer Science. – 2011. – Vol. 119, Iss. 4. – P. 1961–1969. https://doi.org/10.1002/app.32954

30. Resent developments in the fire retardancy of polymer materials / A. Dasari, Z. Yu, C. P. Cai, J. W. Ma // Progress in Polymer Science. - 2013. - Vol. 38, Iss. 9. - P. 1357-1387. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsi.2013.06.006

31. The role of pre-hydrolysis on multistep sol-gel processes for enhancing the flame retardancy of cotton / G. Alongi, C. Collconi, G. Rosare, G. Malucelli // Cellulose. – 2013. – Vol. 20. – P. 525–535. https://doi.org/10.1007/s10570-012-9806-1

32. Разработка огнезащитных составов для текстильных материалов / С. А. Сырбу, В. А. Бурмистров, Д. Б. Самойлов, А. Х. Салихова // Технология техносферной безопасности. – 2011. – Вып. 5 (39). – С. 1–7.

33. Коновалова, М. В. Поверхностная модификация и крашение полиэфирных волокон с использованием магнитоактивированных водных растворов / М. В. Коновалова, Ю. М. Рабаева // Химические волокна. – 2007. – № 4. – С. 41–44.

34. Влияние состава неорганических замедлителей горения, хемосорбированных на полиэфирном волокнистом материале, на закономерности его термодеструкции / О. В. Рева, В. В. Богданова, А. Н. Назарович, З. В. Шукело // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – Т. 23, № 1. – С. 4–12.

35. Зависимость эффективности огнезащиты нетканого полиэфирного материала от химической природы азоти фосфорсодержащего антипирена / О. В. Рева, В. В. Богданова, А. С. Лукьянов [и др.] // Журнал Белорусского Государственного университета. Серия: Химия. – 2017. – № 2. – С. 85–93.

36. Химическая прививка неорганических функциональных слоев к инертным полимерам / О. В. Рева, В. В. Богданова, З. В. Шукело, Л. В. Радкевич // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2011. – Т. 16, № 3. – С. 90–94.

37. Назарович, А. Н. Критерий разработки эффективных неорганических замедлителей горения для нетканых тонковолокнистых полиэфирных материалов / А. Н. Назарович, О. В. Рева // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6, № 3. – С. 263–275. https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-3.263

38. Рева, О. В. Химическая прививка огнезащитных композиций к полиэфирным матрицам / О. В. Рева, В. В. Богданова, З. В. Шукело // Свиридовские чтения: сб. ст. – Минск: БГУ, 2013. – Вып. 9. – С. 158–168.

39. Рева, О. В. Получение перманентной огнезащиты полиэтилентерефталата наноразмерными азотфосфорсодержащими антипиренами / О. В. Рева, В. В. Богданова, А. С. Лукьянов // Наноструктурные материалы – 2016: Беларусь – Россия – Украина (НАНО–2016): материалы V Междунар. науч. конф., Минск, 22–25 нояб. 2016 г. – Минск: Беларус. навука, 2016. – С. 205–208.

40. Богданова, В. В. Влияние рецептурного состава металлофосфатных огнезамедлительных систем и модифицирующих добавок на устойчивость огнезащитной отделки полиэфирных тканей к гидролизной обработке / В. В. Богданова, О. И. Кобец, О. В. Рева // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 4.– С. 423–436. https://doi.org/10.33408/2519-237X.2024.8-4.423

41. Механизм интенсифицирующего действия окислительно-восстановительных систем в процессе крашения шерсти кислотными и активными красителями / О. В. Петрова, Л. Э. Ермакова, А. А. Буринская, С. Ф. Гребенников // Технология текстильной промышленности. – 2006.– № 2 (289). – С. 61–65.

42. Новые огнетушащие составы для полиэфирных волокон / О. В. Головешкина, И. Я. Шипинский, Н. А. Кейбал [и др.] // Информационное пространство современной науки: сб. материалов II Междунар. заоч. науч.-практ. конф., Чебоксары, 18 сент. 2010 г. – Чебоксары, 2010. – С. 118–120.

43. Богданова, В. В. Исследование условий предварительной химической активации тканого полиэфирного материала для усиления эффективности его огнезащитной отделки / В. В. Богданова, О. И. Кобец, З. В. Шукело // Инновационные технологии защиты от чрезвычайных ситуаций: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., 23 сент. 2023 г. – Минск: УГЗ, 2023. – С. 31–32.

44. Powder Diffraction File. JcpDS. Int. Centre for Diffraction Data. - Swarthmore, 1989. - URL: https://www.icdd.com

45. Беллами, Л. Инфракрасные спектры сложных молекул / Л. Беллами. – М.: Изд-во иностран. лит., 1963. – 590 с. 46. Electron beam induced surface modifications of PET film / A. A. El-Saftawy, A. Elfalaky, M. S. Ragheb,

S. G. Zakhary // Radiation Physics and Chemistry. – 2014. – Vol. 102. – Р. 96–102. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.04.025 47. Рева, О. В. Закрепление неорганических антипиренов на поверхности полиэфирных волокон / О. В. Рева,

А. Н. Назарович, В. В. Богданова // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3, № 2. – С. 107–116.

References

1. Zubkova N. S., Antonov Yu. S. Reducing the flammability of textile materials – a solution to environmental and socio-economic problems. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal (Zhurnal Rossiiskogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva)* [Russian Chemical Journal (Journal of the D. I. Mendeleev Russian Chemical Society)], 2002, vol. XLVI, no. 1, pp. 96–102 (in Russian).

2. Konstantinova N. I., Zuban' A. V., Poedinczev E. A., Golov N. V Assessment of fire hazard of materials of tents of children's temporary recreation camps. *Pozharovzryvobezopasnost' = Fire and Explosion Safety*, 2021, vol. 30, no. 2, pp. 5–15 (in Russian). https://doi.org/10.22227/PVB.2021.30.01.5-15

3. Sabirzyanova R. N., Krasina I. V. Modern trends in the production of fire-resistant textile materials. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2013, vol. 9, no. 5, pp. 75–79 (in Russian).

4. Horrocks A. R. Ch. 2. Flame retardant textile finishes. Mittal K. L., Bahners T. (eds.). *Textile Finishing: Recent Developments and Future Trends*. Wiley, 2017, pp. 69–127. https://doi.org/10.1002/9781119426790.ch2

5. Shebeko A. Yu., Konstantinova N. I., Tsarichenko S. G. Fire hazard of textile materials based on polyester fibers for railway cars. *Pozharovzryvobezopasnost' = Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 32–42 (in Russian). https://doi. org/10.18322/PVB.2020.29.01.32-42

6. Perepelkin K. E. Flammability of textiles as one of its most important characteristics. *Khimicheskie volokna* [Chemical Fibers], 2001, no. 5, pp. 8–42 (in Russian).

7. Krichevskij G. E. The role of chemistry in textile production. Evolution and revolution in textile chemistry. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal (Zhurnal Rossiiskogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva)* [Russian Chemical Journal (Journal of the D. I. Mendeleev Russian Chemical Society)], 2002, vol. XLVI, no. 1, pp. 5–8 (in Russian).

8. Perepelkin K. E. Modern chemical fibers and prospects of their application in the textile industry. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal (Zhurnal Rossiiskogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva)* [Russian Chemical Journal (Journal of the D. I. Mendeleev Russian Chemical Society)], 2002, vol. XLVI, no. 1, pp. 31–47 (in Russian).

9. Moryganov A. P. Development of new methods for producing and modifying promising textile materials based on domestic raw materials. *Tekstil'naya khimiya* [Textile Chemistry], 1998, no. 1, pp. 82–95 (in Russian).

10. Wail E. D., Levchik S. V. Flame retardants in commercial use or development for textiles. *Journal of Fire Sciences*, 2008, vol. 26, iss. 3, pp. 243–281. https://doi.org/10.1177/0734904108089485

11. Horrocks A. R. Flame retardant challenges for textile and fibres: New chemistry versus innovatory solutions. *Polymer Degradation and Stability*, 2011, vol. 96, iss. 3, pp. 377–392. http://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.03.036

12. Druzhinina T. V. (ed.). *Chemical Fibers, Basics of Production, Methods of Research and Modification*. Moscow, Moscow State Textile University named after A. N. Kosygin, 2006. 472 p. (in Russian).

13. Meshkova I. N., Ushakova T. M., Gul'tseva N. M., Grinev V. G., Ladygina T. A., Novokshonova L. A. Modification of polyolefins is a modern direction in creating polyolefin materials with a new set of properties. *Polymer Science Series A*, 2008, vol. 50, no. 11, pp. 1161–1174. https://doi.org/10.1134/s0965545x08110060

14. Abdullin I. Sh., Abutalimova L. N., Zheltukhin V. S., Krasina I. V. *High-Frequency Plasma Processing of Capillary-Porous Materials in Dynamic Vacuum: Theory and Practice of Application*. Kazan', Kazan University Publishing House, 2004. 428 p. (in Russian).

15. Ershov I. P., Sergeeva E. A., Zenitova L. A., Abdullin I. Sh. Modification of synthetic fibers and threads: Review. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2012, vol. 15, no. 18, pp. 136–143 (in Russian).

16. Volynskij A. P., Yarysheva L. M., Bakeev N. F. Crazing of polymers in liquid media is a universal continuous method of introducing modifying additives into polymer fiber. *Khimicheskie volokna* [Chemical Fibers], 2006, no. 2, pp. 46–50 (in Russian).

17. Prorokova N. P., Khorev A. V., Vavilova S. Yu. Chemical method of surface activation of fibrous materials based on polyethylene terephthalate. Part 1: Study of the effect of sodium hydroxide solutions and preparations based on quaternary ammonium salts. *Khimicheskie volokna* [Chemical Fibers], 2009, no. 3, pp. 11–16 (in Russian).

18. Kuz'min S. M., Prorokova N. P., Khorev A. V., Vavilova S. Yu. Plasma-solution modification of polyethylene terephthalate fibrous material. *Khimicheskie volokna* [Chemical Fibers], 2010, no. 1, pp. 26–30 (in Russian).

19. Carosio F., Alongi G., Frache A. Influence of surface activation by plasma and nanoparticle adsorption on the morphology thermal stability and combustion of PET fabrics. *European Polymer Journal*, 2011, vol. 47, iss. 5, pp. 893–902. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2011.01.009

20. Salmeia K. A., Gaan S., Malucelli G. Recent advances for flame retardancy of textiles based on phosphorus chemistry. *Polymers*, 2016, vol. 8, iss. 9, pp. 319–355. https://doi.org/10.3390/polym8090319

21. Konstantinova N. I., Zuban' A. V. On the requirements for fire protection of textile materials. *Bezopasnost' truda* v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry, 2022, no. 1, pp. 57–62 (in Russian). https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-1-57-62

22. Zhang Q. H., Gu J., Chen G. Q., Xing T. L. Durable flame-retardant finish for silk fabric using boron hybrid silica sol. *Applied Surface Science*, 2016, vol. 387, pp. 446–453. https://doi.org//10.1016/j.apsusc.2016.06.119

23. Sirbu S. A., Czirkina O. G., Salikova A. Kh., Spiridonova V. G., Frolova T. V., Kuz'mina N. N. Problematic issues of imparting special protective properties to textile materials. *Sovremennyye problemy grazhdanskoi zashchity = Modern Problems of Civil Protection*, 2023, no. 2, pp. 133–139 (in Russian).

24. Spiridonova V. G., Sorokin D. V., Nikiforov A. L. Justification of current approaches to assessing the fire hazardous properties of textile materials and methods of fire protection of fabrics for various functional purposes. *Sovremennyye problemy grazhdanskoi zashchity = Modern Problems of Civil Protection*, 2023, no. 2 (47), pp. 125–132 (in Russian).

25. Kappes R. S., Urbainczyk T., Artz U., Textor T., Gutmann J. S. Flame retardant based on amino silanes and phenilphosphonic asid. *Polymer Degradation and Stability*, 2016, vol. 129, pp. 168–179. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.04.012

26. Alagni Y., Tata Y., Carosio F., Rosare G., Frache A. A Comparative analysis Nanaparticle Adsorption as Fire-Protection approach for Fabrics. *Polymers*, 2015, vol. 7, iss. 1, pp. 47–68. https://doi.org/10.3390/polym7010047

27. Wan Norfazilah Wan Ismail. Sol-gel technology for innovative fabric finishing – A Review. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2016, vol. 78, pp. 698–707. https://doi.org/10.1007/s10971-016-4027-y

28. Malucelli G. Surface-Engineered Fire Protective Coatings for Fabrics through Sol-Gel and Layer-by-Layer Methods: An Overview. *Coatings*, 2016, vol. 6, no. 3, pp. 33–56. https://doi.org/10.3390/coatings6030033

29. Alongi G., Ciobanu M., Tata J., Carosio F., Malucelli G. Thermal stability and flame retardancy of polyester, cotton and relative blend textile fabrics subjected to sol-gel treatments. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, vol. 119, iss. 4, pp. 1961–1969. https://doi.org/10.1002/app.32954

30. Dasari A., Yu Z., Cai C. P., Ma J. W. Resent developments in the fire retardancy of polymer materials. *Progress in Polymer Science*, 2013, vol. 38, iss. 9, pp. 1357–1387. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsi.2013.06.006

31. Alongi G., Collconi C., Rosare G., Malucelli G. The role of pre-hydrolysis on multistep sol-gel processes for enhancing the flame retardancy of cotton. *Cellulose*, 2013, vol. 20, pp. 525–535. https://doi.org/10.1007/s10570-012-9806-1

 Sirbu S. A., Burmistrov V. A., Samoilov D. B., Salikhova A. Kh. Development of fire-retardant compositions for textile materials. *Tekhnologiya tekhnosfernoi bezopasnosti = Technosphere Security Technologies*, 2011, vol. 5 (39), pp. 1–7 (in Russian).
 Konovalova M. V., Rabaeva Yu. M. Surface modification and dyeing of polyester fibers using magnetically activated

aqueous solutions. *Khimicheskie volokna* [Chemical Fibers], 2007, no. 4, pp. 41–44 (in Russian).

34. Reva O. V., Bogdanova V. V., Nazarovich A. N., Shukelo Z. V. Influence of the composition of inorganic flame retardants, chemisorbed on polyester fibrous material, on the patterns of its thermal destruction. *Vestnik komandno-inzhenernogo instituta MCHS Respubliki Belarus* [Bulletin of Command-Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Belarus Republic], 2016, vol. 23, no. 1, pp. 4–12 (in Russian).

35. Reva O. V., Bogdanova V. V., Luk'yanov A. S., Perevoznikov S. S., Andreeva T. M. Dependence of the fire protection efficiency of nonwoven polyester material on the chemical nature of nitrogen-phosphorus-containing fire-retardant. *Zhurnal Belorusskogo Gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya = Journal of the Belarusian State University. Chemistry*, 2017, no. 2, pp. 85–93 (in Russian).

36. Reva O. V., Bogdanova V. V., Shukelo Z. V., Radkevich L. V. Chemical grafting of inorganic functional layers to inert polymers. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty* [Materials. Technologies. Tools], 2011, vol. 16, no. 3, pp. 90–94 (in Russian).

37. Nazarovich A. N., Reva O. V. Criteria for the development of effective inorganic flame retardants for non-woven fine-fiber polyester materials. *Journal of Civil Protection*, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 263–275. https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-3.263

38. Reva O. V., Bogdanova V. V., Shukelo Z. V. Chemical grafting of fire-retardant compositions to polyester matrices. *Sviridovskie chteniya: sbornik statei* [Sviridov Readings: Collection of Articles]. Minsk, Belarusian State University, 2013, Iss. 9, pp. 158–168 (in Russian).

39. Reva O. V., Bogdanova V. V., Luk'yanov A. S. Obtaining permanent fire protection of polyethylene terephthalate with nano-sized nitrogen-phosphorus-containing fire retardants. *Nanostrukturnye materialy – 2016: Belarus' – Rossiya – Ukraina (NANO–2016): materialy V Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Minsk, 22–25 noyabrya 2016 g.* [Nanostructured Materials – 2016: Belarus – Russia – Ukraine (NANO–2016): Proceedings of the V International Scientific Conference, Minsk, November 22–25, 2016]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2016, pp. 205–208 (in Russian).

40. Bogdanova V. V., Kobets O. I., Reva O. V. Influence of the formulation of metal phosphate fire-retardant systems and modifying additives on the resistance of fire-retardant finishing of polyester fabrics to hydrolysis treatment. *Journal of Civil Protection*, 2024, vol. 8, no. 4, pp. 423–436. https://doi.org/10.33408/2519-237X.2024.8-4.423

41. Petrova O. V., Ermakova L. E., Burinskaya A. A., Grebennikov S. F. The mechanism of the intensifying action of redox systems in the process of dyeing wool with acid and active dyes. *Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti* [Textile Industry Technology], 2006, no. 2 (289), pp. 61–65 (in Russian).

42. Goloveshkina O. V., Shipinskii I. Ya., Kejbal N. A., Bondarenko S. N., Kablov V. F. New fire extinguishing compositions for polyester fibers. *Informatsionnoe prostranstvo sovremennoi nauki: sbornik materialov II Mezhdunarodnoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Cheboksary, 18 sentyabrya 2010 g.* [Information Space of Modern Science: Collection of Materials of the II International Correspondence Scientific and Practical Conference, Cheboksary, September 18, 2010]. Cheboksary, 2010, pp. 118–120 (in Russian).

43. Bogdanova V. V., Kobecz O. I., Shukelo Z. V. Study of the conditions for preliminary chemical activation of woven polyester material to enhance the effectiveness of its fire-retardant. *Innovatsionnyye tekhnologii zashchity ot chrezvychaynykh situatsiy: sbornik materialov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferentsii, Minsk, 23 sentyabrya 2023 g.* [Innovative technologies for protection from emergency situations: Collection of Materials of the International Scientific and Practical Conference, Minsk, September 23, 2023]. Minsk, University of Civil Protection, 2023, pp. 31–32 (in Russian).

44. Powder Diffraction File. JcpDS. International Centre for Diffraction Data. Swarthmore, 1989. Available at: https://www.icdd.com

45. Bellamy L. J. The Infra-Red Spectra of Complex Molecules. Dordrecht, Springer, 2013. XIX, 433 p. https://doi. org/10.1007/978-94-011-6017-9

46. El-Saftawy A. A., Elfalaky A., Ragheb M. S., Zakhary S. G. Electron beam induced surface modifications of PET film. *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, vol. 102, pp. 96–102. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.04.025

47. Reva O. V., Nazarovich A. N., Bogdanova V. V. Fixation of inorganic flame retardants on the surface of polyester fibers. *Journal of Civil Protection*, 2019, vol. 3, no. 2, pp. 107–116 (in Russian).

ISSN 1561-8358 (Print) ISSN 2524-244X (Online) https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-124-135 УДК 621.74.01



Оригинальная статья

А. В. Чекулаев^{1*}, В. И. Бородавко¹, П. А. Витязь²

¹ОАО «НПО Центр», ул. Шаранговича, 19, 220018, Минск, Республика Беларусь ²Управление аэрокосмической деятельности аппарата Национальной академии наук Беларуси, пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь

ПОЛУЧЕНИЕ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ С УЛУЧШЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ ПРИ ИХ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

Аннотация. Исследовано влияние центробежных сил на процесс кристаллизации алюминиево-магниевого сплава марки AMr6. Проведен физико-химический и фазовый анализ структур отливок из AMr6, полученных методом центробежного литья. Установлено, что кристаллизация данного сплава в условиях повышенных центробежных сил, характеризующихся коэффициентом гравитационной нагрузки 300–500, позволяет сформировать структуру без возникновения хрупкой фазы $\beta(Mg_2Al_3)$, которая образуется при других традиционных методах литья, в том числе и при центробежном литье с нагрузкой до 250g. Кроме этого, определено, что повышение нагрузки с 300g по 500g позволяет снижать зернистость материала примерно в 2 раза (до значений порядка 50 мкм) и способствует очистке расплава от хрупких железокремниевых соединений в твердом растворе алюминия. Так, доля таких соединений снижается на 10 %, а в сравнении с исходной шихтой плавки – на 20 %. Исследуемое повышение нагрузки дает возможность увеличивать степень легирования кристаллической решетки алюминиевой фазы и получать материал с повышенной прочностью и пластичностью соответственно не менее чем на 10 и 30 %. В результате исследований получен сплав AMr6 с прочностью 275/230 МПа и относительным удлинением 8,9/18,6 % при температуре материал а 20/300 °С соответственно. Показана перспективность использования полученных алюминиево-магниевых сплавов с улучшенными свойствами.

Ключевые слова: центробежное литье, коэффициент гравитационной нагрузки, алюминиевые сплавы, АМг6, расплав, свойства, структура, фазы, прочность, пластичность

Благодарности: работа выполнена в рамках отдельного проекта фундаментальных и прикладных научных исследований по теме «Исследование технологического процесса получения крупногабаритных кольцевых заготовок с улучшенными прочностными характеристиками из алюминиевых сплавов методом центробежного литья и последующей раскатки» по заданию Национальной академии наук Беларуси (договор от 18.12.24 № 2024-26-225).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Чекулаев Андрей Васильевич* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «НПО Центр». E-mail: achekulayeu@npo-center.com, reliable.sys@mail.ru; *Бородавко Владимир Иванович* – генеральный директор ОАО «НПО Центр». E-mail: mail@npo-center.com; *Витязь Петр Александрович* – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, начальник Управления аэрокосмической деятельности аппарата Национальной академии наук Беларуси. E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

Вклад авторов: *Чекулаев Андрей Васильевич* – сбор и анализ литературных данных, вывод зависимостей, проведение экспериментов и исследований, оформление и редактирование текста рукописи, обсуждение результатов и выводов; *Бородавко Владимир Иванович* – сбор и анализ литературных данных, обсуждение результатов и выводов; *Витязь Петр Александрович* – сбор и анализ литературных данных, обсуждение результатов и выводов.

Для цитирования: Чекулаев, А. В. Получение алюминиево-магниевых сплавов с улучшенными свойствами при их кристаллизации в условиях высоких центробежных сил / А. В. Чекулаев, В. И. Бородавко, П. А. Витязь // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 2. – С. 124–135. https:// doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-124-135

Поступила в редакцию: 04.04.2025 Доработанный вариант: 14.05.2025 Утверждена к публикации: 12.06.2025 Подписана в печать: 19.06.2025

[©] Чекулаев А. В., Бородавко В. И., Витязь П. А., 2025

^{*} Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.
Original article

Andrei V. Chekulayeu¹*, Vladimir I. Baradavka¹, Pyotr A. Vityaz²

¹OJSC "NPO Center", 19, Sharangovich St., 220018, Minsk, Republic of Belarus ²Department of Aerospace Activities of the National Academy of Sciences of Belarus, 66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus

PRODUCTION OF ALUMINUM-MAGNESIUM ALLOYS WITH IMPROVED PROPERTIES DURING THEIR CRYSTALLIZATION UNDER CONDITIONS OF HIGH CENTRIFUGAL FORCES

Abstract. The influence of centrifugal forces on the crystallization process of aluminum-magnesium alloy AMr6 (AJI23, ASTM-518.0 (G8A)) has been studied. A physicochemical and phase analysis of the structures of AMr6 castings obtained by centrifugal casting was carried out. It is established that crystallization of this alloy under conditions of increased centrifugal forces characterized by the gravity load coefficient 300–500 allows forming the structure without formation of brittle phase $\beta(Mg_2AI_3)$, which is formed at other traditional casting methods, including centrifugal casting with the load up to 250g. In addition, it was determined that increasing the load from 300g to 500g allows reducing the granularity of the material about 2 times (to values of about 50 microns) and contributes to the purification of the melt from brittle iron-silicon compounds in the solid solution of aluminum. Thus, the share of such compounds is reduced by 10%, and in comparison with the initial charge of melting – by 20 %. The investigated load increase makes it possible to increase the degree of alloying of the crystal lattice of the aluminum phase and to obtain material with increased strength and plasticity by at least 10 and 30 %, respectively. As a result of researches the alloy AMr6 with strength 275/230 MPa and relative elongation 8.9/18.6 % at temperature of material 20/300 °C accordingly is obtained. The prospects of using the obtained aluminium-magnesium alloys with improved properties are shown.

Keywords: centrifugal casting, gravity load coefficient, aluminum alloys, AMr6 (ASTM-518.0 (G8A)), melt, properties, structure, phases, strength, plasticity

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of a separate project of fundamental and applied scientific research on the topic "Study of the technological process for producing large-sized ring blanks with improved strength characteristics from aluminum alloys by centrifugal casting and subsequent rolling" on the assignment of the National Academy of Sciences of Belarus (Contract dated 18.12.24 no. 2024-26-225).

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

Information about the authors: Andrei V. Chekulayeu – Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher at OJSC "NPO Center". E-mail: achekulayeu@npo-center.com, reliable.sys@mail.ru; Vladimir I. Baradavka – General Director at OJSC "NPO Center". E-mail: mail@npo-center.com; Pyotr A. Vityaz – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head at Department of Aerospace Activities of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

Contribution of the authors: *Andrei V. Chekulayeu* – collection and analysis of literature data, derivation of dependencies, conducting experiments and research, formatting and editing the manuscript text, discussion of results and conclusions; *Vladimir I. Baradavka* – collection and analysis of literature data, discussion of results and conclusions; *Pyotr A. Vityaz* – collection and analysis of literature data, discussion of results and conclusions.

For citation: Chekulayeu A. V., Baradavka V. I., Vityaz P. A. Production of aluminum-magnesium alloys with improved properties during their crystallization under conditions of high centrifugal forces. *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. 2, pp. 124–135 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-124-135

Received: 04.04.2025 Modified: 14.05.2025 Approved for publication: 12.06.2025 Signed to the press: 19.06.2025

Введение. Сплавы алюминия с магнием наиболее прочные и «легкие» среди литейных алюминиевых сплавов [1]. Однако при их литье возникает ряд сложностей. Например, по своим литейным свойствам алюминиево-магниевые сплавы (далее АМг) значительно уступают силуминам. Вследствие большого интервала кристаллизации сплавы АМг имеют меньшую жидкотекучесть и склонны к образованию усадочной рыхлоты. Кроме этого, они сильно окисляются, и в отливках часто появляются окисные включения (чернота), что приводит к значительному падению их прочности и особенно пластичности.

Высокое содержание магния повышает прочность и твердость изделий из АМг, и они хорошо поддаются обработке резанием [2]. Однако при обработке давлением изделий из АМг с высоким содержанием магния (например, Mg \geq 6 %) требуется большое число отжигов, так как в ходе деформации изделия из этих сплавов быстро нагартовываются с повышением твердости

и ухудшением пластических свойств. Низкая технологичность слитков (отливок) из АМг (Mg \ge 6 %) объясняется наличием в них хрупкой и труднорастворимой фазы $\beta(Mg_2Al_3)$, выделяющейся в форме крупных скоплений, которые образуют часто сплошную сетку [3, 4]. Стоит отметить, что наличие в структуре сплавов такой хрупкой составляющей может также являться причиной трещинообразования отливок уже на стадии литья. Кроме этого известно, что при образовании крупных выделений фазы $\beta(Mg_2Al_3)$ значительно замедляются последующие диффузионные процессы ее растворения при гомогенизации (термообработке) отливок. Даже в условиях длительного нагрева (60-70 ч), вследствие образования пересыщенных пограничных зон и наличия остаточной фазы, хрупкое действие ее полностью не снимается. Наличие крупных хрупких включений $\beta(Mg_2Al_3)$ снижает также механические свойства сплавов. Для того чтобы преодолеть отмеченные технологические трудности и улучшить механические свойства сплавов, необходимо измельчать выделения фазы β(Mg₂Al₃) и более равномерно распределять ее по объему отливки. Известно, что если фазы, придающие в крупнокристаллической или сетчатой форме хрупкость всему сплаву, удается перевести в форму отдельных раздробленных включений, то они становятся почти безвредными, при этом резко улучшаются механические и технологические свойства.

Согласно диаграмме состояния системы Al–Mg, при равновесной кристаллизации (при малых скоростях охлаждения) хрупкая фаза $\beta(Mg_2Al_3)$ в данных сплавах может образовываться уже при содержании Mg > 1,4 %. Однако на практике, как правило, нежелательное образование эвтектики $\alpha+\beta(Mg_2Al_3)$ актуально лишь для сплавов при содержании 5–6 % Mg и более. С учетом изложенного выше для исследований, направленных на повышение свойств сплавов AMr, особый интерес представляет именно сплав AMr6 (AЛ23, ASTM-518.0 (G8A)) с плотностью 2,64 г/см³ и временным сопротивлением разрыву порядка 20 МПа (ГОСТ 1583–93¹), который имеет широкое практическое применение, в частности, в авиакосмической отрасли, так как характеризуется высоким коэффициентом конструкционной эффективности.

Таким образом, очевидно, что одним из способов улучшения эксплуатационных и технологических свойств изделий как в целом из алюминиево-магниевых сплавов, так и в частности из AMr6, будет являться изменение условий его кристаллизации при литье, направленных на уменьшение количества нерастворенной фазы $\beta(Mg_2Al_3)$ и ее измельчение в микроструктуре сплава, а также на измельчение зерна α-твердого раствора (алюминия). Чем мельче зерно, тем выше предел текучести, вязкость и меньше опасность хрупкого разрушения металлов. Стоит отметить, что так как фаза $\beta(Mg_2Al_3)$ кристаллизуется вторично и в основном в межосных пространствах дендритов кристалла, то изменение размера и формы дендритов алюминия (получение более тонкого его внутреннего строения) будет также способствовать измельчению данной фазы. Стоит отметить, что в настоящее время отливки из AMr6, полученные по традиционным технологиям (в кокиль, литье под давлением, центробежное литье при нагрузках до 250g и др.) характеризуются относительно крупным зерном (> 200 мкм), то есть, как правило, зерно не превышает 3–4 балл (ГОСТ 21073.1-75²).

Наиболее предпочтительным для получения алюминиевых отливок наилучшего качества является использование метода центробежного литья (далее ЦЛ) с высокими нагрузками [3]. При этом анализ работ [5–10] показывает, что изменение коэффициента гравитационной нагрузки (далее КГН, g), или другими словами оборотов вращения изложницы, при центробежном литье существенно влияет не только на плотность и «чистоту» расплава в отливке, но и значительно определяет особенности процесса кристаллизации расплава на ее первичной стадии. Следует учитывать, что дефекты, возникающие на стадии первичной кристаллизации, исправить термообработкой нельзя. Предпосылками проведения исследований, представленных в данной работе, являлось то, что результатом повышения КГН при ЦЛ может являться:

 интенсификация процесса перемешивания зарождающихся зерен или зерен на начальной стадии их роста. Как результат начинающие расти из центров кристаллизации дендриты (кристаллы) не успевают выбросить ветви второго порядка до соприкосновения с соседними (такими же)

¹ ГОСТ 1583–93. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. URL: https://meganorm.ru/Data/187/18745.pdf

 $^{^2}$ ГОСТ 21073.1-75. Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200008796

дендритами. Кристаллизация отливки завершается на начальной стадии роста каждого дендрита, что в итоге приводит к диспергированию кристаллов и, соответственно, к образованию мелкозернистой структуры сплава в отливке. При этом в процессе измельчения зерна диспергируются и другие элементы среды, в частности частицы вторых фаз, микропоры и т. д.;

– повышение центробежной силы, оказывающей локальной давление на каждый объем расплава. Сужается температурный интервал затвердевания расплава, кристаллизация начинается раньше (при более высоких температурах). При достаточно больших КГН образование твердой фазы начинается еще до того, как расплав успеет существенно понизить свою среднюю температуру. Локальное давление, возникающее при центробежном литье, может приводить к возникновению сплава с квазиаморфной или субмикрокристаллической структурой.

Однако в настоящее время метод центробежного литья исследован и реализуется на практике с относительно невысокими КГН, например, лучшие образцы оборудования в области ЦЛ работают с максимальными коэффициентами до 250g, что обусловлено следующими причинами:

– повышение КГН в изложнице предъявляет дополнительные требования к конструкции оборудования ЦЛ по виброустойчивости и надежности.

 КГН до 250 обеспечивает достаточное качество заполнение расплавом вращающейся изложницы, в том числе и его подъем на необходимую высоту формы.

Анализ работ в области ЦЛ показывает, что вопрос о влиянии высоких КГН (более 300g) на структуру отливок и их свойства является открытым и, соответственно, исследования в данной области актуальны [11, 12]. Отметим, что в литературе имеются некоторые сведения (очень ограниченно), что при кристаллизации алюминиево-магниевых сплавов в условиях повышенных центробежных сил (с КГН ~ 300) имеет место одновременное повышение прочности и пластичности [13]. Изучение условий повышения прочности с одновременным увеличением пластичности материалов является очень важной задачей как в научном, так и в практическом плане. Особенно это важно при получении проката или изделий методом деформации.

Исходя из изложенного *цель данной работы* – изучить влияние высоких центробежных сил на структуру и механические свойства кольцевых отливок из сплава АМг6 при их кристаллизации в условиях КГН 300 и 500, а также их испытание при комнатной (20 °C) и повышенной (300 °C) температуре.

Материалы, методики получения и испытаний образцов.

Шихта плавки. В качестве основы шихты плавки использовали кусковой лом (1,5–2,0 кг), нарезанный из прутка АМг6 (ГОСТ 21488–97¹) с химическим составом согласно ГОСТ 4784–2019². При этом использовали следующие дополнительные материалы:

1) магний Мг80 первичный в чушках (ГОСТ 804–93³), нарезанный на куски массой 0,2–0,3 кг;

2) флюс универсальный для деформируемых сплавов по ТУ ВУ 100196035.011-2007 (производство – ОДО «Эвтектика», Беларусь);

3) дегазатор в виде препарата таблетированного комплекса по ТУ 100196035.017-2009 (производство – ОДО «Эвтектика», Беларусь).

Литье (изготовление) колец. Изготовление кольцевых отливок осуществлялось на лабораторном литейном комплексе ОАО «НПО Центр». Основными технологическими единицами комплекса является центробежно-литейная машина ЦЛ-02Л (производства ОАО «НПО Центр», рис. 1) и индукционная печь ИТПЭ-0,16ТГ2 с емкостью тигля по расплаву алюминия 60 кг (производство – ООО «Термолит», Украина). Плавильный узел с центробежной литейной машиной соединен подогреваемой литниковой системой с возможностью осуществлять заливку металла в среде инертных газов.

Благодаря своим техническим характеристикам (табл. 1) центробежно-литейная машина ЦЛ-02Л позволяет обеспечивать: стабильные параметры ускорения и последующее вращение

¹ ГОСТ 21488–97. Прутки прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. URL: https://mc.ru/gost/gost21488-97.pdf

² ГОСТ 4784–2019. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. М.: Стандартинформ, 2019. 30 с

³ ГОСТ 804–93. Магний первичный в чушках. Технические условия. URL: https://files.stroyinf.ru/ Data2/1/4294821/4294821782.pdf





изложницы с коэффициентом гравитационной нагрузки до 650; регулирование скорости охлаждения изложницы (управление расходом охлаждающей жидкости, подаваемой на боковую поверхность изложницы); автоматическое управление технологическими режимами процесса литья и анализ его состояния.

Габлица 1. Технические характеристики центробежной литейной машины ЦЛ-02Л							
Table 1. Technical characteristics of the centrifugal casting machine ЦЛ-02Л							
II	2						

Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Температура заливаемого расплава, °С, не более Temperature of poured melt, °C, not more than	1600
Максимальная масса расплава в изложнице, кг, не более Maximum mass of melt in the mold, kg, no more than	30
Максимальный коэффициент гравитационной нагрузки, g Maximum gravity load factor, g	1000
Установленная мощность, кВт, не более Installed power, kW, no more than	25
Способ охлаждения изложницы Method of cooling the mold	Жидкостный (водой) Liquid (water)

Отливки изготавливали по следующей схеме:

1) плавка кускового АМг6 до 720–740 °С; измерение температуры расплава осуществляли с помощью погружной термопары КТМС ОВЕН ДТПІ 444-09.400/0,2С.1 (ООО «ОВЕН», Россия);

2) дегазация расплава; таблетированный дегазатор с помощью погружного «колокольчика» опускали на донную часть тигля печи и затем медленно перемешивали до окончания процесса бурления расплава;

3) обработка металла флюсом; на «зеркало» расплава равномерным слоев засыпали флюс в количестве 0,4–0,5 % от массы расплава и интенсивно его замешивали в расплав;

4) введение магния в расплав; чтобы скомпенсировать выгорание магния, в состав шихты вводился дополнительный Mg в виде Mr80 в количестве 1 мас.%, магний в расплав вводили под слой флюса;

5) перемешивание и последующая выдержка расплава в течение 10 мин;

6) нагрев расплава до 800-820 °С и последующая выдержка 4-5 мин;

7) снятие шлака;

8) заливка расплава в центробежно-литейную машину с температурой изложницы 180–200 °С. Заливку осуществляли в изложницу из жаропрочной релаксационностойкой стали 30XMA с внутренним диаметром 400 мм и высотой 130 мм. Расплав в ЦЛМ подавался через специальный



Рис. 2. Внешний вид отливок до механической обработки (*a*) и после (*b*) Fig. 2. Appearance of castings before mechanical processing (*a*) and after (*b*)

подогреваемый до 300–350 °C литник, кроме того в литник и изложницу подавался нагретый до 180–200 °C защитный газ (аргон). Расход расплава при заливке был порядка 2,5–3,0 кг/с, КГН в изложнице при заливке составлял 80 (600 об/мин);

9) разгон изложницы до рабочего режима центрифугирования; отливки получали при двух рабочих режимах центрифугирования расплава: 1-й вариант – 300g (1150 об/мин) и 2-й вариант – 500g (1500 об/мин), при этом для обоих вариантов после достижения изложницей рабочих оборотов включалось ее водяное охлаждение;

10) охлаждение изложницы до 220-250 °С в течение 120-150 с;

11) извлечение отливки при температуре 250-300 °С из изложницы.

В процессе литья по двум вариантам центрифугирования расплава, при 300g и 500g, изготавливались кольцевые отливки массой 20–28 кг в зависимости от их толщины от 60 до 90 мм. Внешний вид отливок и получаемые кольца после их механической обработки представлены на рис. 2.

Согласно методике исследований из каждой отливки изготавливали два кольца с одинаковым внутренним и наружным диаметром, но разной высоты – 75 и 45 мм. Перед механической обработкой отливки отжигали в шахтной электропечи сопротивления СШО-10.10/10М1 (Россия) при температуре 330–350 °C в течение 120–150 мин.

Неразрушающий контроль колец. Радиографический и ультразвуковой контроль скрытых дефектов в кольцах выполняли соответственно с помощью приборов РПД-250С и УД4-Т (Россия).

Металлография. Образцы для металлографического анализа структуры готовили по стандартной методике. В процессе исследований применяли следующие реактивы для травления и способы применения:

для выявления микроструктуры – плавиковая кислота 1 см³ и вода 99 см³, шлиф погружали в реактив на 10–12 с, затем промывали в проточной воде и просушивали;

для выявления фазы Mg₂Al₃ – азотная кислота 20 см³ и вода 80 см³, шлиф погружали на 30–40 с в реактив, подогретый до 70 °C, затем промывали в холодной воде и просушивали.

Металлографический анализ структуры проводили на микроскопе «Альтами МЕТ 1М» (объект микрометр ОМП в его составе) (Россия).

Рентгеноструктурный анализ. Рентгеноструктурный фазовый анализ изучали с помощью рентгеновского дифрактометра POWDIX 600 (Беларусь).

Химический состав. Химический состав материала в отливках выявляли методом оптико-эмиссионной спектроскопии с помощью искрового оптико-эмиссионного спектрометра MiniLab 150 (GNR Analytical Instruments, Италия).

Механические свойства. Прочность и относительное удлинение на растяжение устанавливали по ГОСТ 1497–84¹ с помощью электромеханической испытательной машины TESTCOM-50/100 (ATS IBERTEST, Испания). Образцы (диаметр рабочей части 5 мм) для испытаний материала на прочность (растяжение) в осевом направлении кольца вырезали в точках на разных радиусах кольца: в середине, на внутреннем и внешнем.

Твердость по Бринеллю определяли в нескольких точках в горизонтальной плоскости колец по ГОСТ 9012–59² (диаметр шарика 10 мм, нагрузка 1000 кг, время выдержки 30 с).

¹ ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Стандартинформ, 2008. 22 с.

² ГОСТ 9012–59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. М.: Стандартинформ, 2007. 39 с.

Экспериментальная часть. Результаты исследования. Исследования проводили на отливках ЦЛ, полученных при различных режимах центрифугирования (кристаллизации) расплава, а именно при 300g и 500g. При этом для изучения влияния КГН на процесс кристаллизации расплава остальные технологические режимы и особенности процесса литья (состав шихты, скорость заливки, температура выгрузки расплава, температура изложницы и другие) не изменялись.

Неразрушающий контроль отливок до и после механической обработки показал, что видимые дефекты в виде неслитин, трещин, пористости, раковин и другие по ГОСТ Р 57126–2016¹ в отливках отсутствуют. Радиографический и ультразвуковой контроль отливок также скрытых дефектов не выявил.

Химический и фазовый состав. Изменение состава отливок в радиальном направлении представлено на рис. 3 и табл. 2. Анизотропии материала в точках в осевом направлении отливок не обнаружено. Анализ табл. 2 показывает, что за исключением процента содержания марганца (Mn, %) химический состав отливок при 300g и 500g соответствует материалу АМг6 по ГОСТ 4784–2019.

Повышение содержания марганца Mn примерно с 0,7 до 1,3 % (почти в 2 раза), вероятно, связано с тем, что в процессе литья доля легкоплавких и склонных к выгоранию элементов, с которыми Mn имеет «хорошую» растворимость или химически связан, уменьшается. Очевидно, что для нашего эксперимента такими элементами являлись прежде всего алюминий и магний. В сравнении с данными элементами марганец имеет гораздо бо́льшие температуры выгорания из шихты. Известно, что марганец частично не только растворим в твердом алюминии, но и образует с ним химическое соединение MnA1₆ с содержанием Mn до 1,95 %, кристаллизующееся при температуре 658 °C, которая гарантированно достигалась в условиях проводимого эксперимента.



Рис. 3. Изменение содержания Mg (a), Mn (b) и Fe+Si (c) в отливках центробежного литья в радиальном направлении (от внешнего радиуса к центру) при значениях коэффициента гравитационной нагрузки 300 (сплошная линия) и 500 (прерывистая линия); схема расположения точек измерения в отливках (d)

Fig. 3. Change in the content of Mg (*a*), Mn (*b*) and Fe+Si (*c*) in the centrifugal castings in the radial direction (from the outer radius to the center) at values of the gravitational load coefficient of 300 (solid line) and 500 (dashed line); diagram of the location of measurement points in the castings (*d*)

¹ ГОСТ Р 57126–2016. Слитки из алюминиевых сплавов. Термины и определения дефектов. М.: Стандартинформ, 2016. 20 с.

Таблица 2. Химический состав исходной шихты АМг6 и отливок центробежного литья в радиальном направлении (от внешнего радиуса к центру) при значениях коэффициента гравитационной нагрузки 300 и 500

Table 2. Chemical composition of the initial charge AMr6 (ASTM-518.0 (G8A) and CC castings in the radial direction (from the outer radius to the center) at values of the gravitational load coefficient of 300 and 500

Элемент Исходная шихта, % (Ср, %)*		Отливки при 300g, % Casting at 300g, %				Отливки при 500g, % Casting at 500g, %							
Element	$(Cp, \%)^*$	1	2	3	4	5	Ср	1	2	3	4	5	Ср
Si	0,168-0,192	0,253	0,249	0,242	0,211	0,218	0,235	0,186	0,156	0,154	0,147	0,177	0,1640
	(0,178)												
Fe	0,319–0,336	0,258	0,234	0,213	0,204	0,211	0,224	0,267	0,228	0,22	0,211	0,258	0,2368
	(0,328)												
Cu	0,025	0,04	0,039	0,04	0,046	0,038	0,041	0,1	0,076	0,06	0,065	0,081	0,0764
Mn	0,706-0,712	1,304	1,287	1,268	1,267	1,289	1,283	1,294	1,282	1,291	1,276	1,302	1,2890
	(0,708)												
Mg	6,350-6,554	6,308	6,431	6,39	6,598	6,721	6,490	6,111	6,405	6,247	6,336	6,528	6,3254
	(6,437)												
Cr	0,010	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0100
Zn	0,015	0,042	0,042	0,041	0,037	0,036	0,040	0,042	0,039	0,036	0,037	0,046	0,0400
Ni	0,048	0,045	0,046	0,047	0,046	0,047	0,046	0,048	0,046	0,047	0,047	0,047	0,0470
Ti	0,075	0,042	0,043	0,048	0,064	0,058	0,051	0,043	0,07	0,078	0,077	0,02	0,0576
Zr	< 0,010	0,01	0,01	0,01	0,011	0,01	0,010	< 0,010	0,011	0,012	0,012	< 0,010	0,0117
Al	Остальное	92,464	92,568	92,756	93,195	93,147	92,826	92,564	92,966	93,157	93,116	92,235	92,8076
	(92,168)												

 Π римечание: Ср-среднее значение; * – среднее значение по четырем измерениям. N o t e: Ср – the average value; * – the average value for 4 measurements.

Таким образом, есть основания полагать, что именно уменьшение (выгорание) доли алюминия, являющегося основным (более 92 %) в шихте плавки, в итоге и привело к повышению концентрации содержания марганца. Подтверждением этому является также то, что в объеме отливок концентрация марганца практически одинаковая (для абсолютных значений Mn изменение в пределах \pm 3 %). Характер изменения концентрации в зависимости от КГН также практически одинаковый (см. рис. 3, *b*): максимум ближе к боковым поверхностям отливок и минимум в центре. Все это свидетельствует о том, что в отливках образовался пересыщенный твердый раствор марганца в алюминии.

Анализ табл. 2 также показывает, что в процессе ЦЛ отливок содержание железа уменьшается примерно на 30 %, а кремния может как увеличиться при КГН 300, так и уменьшиться при КГН 500. Такое изменение содержания кремния в расплаве, вероятно, является следствием того, что в процессе литья расплав, омывая поверхности футеровки литника, содержащие Si (кварцевый песок), в различной степени взаимодействует с ними, то есть, по всей видимости, в нашем эксперименте происходило «вымывание» частиц кварцевого песка из футеровки литника.

В расплаве АМг6 в зависимости от содержания кремния и железа могут образовываться кристаллы их твердого раствора в алюминии, двойные химические соединения FeAl₃ и Mg₂Si, и тройные соединения в виде α (AlFeSi), β (AlFeSi), а также эвтектика α (Al) + α (AlFeSi). Определено, что повышение КГН при ЦЛ уменьшает содержание железокремниевых соединений и примесей в отливках из АМг6. Так, при КГН 300 и 500 их среднее содержание соответственно уменьшилось на 10 и 20 % (см. рис. 3, *c*).

Фрагменты рентгеновских дифрактограмм образцов из отливок, полученных при 300g и 500g соответственно, представлены на рис. 4. В результате фазового анализа установлено, что в исследуемых образцах регистрируется фаза Al (PDF № 4-787, кристаллографическая группа: cubic, *Fm*-3*m*, a = 4,0494 Å [14]) и силицид магния Mg₂Si (PDF № 35-773, кристаллографическая группа: cubic, *Fm*-3*m*, a = 6,35119 Å [14]). Параметр кристаллической решетки матричной фазы образца



Рис. 4. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (СоК_a) сплава АМг6, полученного в отливках при значениях коэффициента гравитационной нагрузки 300 (*a*) и 500 (*b*)
Fig. 4. Fragments of X-ray diffraction patterns (СоК_a) of the AMr6 (ASTM-518.0 (G8A)) alloy obtained in castings at values of the gravitational load coefficient of 300 (*a*) and 500 (*b*)

при 300g равен a = 4,0768 Å, а образца при 500g составляет a = 4,0776 Å. Высокий уровень значений параметра кристаллической решетки матричной алюминиевой фазы в обоих случаях обусловлен образованием твердого раствора Mg в кристаллической решетке Al. Большее значение параметра кристаллической решетки фазы Al в образце при КГН 500 свидетельствует о его более высокой легированности магнием по сравнению с образцом при КГН 300.

Важно отметить, что по литературным данным микроструктура исследуемого сплава AMr6, в основном состоит из α-твердого раствора магния в алюминии, а также силицида магния (Mg₂Si) и включений β-фазы (Mg₂Al₃) [4], однако в исследованных образцах нашего эксперимента дифракционные линии от включений β-фазы не регистрировались.

Характерные микроструктуры образцов из отливок, полученных при 300g и 500g, представлены на рис. 5. Макро- и микротрещин в образцах не обнаружено. Структура включает в себя алюминий (светлые участки), а также множественные включения, предположительно, из силицида магния, алюминидов железа, железомарганцовистых и железосиликатных фаз и других соединений с различной морфологией (черно-серые участки), располагающихся как на границе, так и в объеме зерен. Установлено, что повышение КГН при ЦЛ положительно сказывается на размере зерна: так, в центральной части отливок при 300g и 500g наблюдались равноосные зерна размером до 100 мкм и 50 мкм соответственно. Кроме того определено, что с повышением КГН количество включений в отливке уменьшается и они становятся более дисперсными (см. рис. 5 c, d).

Механические свойства литых и отожженных колец определяли в осевом направлении. Установлено, что образцы, полученные при 300g и 500g, характеризуются практически схожими диаграммами растяжения (рис. 6) как без нагрева, так и с нагревом до 300 °C, и отличаются лишь абсолютными значениями (табл. 3).

Температура образцов, °С Samples temperature, °C	КГН при литье Gravity load coefficient during casting, g	Временное сопротивление, МПа Tensile strength, MPa	Предел текучести, МПа Yield strength, MPa	Твердость, НВ Hardness, НВ	Относительное удлинение, % Relative elongation, %
20	300g	250	185	80-85	7,0
	500g	275	180	80-85	8,9
300	300g	180	125	_	14,9
	500g	230	100	_	18,6

Таблица. 3. Механические свойства литых (отожженных) заготовок из АМг6 Table 3. Mechanical properties of cast (annealed) blanks made of АМг6 (ASTM-518.0 (G8A))



- Рис. 5. Характерные микроструктуры сплава АМг6, полученного в отливках при значениях коэффициента гравитационной нагрузки 300 (a, c) и 500 (b, d); a, b увеличение 200[×]; c, d увеличение 500[×]
 Fig. 5. Characteristic microstructures of the АМг6 (ASTM-518.0 (G8A)) alloy obtained in castings at values of the
 - gravitational load coefficient 300 (a, c) and 500 (b, d); a, b at magnification 200^{\times} ; c, d at magnification 500^{\times}



Рис. 6. Характерные диаграммы растяжения образцов АМг6 при значениях коэффициента гравитационной нагрузки 300 и 500 без нагрева (*a*) и с нагревом до 300 °C (*b*)



Анализ результатов образцов без нагрева показывает, что по ГОСТ 1583–93 изготовленные нами отливки ЦЛ имеют повышенную (высокую) прочность и пластичность. При этом АМг6, полученный при 500g, в сравнении с 300g характеризуется повышением прочности не менее чем на 10 % и пластичности – на 30 %.

Заключение. Исследован процесс центробежного литья сплава АМг6 при коэффициентах гравитационной нагрузки 300 и 500. При данных нагрузках получены качественные отливки размером 400/130 (внешний диаметр/высота) массой 20–28 кг (в зависимости от их толщины от 60 до 90 мм) с химическим составом, соответствующим ГОСТ 4784–2019.

Установлено, что повышение с 300g до 500g позволяет снижать зернистость материала примерно в 2 раза до значений порядка 50 мкм; уменьшать до минимума или вообще исключать образование хрупкой фазы $\beta(Mg_2Al_3)$ в структуре сплава АМг6, характерной для данного сплава. Также повышение коэффициента способствует очистке расплава от хрупких железокремниевых соединений в твердом растворе алюминия, доля таких соединений снижается на 10 %, а в сравнении с исходной шихтой – на 20%.

Исследуемое повышение КГН дает возможность увеличивать степень легирования кристаллической решетки алюминиевой фазы и получать материал с повышенной прочностью и пластичностью соответственно не менее чем на 10 и 30 %. В абсолютных значениях получен АМг6 с прочностью и относительным удлинением соответственно 275/230 МПа и 8,9/18,6 % в зависимости от температуры материала при 20/300 °C. При этом отливки, изготовленные при 300g, в сравнении с ГОСТ 1583–93 также имели повышенные механические свойства.

Результаты работы показывают перспективность использования полученных алюминиевомагниевых сплавов.

Список использованных источников

1. Белецкий, В. М. Алюминиевые сплавы: состав, свойства, технология, применение: справочник / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов; под общ. ред. И. Н. Фридляндера. – К.: Коминтех, 2005. – 365 с.

2. Young-Ki Yang. Direct visualization of β phase causing intergranular forms of corrosion in Al–Mg alloys / Young-Ki Yang, T. Allen // Materials Characterization. – 2013. – Vol. 80. – P. 76–85. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.03.014

3. Role of Mg in simultaneously improving the strength and ductility of Al–Mg alloys / Byeong-Hyeon Lee, Sung-Hoon Kim, Jun-Hyoung Park [et al.] // Materials Science and Engineering A. – 2016. – Vol. 657. – P. 115–122. https:// doi. org/10.1016/j.msea.2016.01.089

4. Мальцев, М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / М. В. Мальцев. – 2-е изд. – М.: Металлургия. 1970. – 364 с.

5. Технологические основы синтеза композиционных наноструктурированных материалов на основе алюминиевых сплавов / А. Г. Колмаков, В. Т. Сенють, М. Л. Хейфец [и др.] // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2016. – №. 8. – С. 3–12.

6. Юдин, С. Б. Центробежное литье / С. Б. Юдин, М. М. Левин, С. Е. Розенфельд. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 280 с.

7. Перспективы развития и применения способа центробежного литья в области создания новых материалов на основе легких сплавов / А. П. Петров, В. В. Еремеев, Н. В. Еремеев [и др.] // Двигатель. – 2017. – № 4. – С. 4–8.

8. Петров, А. П. Аспекты технологии получения кольцевых полуфабрикатов из алюминиевых сплавов / А. П. Петров, В. В. Еремеев, Н. В. Еремеев // Технология легких сплавов. – 2013 – № 3. –С. 7–11.

9. Вейник, А. И. Теория особых видов литья / А. И. Вейник. – М.: Машгиз, 1958. – 300 с.

10. Получение методом центробежного литья градиентных композиционных материалов / Ю. С. Алексеева, Л. И. Кобелева, А. Г. Колмаков [и др.] // Инженер-механик. – 2016. – № 1. – С. 35–38.

11. Набоко, Е. П. Совершенствование процесса центробежного литья алюминиевого сплава / Е. П. Набоко, В. Н. Марченко // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения: сб. ст. XII Междунар. науч.-практ. конф., 5 марта 2019 г., г. Пенза. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2019. – С. 90–92.

12. Kevorkijan, V. Functionally graded aluminum-matrix composites / V. Kevorkijan // American Ceramic Society Bulletin. - 2003 - Vol. 82, Iss. 2. - P. 60-64.

13. Получение высокопрочных деформируемых алюминиевых сплавов типа АМг10 / П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, С. Ф. Соболь [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2017. – № 4. – С. 7–16.

14. Powder diffraction file. Data cards. ICDD. - Swarthmore, Pensylvania, USA, 1948-2021.

References

1. Beletskii V. M., Krivov G. A. *Aluminum Alloys: Composition, Properties, Technology, Application: Handbook.* Kyiv, Komintech Publ., 2005. 365 p. (in Russian).

2. Young-Ki Yang, Allen T. Direct visualization of β phase causing intergranular forms of corrosion in Al–Mg alloys. *Materials Characterization*, 2013, vol. 80, pp. 76–85. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.03.014

3. Byeong-Hyeon Lee, Sung-Hoon Kim, Jun-Hyoung Park, Hyung-Wook Kim, Jae-Chul Lee. Role of Mg in simultaneously improving the strength and ductility of Al–Mg alloys. *Materials Science and Engineering A*, 2016, vol. 657, pp. 115–122. https:// doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.089

4. Mal'tsev M. V. Metallography of Industrial Non-Ferrous Metals and Alloys. 2nd ed. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 364 p. (in Russian).

5. Kolmakov A. G. Senyut' V. T., Kheifets M. L., Vityaz P. A., Sobol' S. F. Technological foundations of synthesis of composite nanostructured materials based on aluminum alloys. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2016, no. 8, pp. 3–12 (in Russian).

6. Yudin S. B., Levin M. M., Rosenfel'd S. E. *Centrifugal Casting*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 280 p. (in Russian).

7. Petrov A. P., Eremeev V. V., Eremeev N. V., Krasnoborodko I. O., Zlydnev I. M. Prospects for the development and application of the centrifugal casting method in the field of creating new materials based on light alloys. *Dvigatel'* [Engine], 2017, no. 4, pp. 4–8 (in Russian).

Petrov A. P., Eremeev V. V., Eremeev N. V. Aspects of technology for the production of annular semi-finished products from aluminum alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of Light Alloys*, 2013, no. 3, pp. 7–11 (in Russian).
 Veynik A. I. *Theory of Special Types of Casting*. Moscow, Mashgiz Publ., 1958. 300 p. (in Russian).

10. Alekseeva Yu. S., Kobeleva L. I., Kolmakov A. G., Kalashnikov I. E., Vityaz P. A., Kheifets M. L., Senyut' V. T. Obtaining gradient composite materials by centrifugal casting. *Inzhener-mekhanik* [Mechanical Engineer], 2016, no. 1, pp. 35–38 (in Russian).

11. Naboko E. P., Marchenko V. N. Improving the process of centrifugal casting of aluminum alloy. *Nauka i innovatsii* v XXI veke: aktual'nye voprosy, otkrytiya i dostizheniya: sbornik statei XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 5 marta 2019 g., g. Penza [Science and Innovation in the 21st Century: Current Issues, Discoveries and Achievements: Collection of Articles of the XII International Scientific and Practical Conference, March 5, 2019, Penza]. Penza, International Center for Scientific Cooperation "Nauka i Prosveshchenie", 2019, pp. 90–92 (in Russian).

12. Kevorkijan V. Functionally graded aluminum-matrix composites. *American Ceramic Society Bulletin*, 2003, vol. 82, iss. 2, pp. 60–64.

13. Vityaz P. A., Ilyushenko A. Ph., Sobol S. Ph., Savich V. V., Churik M. N. Producing high-strength deformable aluminum alloys of type AMg10. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 4, pp. 7–16 (in Russian).

14. Powder diffraction file. Data cards. ICDD. Swarthmore, Pensylvania, USA, 1948-2021.

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

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-136-144 УДК 62-82-112.6(083.13) (cc) BY 4.0

Оригинальная статья

В. В. Пинчук¹, А. А. Гинзбург², О. К. Гурбан^{1*}

¹Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, пр. Октября, 48, 246029, Гомель, Республика Беларусь ²ОАО «Гомельское специальное конструкторско-техническое бюро гидропневматической автоматики», ул. Советская, 145, 246144, Гомель, Республика Беларусь

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СОЕДИНИТЕЛЬНО-МОНТАЖНЫХ МОДУЛЕЙ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ГИДРОБЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ МАШИН

Аннотация. Предлагается при внедрении в практику конструирования агрегатно-модульного подхода для создания гидроблоков управления гидроприводов технологического оборудования решать задачу оптимального конструирования агрегатно-модульных гидроблоков управления путем разработки и использования соединительномонтажных модулей, которые реализуют инвариантные математические модели и при проектировании – алгоритмы проектирования, направленные на формирование структуры гидравлических каналов и монтажных корпусов, определяемых принципиальными гидравлическими схемами. Оптимизация параметров присоединительных размеров соединительно-монтажных модулей на основе критериев: объем и масса, гидравлические потери давления, трудоемкость и стоимость изготовления, – позволяет выполнить параметрический синтез агрегатно-модульных гидроблоков управления. Проведен анализ общего критерия оптимальности соединительно-монтажных модулей с учетом технологического процесса изготовления модулей. Установлено, что если учитывать весь срок эксплуатации изделия, затратами на стоимость и обработку заготовки соединительно-монтажных модулей можно пренебречь. Таким образом, процесс оптимизации параметров соединительно-монтажных модулей упрощается. Полученный результат можно использовать при проектировании монтажных корпусов гидроблоков управления технологического оборудования.

Ключевые слова: приводы технологического оборудования, гидроблоки управления, технологические машины, гидроаппараты, критерий оптимальности

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Пинчук Владимир Владимирович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Нефтегазоразработка и гидро-пневмоавтоматика» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. https://orcid.org/0000-0003-4672-3776. E-mail: pinchuk@gstu.by; Гинзбург Александр Анатольевич – главный конструктор ОАО «Гомельское специальное конструкторско-техническое бюро гидро-пневматической автоматики». https://orcid.org/0009-0009-5664-3631. E-mail: ginsburg.gsktb@tut.by; Гурбан Ольга Констриниеской автоматики». https://orcid.org/0009-0009-5664-3631. E-mail: ginsburg.gsktb@tut.by; Гурбан Ольга Констриниеской огу/0009-0004-8561-6724. E-mail: gurbanolga@gmail.com

Вклад авторов: Пинчук Владимир Владимирович – разработка методологии исследования, редактирование текста рукописи, формулировка выводов; Гинзбург Александр Анатольевич – обоснование концепции исследования, разработка методологии исследования, подготовка образцов, интерпретация результатов; Гурбан Ольга Константиновна – написание и оформление текста рукописи, подготовка образцов, интерпретация результатов, обобщение результатов исследования.

[©] Пинчук В. В., Гинзбург А. А., Гурбан О. К., 2025

^{*} Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Для цитирования: Пинчук, В. В. Оптимизация параметров соединительно-монтажных модулей при конструировании гидроблоков управления машин / В. В. Пинчук, А. А. Гинзбург, О. К. Гурбан // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 2. – С. 136–144. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-136-144

Поступила в редакцию: 04.10.2023 После доработки: 17.04.2025 Утверждена к публикации: 12.06.2025 Подписана в печать: 19.06.2025

Original article

Vladimir V. Pinchuk¹, Alexander A. Ginzburg², Olga K Gurban^{1*}

¹Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, 48, Oktyabrya Ave., 246029, Gomel, Republic of Belarus ²OJSC "Gomel Special Design and Technical Bureau of Hydropneumatic Automatics", 145, Sovetskava St., 246144, Gomel, Republic of Belarus

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF CONNECTING AND MOUNTING MODULES IN THE DESIGN OF HYDRAULIC CONTROL UNITS OF MACHINES

Abstract. It is proposed that when implementing into practice the design of the aggregate-modular approach for creating hydraulic control units for hydraulic drives of process equipment, the problem of optimal design of aggregate-modular hydraulic control units be solved by developing and using connection and assembly modules that implement invariant mathematical models and, when designing, design algorithms aimed at forming the structure of hydraulic channels and assembly housings determined by basic hydraulic diagrams. Optimization of parameters of connection dimensions of connection and mounting modules based on criteria: volume and weight, hydraulic pressure losses, labor intensity and manufacturing cost, allows to perform parametric synthesis of aggregate-modular hydraulic control units. The analysis of the general criterion of optimality of connection and mounting modules is carried out taking into account the technological process of manufacturing modules. It is established that if the entire service life of the product is taken into account, the costs of cost and processing of the blank of connection and mounting modules can be neglected. Thus, the process of optimization of parameters of connection and mounting modules is simplified. The obtained result can be used in designing mounting housings of hydraulic control units of technological equipment.

Keywords: industrial equipment drives, hydraulic control blocks, technological machines, hydraulic devices, optimality criterion

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

Information about the authors: *Vladimir V. Pinchuk* – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Oil and Gas Development and Hydro-Pneumatic Automatics at Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi. https://orcid.org/0000-0003-4672-3776. E-mail: pinchuk@gstu.by; *Alexander A. Ginzburg* – Chief Designer at OJSC "Gomel Special Design and Technical Bureau of Hydropneumatic Automatics". https://orcid.org/0009-0009-5664-3631. E-mail: ginsburg.gsktb@tut.by; *Olga K. Gurban* – Graduate Student at Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi. https://orcid.org/0009-0004-8561-6724. E-mail: gurbanolga@gmail.com

Contribution of the authors: *Vladimir V. Pinchuk* – development of research methodology, editing of the manuscript text, formulation of conclusions; *Alexander A. Ginzburg* – substantiation of the research concept, development of research methodology, preparation of samples, interpretation of results; *Olga K. Gurban* – writing and formatting of the manuscript text, preparation of samples, interpretation of results; generalization of research results.

For citation: Pinchuk V. V., Ginzburg A. A., Gurban O. K. Optimization of parameters of connecting and mounting modules in the design of hydraulic control units of machines. *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. 2, pp. 136–144 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-136-144

Received: 04.10.2023 Modified version: 17.04.2025 Approved for publication: 12.06.2025 Signed to the press: 19.06.2025

Введение. В настоящее время гидравлические приводы, как правило, состоят из наукоемких компонентов – аппаратов и агрегатов, серийно изготовляемых специализированными заводами [1]. При разработке гидроприводов технологических машин конструируют гидроблоки управления (ГУ), которые объединяют гидроаппараты, соединенные между собой согласно принципиальным гидросхемам. Гидроблоки являются сложной и дорогостоящей подсистемой гидроприводов технологических на их создание, как правило, многократно превышают стоимость гидроаппаратов, используемых при разработке. Поэтому проблема повышения

эффективности производства и эксплуатации ГУ является актуальной для каждого машиностроительного предприятия [2].

Отметим, что в последние годы возрос интерес к повышению эффективности ГУ. Так, в [3–5] приведены примеры оценки параметров и их влияние на выходные показатели гидроблоков управления. Между тем при создании конструкций ГУ монтажные корпуса во внимание не принимаются, что ухудшает показатели данных гидроблоков в целом. Одной из главных причин снижения эффективности ГУ является вариативность структурных решений в процессе их конструирования, которая существенно усложняет этот процесс. При этом конструирование ГУ можно упростить за счет перехода к агрегатно-модульному принципу их построения, который позволит снизить влияние фактора вариативности процесса проектирования на выходные показатели разрабатываемых гидроблоков: материало- и энергоемкость, затраты и сроки создания [6, 7].

В свою очередь внедрение в практику конструирования агрегатно-модульного подхода при создании ГУ гидроприводов технологического оборудования ставит задачу разработки рекомендаций для их проектирования.

Постановка задачи и цели исследования. Конструкция гидропривода и его основные параметры определяются типом машины, для которого он предназначен. Поэтому разработка данного оборудования должна начинаться с анализа технического задания (T3). Этот документ содержит общее описание машины, включая механическую часть, электрические и гидравлические узлы (функционально) с предварительной компоновкой на станке гидродвигателей, насосной установки, а также указание возможных мест размещения гидроаппаратуры. В T3 приводятся: методы управления и контроля; требуемые блокировки; нагрузочные характеристики и режимы движения (перемещения, скорости, ускорения, пути торможения и разгона) каждого рабочего органа; циклограмма рабочего цикла станка; необходимые средства диагностики технического состояния; основные требования надежности. При необходимости указываются и другие сведения: точность, дискретность перемещений, жесткость, вибрации, шум, качество переходных процессов, температура масла, точность гидравлического уравновешивания, возможности регулировок, необходимость остановок гидродвигателей в промежуточных положениях, время выстоя и др.

После разработки T3 анализируются различные варианты принципиальной гидросхемы привода. При этом решаются вопросы техники безопасности, в том числе при различных нарушениях в работе гидрооборудования (случайные падения давления, сгорание обмотки электромагнита, засорение малых отверстий и т. п.); вводятся блокировки, исключающие возможность несовместимых движений, падения вертикально расположенных рабочих органов, включения движений при отсутствии смазки и т. п.; обеспечивается необходимый минимум регулировок.

Особое внимание уделяется сокращению энергетических потерь. Как правило, в гидросистемах станков температура не превышает 55 °С и лишь в простейших гидроприводах, к стабильности работы которых не предъявляется высоких требований, может достигать 70 °С. Поддержание теплового режима гидропривода, в котором имеются значительные потери мощности вследствие дросселирования масла, – весьма сложная техническая проблема, требующая существенного увеличения объема бака или применения эффективной системы искусственного охлаждения.

После составления принципиальной схемы приступают к подбору гидроаппаратов и других узлов гидропривода по их функциональному назначению и величине условного прохода, рассчитывают проходные сечения трубопроводов в зависимости от расхода рабочей жидкости (Q), проходящей по тому или иному участку гидросистемы, и рекомендуемой скорости потока рабочей жидкости.

На основе принципиальной гидросхемы и выбранных гидроаппаратов и узлов выполняют проектирование ГУ. При этом гидравлические схемы приводов современных машин, как правило, составляются из нормализованных аппаратов и агрегатов, выпускаемых серийно специализированными заводами. Это позволяет упростить процесс проектирования, монтаж гидравлических систем и их эксплуатацию. Из нормализованных аппаратов (или функциональных узлов) создаются разнообразные системы, обеспечивающие работу по сложным циклам с широким диапазоном регулирования скорости. Конструктивное совершенство входящих в ГУ компонентов позволит сформулировать задачу многокритериальной оптимизации гидроблоков. Ранее установлено, что для выполнения параметрической оптимизации ГУ необходимо учитывать его объем и массу, гидравлические потери давления в системе (энергетические характеристики), трудоемкость и стоимость изготовления [6]. Очевидно, что эти требования должны распространяться и на каждый компонент агрегатно-модульных ГУ.

Таким образом, решение задачи конструирования агрегатно-модульных ГУ следует вести путем разработки и использования монтажных модулей, реализующих инвариантные математические модели и алгоритмы включения при их проектировании структуры гидравлических каналов монтажных корпусов, определяемых принципиальными гидравлическими схемами. Установлено [6, 7], что разработка и обоснование параметров присоединительных размеров соединительно-монтажных модулей (СММ) позволяет выполнить проектирование различных типов или широкого ассортимента компонентов агрегатно-модульных ГУ: СММ, замыкающих блоков (БЗ), блоков распределителей (БР) и присоединительных блоков (БП). Таким образом, оптимизация параметров и вычисление присоединительных размеров СММ на основе таких критериев, как объем и масса, гидравлические потери давления, трудоемкость и стоимость изготовления, – позволяют выполнить структурный синтез агрегатно-модульных гидроблоков.

Для оптимизации параметров СММ получено выражение общего критерия оптимальности [7]

$$X = \left(C_1 \frac{V}{V^*} + C_2 \frac{S}{S^*} + C_3 \frac{\Delta P_{\rm B}}{\Delta P_{\rm B}^*} + C_4 \frac{\Delta P_{\rm \Gamma}}{\Delta P_{\rm \Gamma}^*}\right) \to \min,\tag{1}$$

где $C_1 - C_4$ – коэффициенты критериев, назначаемые экспертным путем; $\Delta P_{\rm B}$ – потери давления в вертикальных каналах СММ; $\Delta P_{\rm r}$ – потери давления в горизонтальных каналах СММ; V и S – соответственно объем и площадь поверхности СММ; $\Delta P_{\rm B}^*$, $\Delta P_{\rm r}^*$, V^* , S^* – нормирующие множители.

Однако общий критерий оптимальности СММ (1) лишь сужает допустимое множество вариантов проектируемой конструкции соединительно-монтажного модуля, задавая в нем множество компромиссно-оптимальных проектов – область Парето. То есть рассчитать параметры СММ возможно на основе исследований общего критерия оптимальности X, используя в качестве варьируемых параметров коэффициенты важности критериев C_1-C_4 и соотношение диаметров вертикальных ($d_{\rm B}$) и горизонтальных ($d_{\rm r}$) каналов $d_{\rm B}/d_{\rm r}$ [3]. Результаты таких исследований критерия X позволяют разработать алгоритм проектирования компонентов агрегатно-модульных ГУ для машин с различными условиями эксплуатации [9]. Вместе с тем процесс конструирования, включающий оптимизацию параметров СММ, при таком подходе, без учета технологии изготовления гидроблока, существенно затруднен, так как в этом случае приходится рассматривать чрезмерно большое количество значений критерия оптимальности X.

Цель исследования – упрощение процесса оптимизации параметров соединительно-монтажных модулей.

Методы исследования. Принимая во внимание критерии оптимальности СММ, рассмотрим его присоединительные размеры. Для решения поставленной задачи проведем анализ общего критерия оптимальности указанного модуля (1) с учетом технологического процесса (ТП) его изготовления, который включает следующие операции:

- 1 вертикально фрезерная (черновая);
- 2 горизонтально фрезерная (черновая);
- 3 шлифовальная (черновая);
- 4 сверлильная;
- 5 шлифовальная (чистовая).

Составляющие формулы (1) имеют разные размерности, поэтому для упрощения расчета приведем их к стоимостному выражению. Тогда объем заготовки V будем отражать как стоимость использованного металла ($(\Pi_{M}, py6)$), а площадь обработанной поверхности модуля S – как стоимость обработки ($(\Pi_{0}, py6)$), с этой целью используем стоимость нормочаса операций 1–3 и 5 технологического процесса изготовления СММ.

Потери мощности при проходе рабочей жидкости по каналам СММ, связанные с гидравлическими потерями давления $\frac{\Delta P_{\rm B}}{\Delta P_{\rm B}^*} + \frac{\Delta P_{\rm \Gamma}}{\Delta P_{\rm \Gamma}^*}$, определим как \coprod_{2} (руб.) – стоимость затраченной энергии на гидравлические потери давления в каналах СММ (например, кВт/ч электроэнергии).

Однако, принимая во внимание ТП изготовления СММ, нам необходимо учесть операцию 4. Для этого введем понятие структуры каналов СММ, включающей стоимость сверления каналов (Щ_{св}, руб.), которую можно определить на основе учета их конфигурации, полученной при расчетах минимальных гидравлических потерь давления [6].

В дальнейшем будем рассматривать: $\frac{\Pi_V}{\Pi_V^*}$ как отношение стоимостей объема первоначальной заготовки; $\frac{\Pi_S}{\Pi_S^*}$ – как отношение стоимостей площадей обработанных поверхностей СММ; $\frac{\Pi_{cB}}{\Pi_{cB}^*} + \frac{\Pi_3}{\Pi_3^*}$ – как стоимость структуры каналов СММ, которая включает стоимость потерь энер-

гии при проходе рабочей жидкости по каналам СММ и стоимость сверления этих каналов.

Таким образом, оптимизация будет сводиться к расчету минимальной стоимости готового изделия. В результате формула (1) примет следующий вид:

$$X = \left(C_1 \frac{\underline{\Pi}_{M}}{\underline{\Pi}_{M}^*} + C_2 \frac{\underline{\Pi}_{0}}{\underline{\Pi}_{0}^*} + C_3 \frac{\underline{\Pi}_{cB}}{\underline{\Pi}_{cB}^*} + C_4 \frac{\underline{\Pi}_{9}}{\underline{\Pi}_{9}^*}\right) \rightarrow \min.$$
(2)

Анализ формулы (2) показывает, что определение первых двух слагаемых затруднений не вызывает, так как стоимость материала, из которого предполагается изготавливать СММ, и трудоемкость, а следовательно, стоимость обработки его поверхностей являются широко распространенной информацией, которую можно легко получить из общедоступных источников, например [12]. В то же время расчет стоимости структуры каналов вызывает определенные затруднения из-за ее вариативности.

Для решения этой задачи рассмотрим конструктивное устройство СММ, представленное схематично на рис. 1.

На рисунке приведена структура расположения каналов СММ. Чтобы выполнить расчеты стоимости структуры СММ, введем индексы отверстий СММ: входа (i) и выхода (j) рабочей жидкости, где значения индексов соответствуют номерам коммуникационных каналов, приведенных на рис. 1, и находятся в пределах 9–24. Тогда *i* = 9, 10, …, 23, а *j* = 10, 11, …, 24. Введенные обозначения и размеры позволяют нам задавать и определять характеристику каналов СММ при проходе рабочей жидкости с одной плоскости модуля на другую и в итоге рассчитывать стоимость затраченной энергии на гидравлические потери давления в каналах СММ (Ц₂) и операции



Рис. 1. Схема конструктивного устройства соединительно-монтажных модулей (СММ); цифрами 1-8 обозначены магистральные каналы модулей; 9-24 - коммуникационные каналы устройства Fig. 1. Schema of the structural device of connection and mounting modules (CMM); the numbers 1–8 indicate the main channels of the modules; 9–24 – the communication channels of the device

сверления каналов СММ (Π_{cB}) в соединениях между установленными на СММ гидроаппаратами. Тогда каждое из соединений каналов СММ будет определяться также двумя индексами – *i*, *j*, что в свою очередь позволит нам установить структуру разрабатываемой конструкции. Для пояснения конструктивного устройства СММ на рис. 1 нанесена трассировка соединения между отверстиями *i* = 9 и *j* = 11.

Следует отметить при этом, что конфигурации каналов, учитываемые для расчетов Ц₃ и Ц_{св}, могут несколько отличаться между собой, что обусловлено технологическими особенностями изготовления каналов СММ. Так, на рис. 1 для расчета Ц₃ будет использоваться структура каналов, нанесенная сплошной линией, а для определения Ц_{св} необходимо добавлять еще и участки каналов, нанесенные штриховыми линиями.

На основе анализа рис. 1 можно составить треугольную матрицу структуры каналов, устанавливающую связи между входными (*i*) и выходными (*j*) отверстиями СММ:

	(Ц _{9,10}	Ц _{9,11}	Ц _{9,12} Ц _{9,22}	Ц _{9,23}	Ц _{9,24}	
	0	Ц _{10,11}	Ц _{10,12} Ц _{10,22}	Ц _{10,23}	Ц _{10,24}	
	0	0	Ц _{11,12} Ц _{11,22}	Ц _{11,23}	Ц _{11,24}	
$\coprod_{i,j} =$. (3)
	0	0	0Ц _{21,22}	Ц _{21,23}	Ц _{21,24}	
	0	0	00	Ц _{22,23}	, Ц _{22,24}	
	0	0	00	0	Ц _{23.24}	

Элементами матрицы являются значения сумм $\amalg^{ij}_{\mathfrak{S}}$ и $\amalg^{ij}_{\mathfrak{CB}}$ каналов СММ, то есть

$$\coprod_{ii} = \coprod_{\mathfrak{I}}^{ij} + \coprod_{CB}^{ij}$$

Гидравлические потери давления в соединениях между гидроаппаратами посредством СММ можно рассчитать следующим образом:

$$\Delta p_{i,j} = \sum_{k=1}^{m_j} \Delta p l_k + \sum_{s=1}^{n_i} \Delta p m_s,$$
(4)

где n_i – количество местных сопротивлений (поворотов), шт.; m_j – количество прямолинейных участков каналов, шт.; $\Delta p_{i,j}$ – потеря давления в заданном направлении, МПа; i = 9, 10, ..., 23 – номера входных отверстий; j = 10, 11, ..., 24 – номера выходных отверстий; Δp_{l_k} – потеря давления на трение по длине прямолинейного участка канала, МПа, определяемая следующим образом:

$$\Delta p l_k = \frac{8\rho Q^2}{\pi^2} \lambda \frac{L_k}{d_k^5}$$

 $(L_k - длина прямолинейного участка канала, определяемая по размерам <math>a, a_0, b, b_0, h, h_0$ ребер СММ (см. рис. 1), м; d_k – диаметр участка коммуникационного канала, м; Q – расход жидкости, дм³/мин; λ – коэффициент Дарси); Δpm_s – потеря давления на местных сопротивлениях (на поворотах), МПа, рассчитываемая по выражению

$$\Delta pm_s = \frac{8\rho Q^2}{\pi^2} \xi \frac{1}{dm_s^4}$$

(*dm* – диаметр магистрального канала, мм; ρ – плотность жидкости, кг/дм³; ξ – коэффициент местного сопротивления).

Для определения L_k используем размеры СММ, указанные на рис. 1. Относительно базового размера a, который примем в расчетах равным 0,08 м, остальные размеры модуля будут находиться из следующих соотношений:

$$b = a, h = 0.8a, a_0 = 0.635a, b_0 = a_0, h_0 = 0.635h.$$

Аналогично задаем относительные значения диаметров каналов:

$$d_k = 0, 1a, dm = 0, 138a.$$

Для исследования зависимости гидравлических потерь давления в каналах от линейных размеров СММ будем рассматривать безразмерную величину:

$$\Delta \tilde{p}_{i,j} = \Delta p_{i,j} \left(\frac{\pi^2 a^4}{8\rho Q^2} \right).$$
(5)

Тогда

$$\mathbf{\Pi}_{\mathfrak{I}}^{ij} = \Delta p_{i,j} Q \cdot \mathbf{T},\tag{6}$$

где T – стоимость киловатт-часа гидравлических потерь, руб. Подставив (4) в (5), определим \coprod_{2}^{ij} для $\lambda = 1$ и $\xi = 0,987$ (в СММ повороты каналов выполнены под углом 90°) (рис. 2).

Рассчитаем стоимость операции сверления каналов \coprod^{ij}_{cB} :

$$\mathbf{\Pi}_{\rm cB}^{ij} = \frac{1000}{\upsilon_{\rm II} \cdot n} \sum L_{ij} \cdot \mathbf{T}_{\rm H-vac},\tag{7}$$

где n – частота вращения сверла, n = 500 об/мин; υ_n – скорость подачи сверла, $\upsilon_n = 0,14$ мм/об; L_{ij} – длина каналов между отверстиями входа i и выхода j, м; $T_{n-чac}$ – стоимость нормочаса операции



Рис. 2. График зависимости составляющей Ц^{*ij*} (стоимость затраченной энергии на гидравлические потери давления в каналах СММ) при проходе рабочей жидкости между отверстиями входа і и выхода ј (область Парето): 1 – верхняя граница области Парето; 2 – нижняя граница области Парето

Fig. 2. The component graph of the CMM channel structure component $\prod_{j=1}^{j}$ (the cost of energy spent on hydraulic pressure losses in the CMM channels) during the passage of the working fluid between the inlet holes i and outlet j (Pareto region): 1 - the upper boundary of the Pareto region; 2 - the lower boundary of the Pareto region



Рис. 3. График зависимости затрат Ц^{*ij*}_{св} (стоимости сверления каналов СММ (область Парето)); пунктирная линия – стоимость сверления каналов, имеющих 9-е входное отверстие; 1 – верхняя граница области Парето; 2 – нижняя граница области Парето; 3 – стоимость сверления каналов, имеющих 9-е входное отверстие Fig. 3. The graph for drilling CMM channels (cost of drilling channels CMM – Pareto region) \coprod_{cB}^{ij} ; the dotted line is the cost of drilling channels, the unique 9th inlet; I – upper boundaries of the Pareto region; 2 – the lower boundary of the Pareto region; 3 - the cost of drilling channels, the presence of a 9^{th} inlet

сверления, $T_{H-4ac} = 0,457$ руб/ч [12]. Используя полученные значения U_{9}^{ij} (см. рис. 2) и U_{cB}^{ij} (рис. 3), можно выполнить расчеты стоимости структуры каналов U_{ij} .

Анализ графиков на рис. 2 и 3 показывает, что на начальных этапах эксплуатации СММ расходы на сверление каналов и Π_{cB}^{ij} превосходят расходы на затраты энергии Π_{3}^{ij} в 10–30 раз. Вместе с тем срок эксплуатации ГУ как правило составляет 10 лет и более, то есть затраты на изготовление СММ в данном случае будут являться одноразовыми и иметь постоянную величину, а вот затраты энергии (Π_{3}^{ij}) будут многократно возрастать.

Заключение. Таким образом, как показывают результаты исследований, за год эксплуатации изделия при двусменной работе оборудования (годовой фонд рабочего времени – 4018 ч) соотношение Π_{3}^{ij} увеличивается в 300 раз по отношению к Π_{cs}^{ij} , при том что срок эксплуатации гидроблоков управления, как правило, составляет 10 лет и более. То есть при назначении коэффициентов важности критериев C_1-C_4 по формуле (1), учитывая длительность срока эксплуатации соединительно-монтажного модуля, которая может достигать 10 лет и более, затратами на стоимость материала и обработки заготовки данного модуля можно пренебречь. При этом расчет и разработку конструкции СММ можно вести исключительно на основе учета гидравлических потерь давления в его каналах.

Предложенный подход применим при проектировании монтажного корпуса гидроблоков управления машин, а также компонентов и систем на их основе приводов оборудования различного назначения.

Список использованных источников

1. Свешников, В. К. Станочные гидроприводы: справочник / В. К. Свешников. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2004. – 510 с.

2. Красневский, Л. Г. Роль наукоемких компонентов в машиностроении / Л. Г. Красневский // Современные методы проектирования машин: респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск: Технопринт, 2004. – Т. 1, вып. 2. – С. 47–50.

3. Chen, J. Design and Optimization of Mounting Housing for Machine Control Units in Harsh Environments / J. Chen, Z. Li, Q. Wang // Journal of Engineering Design. – 2021. – Vol. 32, Iss. 12. – P. 789–803.

4. Li, Z. Topology Optimization of Mounting Frame for Machine Tool Control Units in Harsh Environment / Z. Li, J. Chen, Q. Wang // Structural and Interdisciplinary Optimization. – 2021. – Vol. 64, Iss. 4. – P. 1529–1543.

5. Chen, J. Parametric optimization of mounting frame for machine tool control units under harsh environments / J. Chen, Z. Li, Q. Wang // Engineering Optimization. – 2022. – Vol. 54, Iss. 1. – P. 123–140.

6. Пинчук, В. В. Минимизация гидравлических потерь давления в каналах соединительно-монтажного модуля при построении структурных схем агрегатно-модульных гидроблоков управления технологического оборудования / В. В. Пинчук, С. Ф. Андреев, Е. В. Иноземцева // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2016. – № 4. – С. 41–45.

7. Пинчук, В. В. Расчет и конструирование агрегатно-модульных гидроблоков управления гидроприводов технологических машин / В. В. Пинчук, В. К. Шелег. – Гомель: Гомел. госуд. техн. ун-т им. П. О. Сухого, 2010. – 270 с.

8. Азашиков, М. С. Влияние упругой связи между элементами гидроцилиндра на динамическую нагруженность стреловой группы / М. С. Азашиков, З. К. Емтыль, А. П. Татаренко // Новые технологии. – 2007. – № 3. – С. 95–96.

9. Орлов, Е. В. Автоматизированная программа расчета гидравлических параметров трубопровода при реновации альтернативных покрытий / Е. В. Орлов, Д. И. Шлычков, В. А. Орлов // Вестник МГСУ. – 2010. – Вып. 1. – С. 231–234.

10. Коханенко, В. Н. Модель расчета параметров потока на входе в расширение / В. Н. Коханенко, И. В. Папченко, Н. Г. Папченко // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 140–143.

11. Создание конструкций гидроприводов машин методом агрегатирования / А. Я. Оксененко, А. Е. Окунев, В. В. Пинчук [и др.]. – М.: НИИМАШ, 1985. – 77 с.

12. Справочник технолога машиностроителя: в 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещярокова. – 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1986. – Т. 1. – 656 с.

References

1. Sveshnikov V. K. *Machine Tool Hydraulic Drives: Reference Book.* 4th ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 510 p. (in Russian).

2. Krasnevsky L. G. The role of high-tech components in mechanical engineering. *Sovremennye metody proektirovaniya mashin: resp. mezhvedomstv. sb. nauch. tr.* [Modern Methods of Machine Design: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2004, vol. 1, iss. 2, pp. 47–50 (in Russian).

3. Chen J., Li Z., Wang Q. Design and Optimization of Mounting Housing for Machine Control Units in Harsh Environments. *Journal of Engineering Design*, 2021, vol. 32, iss. 12, pp. 789–803.

4. Li Z., Chen J., Wang Q. Topology Optimization of Mounting Frame for Machine Tool Control Units in Harsh Environment. *Structural and Interdisciplinary Optimization*, 2021, vol. 64, iss. 4, pp. 1529–1543.

5. Chen J., Li Z., Wang Q. Parametric optimization of mounting frame for machine tool control units under harsh environments. *Engineering Optimization*, 2022, vol. 54, iss. 1, pp. 123–140.

6. Pinchuk V. V., Andreev S. F., Inozemtseva E. V. Minimization of hydraulic pressure losses in the channels of the connecting and mounting module when constructing structural diagrams of modular hydroblocks for controlling technological equipment. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of the P. O. Sukhoi State Technical University], 2016, no. 4, pp. 41–45 (in Russian).

7. Pinchuk V. V., Sheleg V. K. Calculation and Design of Aggregate-Modular Hydraulic Control Units for Hydraulic Drives of Technological Machines. Gomel', P. O. Sukhoi State Technical University, 2010. 270 p. (in Russian).

8. Azashikov M. S., Emtyl Z. K., Tatarenko A. P. Influence of elastic connection between hydraulic cylinder elements on the dynamic load of the boom group. *Novye tekhnologii = New Technologies*, 2007, no. 3, pp. 95–96 (in Russian).

9. Orlov E. V., Shlychkov D. I., Orlov V. A. Automated program for calculating the hydraulic parameters of a pipeline during the renovation of alternative coatings. *Vestnik MGSU*, 2010, iss. 1, pp. 231–234 (in Russian).

10. Kokhanenko V. N., Papchenko I. V., Papchenko N. G. Model for calculating flow parameters at the entrance to the expansion. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki* [News of Universities. North Caucasus Region. Technical Sciences], 2008, no. 4. pp. 140–143 (in Russian).

11. Oksenenko A. Ya., Okunev A. E., Pinchuk B. V. [et al.]. *Creation of Designs for Hydraulic Drives of Machines Using the Aggregation Method.* Moscow, Research and Development Institute of Mechanical Engineering, 1985. 77 p. (in Russian).

12. Kosilova A. G., Meshcharokov R. K. (eds.). *Handbook of a Machine Builder Technologist. Vol. 1.* Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 656 p. (in Russian).

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

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-145-158 УДК 661.685+544.42

(CC) BY 4.0

Оригинальная статья

С. В. Василевич^{1,2*}, Д. В. Дегтеров¹, С. Д. Юхневич²

¹Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь ²Белорусская государственная академия авиации, ул. Уборевича, 77, 220072, Минск, Республика Беларусь

КИНЕТИКА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ГЕКСАФТОРСИЛИКАТА НАТРИЯ В ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Обсуждаются результаты экспериментального исследования термического разложения гексафторсиликата натрия (Na₂SiF₆), выполненного в изотермических условиях при температурах 600, 700, 800 и 900 °С. Показано, что кинетику этого процесса можно описать с помощью уравнения Аврами–Ерофеева с переменным показателем *n*, при этом область изменения этого показателя составляет от 0,541 до 1,545. Среднее значение показателя *n*, рассчитанное по всем вариантам исследования, составило 0,761. Как известно, уравнение Аврами–Ерофеева описывает кинетику термического разложения вещества в конденсированном состоянии, определяемую процессом зародышеобразования. Это позволяет предположить, что в случае термического разложения гексафторсиликата натрия в интервале температур 600–900 °С данный процесс является лимитирующей стадией суммарного процесса. Обнаружено, что скорость разложения Na₂SiF₆ возрастает с увеличением температуры. Среднее значение энергии активации составило 63,23 кДж/моль, среднее значение предэкспоненциального фактора *A* – 1,807·10² мин⁻¹. Результаты могут быть использованы при разработке оборудования по получению поликристаллического кремния полупроводникового качества, который является основным сырьевым материалом для производства оборудования, используемого в микро- и силовой электронике и фотоэнергетике.

Ключевые слова: гексафторсиликат натрия, кинетика разложения, константа скорости, энергия активации, предэкспоненциальный фактор

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Василевич Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Белорусской государственной академии авиации; ведущий научный сотрудник Института энергетики Национальной академии наук Беларуси. E-mail: svasilevich@yandex.ru; Дегтеров Дмитрий Валентинович – заведующий сектором Института энергетики Национальной академии наук Беларуси. E-mail: ddegterov@mail.ru; Юхневич Сергей Дмитриевич – старший преподаватель Белорусской государственной академии авиации. E-mail: sergei.museum@mail.ru

Вклад авторов: Василевич Сергей Владимирович – создание концепции, проведение экспериментов, обобщение результатов исследования, работа с текстом рукописи; Дегтеров Дмитрий Валентинович – работа с литературными источниками; Юхневич Сергей Дмитриевич – проведение экспериментов.

Для цитирования: Василевич, С. В. Кинетика термического разложения гексафторсиликата натрия в изотермических условиях / С. В. Василевич, Д. В. Дегтеров, С. Д. Юхневич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 2. – С. 145–158. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-145-158

Поступила в редакцию: 15.01.2025

Доработанный вариант: 22.04.2025

Утверждена к публикации: 12.06.2025

Подписана в печать: 19.06.2025

[©] Василевич С. В., Дегтеров Д. В., Юхневич С. Д., 2025

Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Sergey V. Vasilevich^{1,2*}, Dmitry V. Degterov¹, Sergey D. Yukhnevich²

¹Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, 15, building 2, Academicheskaya St., 220072, Minsk, Republic of Belarus ²Belarusian State Aviation Academy, 77, Uborevich St., 220072, Minsk, Republic of Belarus

KINETICS OF THERMAL DECOMPOSITION OF SODIUM HEXAFLUOROSILICATE UNDER ISOTHERMAL CONDITIONS

Abstract. The results of an experimental study of the thermal decomposition of sodium hexafluorosilicate Na₂SiF₆, performed under isothermal conditions at temperatures of 600, 700, 800 and 900 °C, are discussed. It is shown that the kinetics of this process can be described using the Avrami–Erofeev equation with a variable exponent *n*. The range of this exponent is from 0.541 to 1.545. The average value of the exponent n, calculated for all study variants, was 0.761. As is known, the Avrami–Erofeev equation describes the kinetics of thermal decomposition of a substance in a condensed state, determined by the nucleation process. This suggests that in the case of thermal decomposition of sodium hexafluorosilicate in the temperature range of 600–900 °C, this process is the limiting stage of the overall process. It was found that the decomposition rate of the pyrolytic Na₂SiF₆ increases with increasing temperature. The average value of activation energy was 63.23 kJ/mol. The average value of pre-exponential factor A was 1.807 10² min⁻¹. The results can be used in the development of equipment for obtaining polycrystalline silicon of semiconductor quality, which is the main raw material for the production of equipment used in micro- and power electronics and photovoltaics.

Keywords: sodium hexafluorosilicate, decomposition kinetics, rate constant, activation energy, pre-exponential factor **Conflict of interest:** the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: Sergey V. Vasilevich – Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher at Belarusian State Aviation Academy; Leading Researcher at Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: svasilevich@yandex.ru; Dmitry V. Degterov – Head of Sector at Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: ddegterov@mail.ru; Sergey D. Yukhnevich – Senior Lecturer at Belarusian State Aviation Academy. E-mail: sergei.museum@mail.ru

Contribution of the authors: Sergey V. Vasilevich – concept creation, experiments, generalization of research results, work with the manuscript text; Dmitry V. Degterov – work with literary sources; Sergey D. Yukhnevich – experiments.

For citation: Vasilevich S. V., Degterov D. V., Yukhnevich S. D. Kinetics of thermal decomposition of sodium hexafluorosilicate under isothermal conditions. *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. 2, pp. 145–158 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-70-2-145-158

Received: 15.01.2025 Modified: 22.04.2025 Approved for publication: 12.06.2025 Signed to the press: 19.06.2025

Введение. Технологии получения гексафторсиликата натрия (Na₂SiF₆), который является ценным продуктом, освещаются в ряде исследований [1–3]. В настоящее время это соединение широко применяется при производстве кремния, используемого в различных отраслях народного хозяйства. На мировом рынке отмечается рост спроса на чистый кремний в связи с его использованием, например, в солнечной энергетике и электронике. Также гексафторсиликат натрия может выступать источником кремния для формирования покрытий Si₃N₄ с помощью гибридной системы прекурсоров – химического осаждения из паровой фазы [1, 4].

Для создания на базе высокообогащенного изотопа ²⁸Si физически обоснованного эталона массы необходим высокочистый кремний. Исходным продуктом в этом случае является тетрафторид кремния (SiF₄), получение которого происходит по реакции термического разложения гексафторсиликата натрия: Na₂SiF₆ \rightarrow 2NaF + SiF₄. Термическое разложение гексафторсиликата натрия начинается при температуре 300 °C. Процесс получения SiF₄ проводят при температуре 540–710 °C [5].

В [6] приведено описание способа получения кремния, который заключается в диссоциации Na_2SiF_6 на SiF_4 и NaF с последующим восстановлением SiF_4 натрием.

Конечные продукты термолиза гексафторсиликата натрия имеют широкое техническое применение. Так, SiF₄ используют в производстве кремнийсодержащих веществ, кремния и его изотопов для микроэлектроники, а также в некоторых других отраслях промышленности, например, для придания изделиям водоотталкивающих свойств, устойчивости к коррозии и истиранию, для улучшения гидрофобных свойств кристаллических молекулярных сит (в частности для синтеза мелкодисперсной кремниевой кислоты) и т. д. Синтезированный NaF применяется в производстве алюминия и фтористого водорода, твердых электролитов, стекол, эмалей, керамики, огнеупоров, термостойких смазок, кислотоупорного цемента, в качестве добавки к строительным смесям, для сварки, пайки и переплавки металлов, травления стекол, как инсектицид, консервант древесины, сорбент, а также в качестве реагента для фторирования зубной пасты и воды.

К настоящему времени выполнено большое количество работ по изучению кинетики химических реакций с участием гексафторсиликата натрия (например, [2, 8]), в том числе его термического разложения [7]. Исследования кинетики термического разложения Na₂SiF₆ проводятся в атмосфере азота [4, 9] и воздуха [10, 11], при этом в открытых публикациях практически отсутствует либо крайне ограничена информация о механизмах и макрокинетических параметрах (константа скорости, энергия активации, предэкспоненциальный фактор) реакции термического разложения гексафторсиликата натрия в изотермических условиях в атмосфере воздуха. Между тем данные условия являются наиболее простыми в реализации процесса получения тетрафторида кремния путем термического разложения гексафторсиликата натрия.

Цель настоящей работы – определение экспериментальным путем механизма и макрокинетических параметров реакции термического разложения гексафторсиликата натрия в атмосфере воздуха при температуре от 600 до 900 °C.

Методика исследования. Исследование термохимических процессов проводилось в изотермических условиях, что позволило сократить число показателей, которые подлежали определению. Указанные условия упрощают анализ получаемых экспериментальных данных, что в итоге приводит к более точному установлению кинетических параметров термохимического процесса.

В качестве объекта исследования был принят гексафторсиликат натрия (Na₂SiF₆), представляющий собой порошок с размером частиц 0,317 мм. Плотность Na₂SiF₆, равна 2,68 г/см³ (насыпная плотность 1,213 г/см³).

Скорость термического разложения Na₂SiF₆ определялась следующим образом. Образец порошка массой около 1 г насыпался в лабораторную керамическую емкость (кювету) и помещался в печь SNOL 7,2/1300 (ОАО «Умега», Российская Федерация), в которой возможно поддерживать постоянную температуру среды в интервале 500-1300 °C с точностью ± 2 °C. Образцы Na₂SiF₆ выдерживались при заданной постоянной температуре в воздушной атмосфере. После выдержки в течение установленного периода времени кювета извлекалась из печи и взвешивалась на электронных весах Pioneer PA214C 210/0.1mg (OHAUS Corporation, CША) с дискретностью 0,1 мг. Так как длительность замера массы незначительна (не более 5 с), а время непрерывной выдержки образца в печи составляло от 5 до 20 мин, тепловой инерцией кюветы и Na₂SiF₆ было решено пренебречь. Эта процедура повторялась при постоянной температуре до прекращения реакции разложения, о чем свидетельствует достижение постоянной остаточной массы образца.

Опыты выполнялись при температурных значениях 600, 700, 800 и 900 °С. Для каждой температуры проводилось две серии экспериментов.

Результаты исследования и их обсуждение. Термическое разложение Na₂SiF₆ в атмосфере воздуха можно записать в виде формальной реакции [1–5]

$$Na_2SiF_6 \to SiF_4 + 2NaF. \tag{1}$$

Результаты экспериментов приведены в табл. 1–4. Символы m_0 и m_t обозначают соответственно массу изучаемого образца до момента помещения в печь и в момент извлечения из нее; t – промежуток времени от начала эксперимента до изъятия из печи, а α_t – степень разложения образца в момент изъятия его из нагревательной печи.

Таблица 1. Результаты исследования конверсии при температуре 600 °С для первой (m₀ = 0,984 г) и второй (m₀ = 1,167 г) серий экспериментов

Table 1.	Results of the conversion study at 600 °C for the first ($m_0 = 0.984$ g) and second ($m_0 = 1.167$ g)
	series of experiments

<i>t</i> , мин	<i>т</i> , г <i>т</i> , g	m_t/m_0	α,	<i>т</i> _{<i>t</i>} , г <i>т</i> _{<i>t</i>} , g	m_t/m_0	α,
t, min	Пер The	рвая серия эксперименто e first series of experiment	B S	Вторая серия эксперименто The second series of experimen		ITOB nents
0	0,984	1	0	1,167	1	0
1	0,981	0,997	0,005	1,150	0,985	0,024
2	0,976	0,992	0,014	1,148	0,984	0,027
3	0,956	0,972	0,048	1,134	0,972	0,047
5,5	0,92	0,935	0,110	1,109	0,950	0,083
7	0,913	0,928	0,121	1,093	0,936	0,106
10	0,876	0,890	0,184	1,030	0,882	0,197
13	0,84	0,854	0,246	0,998	0,855	0,243
15	0,821	0,834	0,278	0,944	0,808	0,321
20	0,772	0,785	0,361	0,895	0,766	0,391
25	0,746	0,758	0,406	0,810	0,694	0,513
30	0,674	0,685	0,529	0,770	0,659	0,571
35	0,654	0,665	0,563	0,713	0,611	0,653
40	0,593	0,603	0,667	0,676	0,579	0,706
45	0,562	0,571	0,719	0,633	0,542	0,767
50	0,551	0,560	0,738	0,606	0,519	0,806
55	0,493	0,501	0,837	0,585	0,501	0,837
60	0,474	0,482	0,869	0,583	0,499	0,839
70	0,456	0,463	0,900	0,578	0,495	0,847
83	0,443	0,450	0,922	0,576	0,493	0,849
100	0,458	0,465	0,897	0,568	0,486	0,861

Таблица 2. Результаты исследования конверсии при температуре 700 °С для первой (m₀ = 1,28 г) и второй (m₀ = 0,821 г) серий экспериментов

Table 2. Results of the conversion study at 700 °C for the first ($m_0 = 1.28$ g) and second ($m_0 = 0.821$ g) series of experiments

		1	1	1	1	1	
<i>t</i> , мин	m_p, Γ m_p, g	m_t/m_0	α_t	<i>т</i> , г <i>т</i> , g	m_t/m_0	α_t	
t, min	Пер The	вая серия эксперименто e first series of experiments	B S	Вторая серия экспериментов The second series of experiments			
0	1,28	1	0	0,821	1	0	
1	1,238	0,967	0,055	0,786	0,957	0,071	
2	1,235	0,965	0,059	0,782	0,952	0,079	
3	1,229	0,960	0,067	0,76	0,925	0,124	
5	1,148	0,897	0,173	0,653	0,795	0,343	
7	1,077	0,841	0,266	0,588	0,716	0,476	
10	0,929	0,726	0,460	0,446	0,543	0,766	
13	0,778	0,608	0,658	0,384	0,467	0,893	
15	0,728	0,569	0,723	0,38	0,462	0,901	
20	0,585	0,457	0,911	0,385	0,468	0,891	
25	0,567	0,443	0,935	0,382	0,465	0,897	
30	0,571	0,446	0,929	0,381	0,464	0,899	

Таблица 3. Результаты исследования конверсии при температуре 800 °С для первой (m₀ = 1,052 г) и второй (m₀ = 1,076 г) серий экспериментов

Table 3.	Results of the conversion study at 800 °C for the first ($m_0 = 1.052$ g) and second ($m_0 = 1.076$	g)
	series of experiments	

<i>t</i> , мин	<i>т</i> , г <i>т</i> , g	m_t/m_0	α,	m_t, Γ m_t, g	m_t/m_0	α,	
t, min	Пер The	рвая серия эксперимент e first series of experimer	ов ats	Вторая серия экспериментов The second series of experiments			
0	1,052	1	0	1,076	1	0	
1	1,012	0,962	0,064	1,015	0,943	0,095	
2	0,952	0,905	0,159	0,965	0,896	0,173	
3	0,878	0,835	0,277	0,86	0,799	0,336	
5	0,695	0,661	0,569	0,736	0,684	0,530	
7	0,603	0,573	0,716	0,601	0,558	0,741	
10	0,513	0,488	0,859	0,508	0,472	0,885	
13	0,489	0,465	0,898	0,49	0,455	0,913	
15	0,473	0,450	0,923	0,516	0,479	0,873	
20	0,479	0,455	0,914	0,515	0,478	0,874	
25	0,475	0,452	0,920	0,506	0,470	0,888	
30	0,473	0,450	0,923	0,509	0,473	0,884	

Таблица 4. Результаты исследования конверсии при температуре 900 °С для первой (m₀ = 1,15 г) и второй (m₀ = 0,749 г) серий экспериментов

Table 4. Results of the conversion study at 900 °C for the first ($m_0 = 1.15$ g) and second ($m_0 = 0.749$ g) series of experiments

<i>t</i> , мин	m_t, Γ m_t, g	m_t/m_0	α	<i>т</i> , г <i>т</i> , g	m_t/m_0	α,	
t, min	Пер The	вая серия эксперименто first series of experimen	DB ts	Вторая серия экспериментов The second series of experiments			
0	1,15	1	0	0,749	1	0	
1	1,062	0,923	0,128	0,603	0,808	0,327	
2	0,97	0,843	0,263	0,576	0,772	0,387	
3	0,858	0,746	0,426	0,439	0,588	0,694	
5	0,572	0,497	0,843	0,347	0,465	0,901	
7	0,532	0,463	0,902	0,341	0,457	0,912	
10	0,541	0,470	0,888	0,338	0,453	0,921	
13	0,53	0,461	0,904	0,332	0,445	0,934	
15	0,533	0,463	0,900	0,348	0,466	0,898	
20	0,524	0,456	0,913	0,338	0,453	0,921	

Значения степеней α_t термического разложения гексафторсиликата натрия, установленные в опытах, которые проводились при различной температуре, рассчитаны по формуле

$$\alpha_t = \frac{\left(m_0 - m_t\right)}{\left(m_0 - m_0 \cdot \left(\frac{m_t}{m_0}\right)_{\min}\right)}.$$
(2)

В выражении (2) величина $(m_t/m_0)_{\min}$ является минимальным теоретическим значением отношения m_t/m_0 . С учетом выражения (1) это значение можно оценить как отношение молекулярной массы 2NaF к молекулярной массе Na₂SiF₆ и равным 0,4039.

На рис. 1 показано сравнение степеней разложения Na_2SiF_6 , установленных при температурных значениях 600, 700, 800 и 900 °C. Как следует из приведенных на рисунке данных, разложение гексафторсиликата натрия в изученном интервале температур является достаточно медленным



Рис. 1. Сравнение степеней термического разложения гексафторсиликата натрия при температурных значениях 600 °C (●), 700 °C (○), 800 °C (▲) и 900 °C (△) в изотермических условиях в атмосфере воздуха для первой (*a*) и второй (*b*) серий экспериментов

Fig. 1. Comparison of the degrees of thermal decomposition of sodium hexafluorosilicate at temperatures of 600 °C (\bullet), 700 °C (\circ), 800 °C (\blacktriangle) μ 900 °C (Δ) under isothermal conditions in an air atmosphere for the first (*a*) and second (*b*) series of experiments

процессом. Например, время достижения степени разложения 0,8 при температуре 600 °С составило ~ 55 мин (~ 1 ч). Видно, что после достижения максимальных значений степени разложения наблюдается незначительное снижение, которое не превысило 0,8 % и может быть вызвано неточностью измерений массы.

Скорость разложения Na₂SiF₆ возрастает с увеличением температуры. Так, по данным рис. 1, степень разложения Na₂SiF₆, равная примерно 0,8 при температуре 900 °C, достигается за время < 5 мин.

В ходе проведения исследования определялись значения средних размеров частиц Na₂SiF₆. Для этого использовался программно-аппаратный металлургический комплекс AUTOSCAN (Италия), предназначенный для морфологического анализа изображений материалов. Комплекс оборудован оптической системой на базе микроскопа XD30M. Для каждого случая бралась случайная выборка частиц, равная 100, и рассчитывался средний размер частиц как среднее арифметическое. В табл. 5 приведены значения средних размеров частиц до термической конверсии и после прогрева в течение 1 ч при температуре 600, 700, 800 и 900 °C.

Таблица 5. Значения средних размеров (мм) частиц до термической конверсии и после прогрева в течение 1 ч

T a ble 5. Average particle size values (mm) before thermal conversion and after heating for 1 h $\,$

Исходный материал Starting material	После прогрева при температуре After warming up at a temperature						
	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C			
0,317	0,320	0,323	0,318	0,321			

На основании данных табл. 5 можно сделать вывод, что средний размер частиц гексафторсиликата натрия в ходе его термической конверсии в течение 1 ч практически не меняется. Это дает возможность утверждать, что изменение массы исследуемых образцов связано исключительно с протеканием химической реакции (1).

Кинетика разложения гексафторсиликата натрия. Как известно, основное уравнение кинетики термического разложения вещества в конденсированном состоянии имеет вид:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha),\tag{3}$$

где α – степень разложения вещества; k(T) – константа скорости реакции, мин⁻¹; $f(\alpha)$ – функция, определяемая механизмом реакции.



Рис. 2. Зависимости g(α) для модели Аврами–Ерофеева A₂ (*a*) и для модели реакции первого порядка F₁ (*b*) по результатам исследования разложения гексафторсиликата натрия при температуре 700 °C от времени (первая серия экспериментов)

Fig. 2. Dependences $g(\alpha)$ for the Avrami–Erofeev model $A_2(a)$ and for the first-order reaction model $F_1(b)$ based on the results of a study of the decomposition of sodium hexafluorosilicate at a temperature of 700 °C over time (first series of experiments)

Интегрирование уравнения (3) при постоянной температуре дает уравнение скорости реакции

$$g(\alpha) = kt,\tag{4}$$

где *g*(α) – интегральная функция кинетического уравнения.

Для определения механизма (модели) реакции термохимического разложения рассчитывались значения интегральной кинетической функции моделей $g(\alpha)$ [12–19] для каждого момента времени реакции. Вычислялось значение коэффициента детерминации Пирсона (R^2) для линейной аппроксимации зависимостей интегральных функций $g(\alpha)$ от времени. Так как известно, что $g(\alpha) = kt$ (при этом константа скорости (k) для изотермического процесса не зависит от времени (t)), то условием корректности выбранной модели является $R^2 \rightarrow 1$.

Примеры функциональной зависимости $g(\alpha)$ от времени показаны на рис. 2: представлены значения этой величины, рассчитанной для модели Аврами–Ерофеева (*a*) и для модели реакции первого порядка (*b*) по результатам исследования разложения гексафторсиликата натрия при температуре 700 °C (первая серия опытов).

Анализ экспериментальных данных, установленных в настоящей работе, показал, что кинетика термического разложения гексафторсиликата натрия в условиях выполненных исследований определяется уравнением Аврами–Ерофеева

$$\left[-\ln(1-\alpha_{t})\right]^{n} = kt,$$
(5)

где n – некоторый показатель, k – константа скорости формальной реакции разложения вещества, мин⁻¹.

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

Таблица 6. Значения показателя <i>и</i> уравнения Аврами–Ерофеева для процесса					
термического разложения гексафторсиликата натрия					

Table 6. Values of the index n of the Avrami–Yerofeyev equation for the process of thermal
decomposition of sodium hexafluorosilicate

Тип исследования Type of research	Температура, °C Temperature, °C			
	600	700	800	900
Первая серия экспериментов The first series of experiments	0,785	0,553	0,752	1,291
Вторая серия экспериментов The second series of experiments	0,828	0,541	0,692	1,545

Данная методика состояла в следующем. Уравнение (5) можно разрешить относительно константы скорости реакции:

$$k = (1/t) \cdot \left[-\ln(1 - \alpha_t) \right]^n.$$
(6)

Подстановка значений степени разложения α_t , соответствующих времени выдержки t, в выражение (6) и некоторого начального значения показателя n позволяет получить набор значений константы скорости разложения Na₂SiF₆. Этот набор констант скорости необходимо аппроксимировать линейным уравнением

$$k = A + B \cdot t. \tag{7}$$

В случае ошибочного значения заданного показателя n линейная аппроксимация приводит к расчетным значениям константы скорости, изменяющимся с течением времени. Данное обстоятельство указывает на то, что заданное значение показателя n не соответствует кинетике процесса. Следовательно, требуется другое значение этого показателя. Такие расчеты повторяются до тех пор, пока не будет подобран показатель n, приводящий к значениям константы скорости, линейная аппроксимация которых позволяет получить расчетные значения константы скорости, не зависящие от времени протекания реакции.

Пример корректного выбора показателя *n* на основе описанной итеративной процедуры, представлен на рис. 3. Точки на рисунке показывают экспериментальные значения константы скорости разложения Na₂SiF₆, рассчитанные по выражению (6) с использованием показателя *n*, равного 0,553 для первой серии экспериментов и 0,541 – для второй серии экспериментов, а прямые линии, практически параллельные оси абсцисс, дают усредненное значение константы скорости, которое определяется линейной аппроксимацией экспериментальных величин:

$$y = 0,0755 - 6 \cdot 10^{-5} x, R^2 = 0,0047$$
 (первая серия экспериментов); (8)
 $y = 0,078 - 4 \cdot 10^{-5} x, R^2 = 0,0134$ (вторая серия экспериментов).

Здесь R^2 – коэффициент детерминации Пирсона.

Как следует из результатов линейной аппроксимации, использование показателей *n*, равных 0,553 для первой серии экспериментов и 0,541 для второй серии экспериментов, привело к значению коэффициента корреляции, близкому к нулю. Такой же результат установлен для коэффициента *B* линейного уравнения (8). На основании этого можно сделать вывод о том, что рассчитанная константа скорости не зависит от времени.

Данные табл. 6 показывают, что в случае термического разложения гексафторсиликата натрия каждый исследованный образец имеет свой индивидуальный показатель n. Это означает, что в случае разложения Na₂SiF₆ не существует такого универсального показателя n, который



Рис. 3. Зависимость константы скорости разложения гексафторсиликата натрия, определенной для модели Аврами–Ерофеева, от времени выдержки при температуре 700 °С для первой (a) и второй (b) серий экспериментов Fig. 3. Dependence of the rate constant of decomposition of the sodium hexafluorosilicate rate constant determined for the Avrami–Erofeev model on the holding time at a temperature of 700 °C for the first (a)

and second (b) series of experiments

позволил бы получить корректные значения константы скорости данного процесса для других образцов и других значений температуры. Особенно ясно это видно при сравнении показателей n для случаев первой и второй серий экспериментов при 900 °C. Несмотря на то что массы образцов и температуры нагрева были практически одинаковы, обеспечить абсолютно идентичные условия конверсии не представляется возможным в связи с влиянием большого количества незначительных факторов (неравномерность распределения частиц, малые различия формы керамических емкостей, особенности тепло- и массопереноса и др.). Эти отличия и влияют на значение показателя n, и чем выше температуры, тем значительнее данное влияние, что подтверждается данными табл. 6.

Описанная выше процедура расчета показателя *n* позволяет также определить усредненное по всем экспериментальным точкам значение константы скорости. Оно представляет собой первое слагаемое в правой части линейной аппроксимации. Например, в случае разложения Na_2SiF_6 при температуре 700 °C усредненное значение константы скорости, как следует из результатов линейной аппроксимации, составило 0,078 мин⁻¹.

Более точное значение константы скорости можно рассчитать по формуле

$$\overline{k} = \frac{\sum_{i=1}^{N} k_i}{N},\tag{9}$$

где k_i – значение константы скорости в момент времени t_i , вычисленное по выражению (6); N – количество экспериментальных точек.

В табл. 7 приведены усредненные значения константы скорости термического разложения гексафторсиликата натрия, рассчитанные с использованием формулы (9) и данных табл. 6 на основании экспериментальных значений константы скорости, определенных по формуле (6).

Таблица 7. Усредненные значения константы скорости термического разложения гексафторсиликата натрия, мин⁻¹

Table 7. Average values of the rate constant of thermal decomposition of sodium hexafluorosilicate, min^{-1}

Тип исследования Type of research	Температура, °C Temperature, °C				
	600	700	800	900	
Первая серия экспериментов The first series of experiments	0,029	0,075	0,166	0,257	
Вторая серия экспериментов The second series of experiments	0,027	0,079	0,156	0,256	

На рис. 4, 5 для сравнения представлены экспериментальные и расчетные значения степени разложения гексафторсиликата натрия (рис. 4 – первая серия экспериментов, рис. 5 – вторая серия экспериментов). Расчетные значения степени разложения Na₂SiF₆ были определены по выражению

$$\alpha_t = 1 - \exp(-(k \cdot t)^{1/n}), \tag{10}$$

полученному путем преобразования уравнения (5).

При расчете данных, представленных на рис. 4, были использованы значения показателя *n* (см. табл. 6) и усредненное значение константы скорости (см. табл. 7). Усредненное расхождение в экспериментальных и расчетных значениях степени разложения Na₂SiF₆ составило порядка 3,5 % для интервала значений степени разложения Na₂SiF₆ 0,15–0,86.

Обсуждаемое сравнение экспериментальных и расчетных степеней разложения гексафторсиликата натрия указывает на то, что кинетика термического разложения Na₂SiF₆ в изученной области температур определяется уравнением Аврами–Ерофеева.

Как известно из [20, 21], уравнение Аврами–Ерофеева описывает кинетику термического разложения вещества, лимитирующая стадия которого – зародышеобразование. И это позволяет заключить, что лимитирующей стадией разложения гексафторсиликата натрия в условиях, изученных в настоящей работе, является зародышеобразование.



Puc. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных значений степени разложения Na₂SiF₆ при температуре 600 °C (*a*), 700 °C (*b*), 800 °C (*c*) и 900 °C (*d*) в изотермических условиях в атмосфере воздуха для первой серии экспериментов Fig. 4. Comparison of experimental and calculated values of the degree of decomposition of Na₂SiF₆ at a temperature of 600 °C (*a*), 700 °C (*b*), 800 °C (*c*) and 900 °C (*d*) under isothermal conditions in an air atmosphere for the series of experiments



Рис. 5. Сравнение экспериментальных и расчетных значений степени разложения Na_2SiF_6 при температуре 600 °C (*a*), 700 °C (*b*), 800 °C (*c*) и 900 °C (*d*) в изотермических условиях в атмосфере воздуха для второй серии экспериментов Fig. 5. Comparison of experimental and calculated values of the degree of decomposition of Na_2SiF_6 at a temperature of 600 °C (*a*), 700 °C (*b*), 800 °C (*c*) and 900 °C (*d*) under isothermal conditions in an air atmosphere for the second series of experiments



Рис. 6. Аррениусовская зависимость логарифма констант скорости термического разложения Na₂SiF₆ для первой (*a*) и второй (*b*) серий экспериментов от обратной величины температуры

Fig. 6. Arrhenius dependence of the logarithm of the rate constants of thermal decomposition of Na_2SiF_6 for the first (a) and second (b) series of experiments on the reciprocal of temperature

На рис. 6 представлена Аррениусовская зависимость логарифма констант скорости термического разложения Na_2SiF_6 от обратной величины температуры для случаев первой (*a*) и второй (*b*) серии экспериментов. Хотя условия обеих серий экспериментов идентичны, было решено обработку данных экспериментов и расчеты для каждой серии проводить отдельно, так как на результаты могут повлиять даже незначительные факторы (распределение частиц вещества, неравномерность нагрева керамической емкости, структура и форма емкости и др.).

Аппроксимация данных, представленных на рис. 6, приводит к следующему выражению: для первой серии экспериментов

$$y = -(7520/T) + 5,1234, \text{ MuH}^{-1}, R^2 = 0,9948;$$

для второй серии экспериментов

$$y = -(7689,8/T) + 5,265, \text{ MuH}^{-1}, R^2 = 0,9927.$$

Умножение первого члена правой части линейной аппроксимации на значение универсальной газовой постоянной (8,314 Дж/(моль · K)) дает значение энергии активации реакции термического разложения Na₂SiF₆ E = 62,52 кДж/моль (для первой серии экспериментов) и 63,93 кДж/моль (для второй серии экспериментов). Второй член аппроксимации определяет значение предэкспоненциального фактора A (путем возведения числа e в степень, равную численному значению данного члена аппроксимации). Для первой серии экспериментов $A = 1,679 \cdot 10^2$ мин⁻¹; для случая второй серии экспериментов $A = 1,934 \cdot 10^2$ мин⁻¹.

В соответствии с этими величинами Аррениусовское выражение для константы скорости разложения гексафторсиликата натрия запишется в виде:

для первой серии экспериментов: $k = 1,679 \cdot 10^2 \cdot \exp(-62520/RT);$

для второй серии экспериментов: $k = 1,934 \cdot 10^2 \cdot \exp(-63930/RT)$.

Из приведенных уравнений видно, что значения энергии активации термического разложения гексафторсиликата натрия для случаев первой и второй серий экспериментов отличаются менее чем на 2,5 %, что говорит о хорошей повторяемости экспериментов. Среднее значение предэкспоненциального фактора A составило $1,807 \cdot 10^2$ мин⁻¹, среднее значение энергии активации – 63,23 кДж/моль, что хорошо согласуется с тем, что энтальпия реакции разложения Na₂SiF₆ равна 87,6 кДж/моль [22]. При этом в [4] описаны результаты исследований кинетики термического разложения Na₂SiF₆ в атмосфере азота и приведены механизм и энергия активации, значительно отличающиеся от приведенных выше (степенной закон, 116,4 ± 1,5 кДж/моль). Это можно объяснить влиянием условий эксперимента и состава атмосферы, в которой происходит реакция, на механизм реакции и значения ее макрокинетических параметров, а также тем, что приведенные в большинстве публикаций исследования проводились при неизотермических условиях, что может приводить к ошибочным значениям энергии активации. Ранее было выявлено [23], что определяемые значения энергии активации могут зависеть от скорости нагрева исследуемого образца и, следовательно, наиболее точные значения определяются только при изотермических условиях.

Заключение. В результате экспериментального исследования термического разложения гексафторсиликата натрия, выполненного в изотермических условиях при температурных значениях 600, 700, 800 и 900 °C, установлено, что кинетику этого процесса можно описать с помощью уравнения Аврами–Ерофеева с переменным показателем *n*. Анализ установленных данных показал, что область изменения этого показателя включает величины от 0,541 до 1,545. Среднее значение показателя *n*, рассчитанное по всем вариантам исследования, составило 0,761. Уравнение Аврами–Ерофеева описывает кинетику термического разложения вещества в конденсируемом состоянии, определяемую процессом зародышеобразования, что дает возможность предположить, следующее: в случае термического разложения гексафторсиликата натрия в интервале температур 600–900 °C данный процесс является лимитирующей стадией суммарного процесса.

Обнаружено, что скорость разложения Na₂SiF₆ возрастает с увеличением температуры. Среднее значение энергии активации составило 63,23 кДж/моль, среднее значение предэкспоненциального фактора $A - 1,807 \cdot 10^2$ мин⁻¹.

Результаты могут быть использованы при разработке оборудования по получению поликристаллического кремния полупроводникового качества, который является основным сырьевым материалом для производства оборудования, используемого в микро- и силовой электронике и фотоэнергетике.

Список использованных источников

1. Leal-Cruz, A. L. Thermodynamics and Kinetics of Na_2SiF_6 Decomposition in the Synthesis of Si_3N_4 via the Hybrid Precursor System (HYSYCVD) / A. L. Leal-Cruz, M. I. Pech-Canul // Advances in Technology of Materials and Materials Processing Journal. – 2007. – Vol. 9, No 5. – P. 153–160. https://doi.org/10.2240/azojomo0269

 $\label{eq:alpha} \begin{array}{l} \text{2. Kashiwaya, Y. Kinetics of formation and dissociation of $Na_2SiF_6 / Y. Kashiwaya, A. W. Cramb // Metallurgical and Materials Transactions B. <math display="inline">-$ 2002. - Vol. 33. - P. 129–136. https://doi.org/10.1007/s11663-002-0093-3 \\ \end{array}

3. Precipitation of sodium silicofluoride (Na₂SiF₆) and cryolite (Na₃AlF₆) from HF/HCl leach liquors of aluminosilicates / M. Kumar, M. N. Babu, T. R. Mankhand, B. D. Pandey // Hydrometallurgy. – 2010. – Vol. 104, Iss. 2. – P. 304–307. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.05.014

4. Mechanism and Parameters Controlling the Decomposition Kinetics of Na₂SiF₆ Powder to SiF₄ / N. Soltani, M. I. Pech-Canul, L. A. Ganzalez, A. Bahrami // International Journal of Chemical Kinetics. – 2016. – Vol. 48, Iss. 7. – P. 379–395. https://doi.org/10.1002/kin.20999

5. Крылов, В. А. Исследование источника появления углеводородов в SiF₄ при его получении пиролизом Na₂SiF₆ / В. А. Крылов, Т. Г. Сорочкина // IX Научная конференция «Аналитика Сибири и Дальнего Востока»: сб. материалов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. – URL: http://conf.sfu-kras.ru/conf/asfe12/report?memb id=4248.

6. Получение кремния из отходов фосфатного производства (Na₂SiF₆) / Е. А. Орлова, С. А. Загребаев, М. А. Орлов [и др.] // Краткие сообщения по физике – ФИАН. – 2010. – Т. 37, № 10. – С. 41–45.

7. Получение побочных продуктов из отходов азотнокислотной технологии переработки апатитового концентрата / М. М. Садыкова, М. В. Цыганкова, Г. В. Зимина, Ф. М. Спиридонов // Цветные металлы. – 2017. – № 7. – С. 62–67. https://doi.org/10.17580/tsm.2017.07.10

8. Leal-Cruz, A. L. A different consideration for Na₂SiF₆ formation/dissociation and its relation with silicon fluoride vaporization in the steelmaking process / A. L. Leal-Cruz, M. I. Pech-Canul, T. Certucha // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2008. – Vol. 29, Iss. 4. – P. 318–329. https://doi.org/10.1080/08827500802043409

9. Leal-Cruz, A. L. Synthesis of Si₃N₄ from Na₂SiF₆ as a Solid Precursor: Microstructural Evolution / A. L. Leal-Cruz, M. I. Pech-Canul // Materials Science Forum. – 2007. – Vol. 560. – P. 109–114. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ MSF.560.109

10. Термодинамический анализ некоторых химических процессов с участием тетрафторидов кремния и кварцевого стекла / О. Г. Поляченок, Л. Д. Поляченок, В. Н. Степаненко [и др.] // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А. А. Куляшова. – 2000. – № 4 (7). – С. 59–66.

11. Васюков, А. В. Оборудование и технологический процесс получения моносилана из продуктов переработки апатитов для производства поликристаллического кремния: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.27.06 / Васюков Александр Всеволодович; Белорус. гос. ун-т. информатики и радиоэлектроники. – Минск 2006. – 22 с.

12. Kissinger, H. E. Reaction kinetics in differential thermal analysis / H. E. Kissinger // Analitical Chemistry. – 1957. – Vol. 29, Iss. 11. – P. 1702–1706. https://doi.org/10.1021/ac60131a045

13. Akahira, T. Transactions of Joint Convention of Four Electrical Institutes, Paper No 246, 1969 Research Report Chiba Institute of Technology / T. Akahira, T. Sunose // Science Technology. – 1971. – Vol. 16. – P. 22–31.

14. Friedman, H. Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry. Application to a phenolic plastic / H. Friedman // Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia. – 1964. – Vol. 6, Iss. 1. – P. 183–195. https://doi.org/10.1002/polc.5070060121

15. Flynn, J. H. A quick, direct method for determination of activation energy from thermogravimetric data / J. H. Flynn, L. A. Wall // Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Letters. – 1966. – Vol. 4, Iss. 5. – P. 323–328. https://doi.org/10.1002/pol.1966.110040504

16 Ozava, T. A new method of analyzing thermogravimetric data / T. Ozava // Bulletin of the Chemical Society of Japan. – 1965. – Vol. 38, № 11. – P. 186–189. http://doi.org/10.1246/bcsj.38.1881

17. Coats, A. W. Kinetics parameters from thermogravimetric data / A. W. Coats, J. P. Redfern // Nature. - 1964. - Vol. 201. - P. 68-69. https://doi.org/10.1038/201068a0

18. Criado, J. V. Kinetic ansalysis of DTA data from master curves / J. V. Criado // Thermochimica Acta. – 1978. – Vol. 24, № 1. – P. 186–189. https://doi.org/10.1016/0040-6031(78)85151-x

19. Малько, М. В. Кинетика пиролиза древесной биомассы в изотермических условиях / М. В. Малько, С. В. Василевич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2019. – № 3. – С. 321–331. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-321-331

20. Vyazovkin, S. Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data / S. Vyazovkin, C. A. Wight // Thermochimica Acta. - 1999. - Vol. 340-341. - P. 53-68. https://doi.org/10.1016/S0040-6031%2899%2900253-1

21. Yunging, H. Theoretical Study of Thermal Analysis Kinetics : Doctor of Philosophy (PhD) / H. Yunging. – Kentucky: University of Kentucky, 2014. – URL: https://uknowledge.uky.edu/me etds/35/ (date of access: 20.07.2024).

22. Термические константы веществ / отв. ред. В. П. Глушко. – М. : АН СССР, ВИНИТИ, 1970. – Вып. 4. – 510 с.

23. Макрокинетические характеристики термического разложения доломита : монография / С. В. Василевич, М. В. Малько, К. В. Добрего [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2022. – 92 с.

References

1. Leal-Cruz A. L., Pech-Canul M. I. Thermodynamics and Kinetics of Na₂SiF₆ Decomposition in the Synthesis of Si₃N₄ via the Hybrid Precursor System (HYSYCVD). *Advances in Technology of Materials and Materials Processing Journal*, 2007, vol. 9, no. 5, pp. 153–160. https://doi.org/10.2240/azojom00269

2. Kashiwaya Y., Cramb A. W. Kinetics of formation and dissociation of Na₂SiF₆. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2002, vol. 33, pp. 129–136. https://doi.org/10.1007/s11663-002-0093-3

3. Kumar M., Babu M. N., Mankhand T. R., Pandey B. D. Precipitation of sodium silicofluoride (Na₂SiF₆) and cryolite (Na₃AlF₆) from HF/HCl leach liquors of alumino-silicates. *Hydrometallurgy*, 2010, vol. 104, iss. 2, pp. 304–307. https://doi. org/10.1016/j.hydromet.2010.05.014

4. Soltani N., Pech-Canul M. I., Ganzalez L. A., Bahrami A. Mechanism and Parameters Controlling the Decomposition Kinetics of Na₂SiF₆ Powder to SiF₄. *International Journal of Chemical Kinetics*, 2016, vol. 48, iss. 7, pp. 379–395. https://doi.org/10.1002/kin.20999

5. Krylov V. A., Sorochkina T. G. Investigation of the source of the appearance of hydrocarbons in SiF₄ during its production by pyrolysis of Na₂SiF₆. *IX Nauchnaya konferentsiya "Analitika Sibiri i Dal'nego Vostoka": sbornik materialov* [IX Scientific Conference "Analytics of Siberia and the Far East": Collection of Materials]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2011. Available at: http://conf.sfu-kras.ru/conf/asfe12/report?memb_id=4248. (in Russian)

6. Orlova E. A., Zagrebaev S. A., Orlov M. A., Kozlov F. A., Alekseev V. V., Drobyshev A. V., Zhmurin V. G. [et al.]. Silicon production from phosphate industry waste (Na₂SiF₆). *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2010, vol. 37, pp. 321–323. https://doi.org/10.3103/S1068335610100052

7. Sadykova M. M., Tsygankova M. V., Zimina G. V., Spiridonov F. M. By-products obtaining from nitric acid technology wastes of apatite concentrate processing. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals], 2017, no. 7, pp. 62–67 (in Russian). https://doi.org/10.17580/tsm.2017.07.10

8. Leal-Cruz A. L., Pech-Canul M. I., Certucha T. A different consideration for Na_2SiF_6 formation/dissociation and its relation with silicon fluoride vaporization in the steelmaking process. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2008, vol. 29, iss. 4, pp. 318–329. https://doi.org/10.1080/08827500802043409

9. Leal-Cruz A. L., Pech-Canul M. I. Synthesis of Si₃N₄ from Na₂SiF₆ as a Solid Precursor: Microstructural Evolution. *Materials Science Forum*, 2007, vol. 560, pp. 109–114. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.560.109

10. Polyachenok O. G., Polyachenok L. D., Stepanenko V. N., Dudchik G .P., Varankova N. V. Thermodynamic analysis of some chemical processes involving silicon tetrafluoride and quartz glass. *Vesnik Magileŭskaga dzyarzhaŭnaga ŭniversiteta imya A. A. Kulyashova* [Bulletin of Mogilev State University named after A. A. Kuleshov], 2000, no. 4, pp. 59–66 (in Russian).

11. Vasyukov A. V. Equipment and Technological Process for Obtaining Monosilane from Apatite Processing Products for the Production of Polycrystalline Silicon [dissertation abstract]. Minsk, 2006. 22 p. (in Russian).

12. Kissinger H. E. Reaction kinetics in differential thermal analysis. *Analitical Chemistry*, 1957, vol. 29, iss. 11, pp. 1702–1706. https://doi.org/10.1021/ac60131a045

13. Akahira T., Sunose T. Transactions of Joint Convention of Four Electrical Institutes. Paper No. 246, 1969 Research Report Chiba Institute of Technology. *Science Technology*, 1971, vol. 16, pp. 22–31.

14. Friedman H. Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry. Application to a phenolic plastic. *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia*, 1964, vol. 6, iss. 1, pp. 183–195. https://doi. org/10.1002/polc.5070060121

15. Flynn J. H., Wall L. A. A quick, direct method for determination of activation energy from thermogravimetric data. Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Letters, 1966, vol. 4, iss. 5, pp. 323–328. https://doi.org/10.1002/pol.1966.110040504 16. Ozava T. A new method of analyzing thermogravimetric data. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 1965, vol. 38, no. 11, pp. 186–189. http://doi.org/10.1246/bcsj.38.1881

17. Coats A. W., Redfern J. P. Kinetics Parameters from Thermogravimetric Data. *Nature*, 1964, vol. 201, pp. 68-69. https://doi.org/10.1038/201068a0

18. Criado J. V. Kinetic ansalysis of DTA data from master curves. *Thermochimica Acta*, 1978, vol. 24, no. 1, pp. 186–189. https://doi.org/10.1016/0040-6031(78)85151-x

19. Malko M. V., Vasilevich S. V. Kinetics of pyrolysis of wood biomass under isothermal conditions. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus.*

Physical-technical series, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 321–331 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-321-331 20. Vyazovkin S., Wight C. A. Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data. *Thermochimica Acta*, 1999, vol. 340–341, pp. 53–68. https://doi.org/10.1016/S0040-6031%2899%2900253-1

21. Yunging H. Theoretical Study of Thermal Analysis Kinetics [dissertation]. Kentucky, University of Kentucky, 2014. Available at: https://uknowledge.uky.edu/me_etds/35/ (accessed 20 July 2024).

22. Glushko V. P. (adv. red.) *Thermal Constants of Substances*. Moscow, All-Russian Institute of Scientific and Technical Information, 1970, Iss. 4. 510 p. (in Russian).

23. Vasilevich S. V., Mal'ko M. V., Dobrego K. V., Koznacheev I. A., Degtyarev D. V Macrokinetic Characteristics of Thermal Decomposition of Dolomite. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2022. 92 p. (in Russian).

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

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-159-165 UDC 621.31 (cc) BY 4.0

Original article

Petr. A. Khmarskiy

Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 16, Akademicheskaya St., 220072, Minsk, Republic of Belarus

GENERALIZED TECHNIQUE FOR OPTIMIZING THE PARAMETERS OF TRACKING ESTIMATORS OF COORDINATES AND MOTION PARAMETERS IN AIR AND GROUND SITUATION MONITORING SYSTEMS

Abstract. The paper presents the results of research and development of a methodology for optimizing parameters of tracking estimators for object coordinates and motion parameters. The methodology is based on a comprehensive approach to training dataset formation considering various types of object motion and application of specialized optimization algorithms. The developed algorithms implement a complete optimization cycle, including training dataset formation, data preprocessing, parameter optimization, and verification of obtained results. The results of practical application of the methodology for optimizing parameters of non-adaptive Kalman filter and Interacting Multiple Model (IMM) filter under various observation conditions and object motion patterns are demonstrated. Based on simulation modeling, it is shown that the application of the developed methodology significantly improves the accuracy of estimating coordinates and motion parameters compared to traditional approaches to parameter selection. Special attention is paid to studying the stability of obtained solutions to changes in observation conditions and object motion patterns. The obtained results are advisable to use in development and modernization of radar data tracking systems, air traffic control systems, air and ground situation monitoring complexes, as well as in other applications requiring high-precision estimation of object motion parameters under a priori uncertainty.

Keywords: tracking estimator, parameter optimization, Kalman filter, IMM-filter, maneuvering object, training dataset, a priori uncertainty, estimation accuracy

Conflict of interest: the author declares that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Petr A. Khmarskiy* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Doctoral Candidate at the Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. https://orcid.org/0000-0003-3404-3917. E-mail: pierre2009@mail.ru.

For citation: Khmarskiy P. A. Generalized technique for optimizing the parameters of tracking estimators of coordinates and motion parameters in air and ground situation monitoring systems. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi.* Seryya fizika-technichnych navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, 2025, vol. 70, no. 2, pp. 159–165. https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-159-165

Received: 12.03.2025 Modified: 14.03.2025 Approved for publication: 12.06.2025 Signed to the press: 19.06.2025

Оригинальная статья

П. А. Хмарский

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь

ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНОЙ И НАЗЕМНОЙ ОБСТАНОВКИ

Аннотация. Представлены результаты разработки и исследования обобщенной методики оптимизации параметров траекторных измерителей координат и параметров движения в системах мониторинга воздушной и наземной обстановки. Методика основана на комплексном подходе к формированию обучающей выборки с учетом различных моделей движения объектов и применении специализированных алгоритмов оптимизации. Разработанные алгоритмы реализуют полный цикл оптимизации, включая формирование обучающей выборки, предварительную обработку входных данных, совершенствование параметров и верификацию полученных результатов. Продемонстрированы результаты практического применения методики для настройки параметров неадаптивного фильтра Калмана и многоканального адаптивного фильтра (Interacting Multiple Model, IMM) при различных условиях наблюдения и характере движения объектов. На основе имитационного моделирования показано, что применение разработанной методики позволяет существенно повысить точность оценивания координат и параметров движения объектов по сравнению с традиционными подходами к выбору параметров. Особое внимание уделено исследованию устойчивости полученных решений к изменению условий наблюдения и характера движения объектов. Полученные результаты целесообразно использовать при разработке и модернизации систем траекторной обработки радиолокационной информации, в системах управления воздушным движением, при создании комплексов мониторинга наземной и воздушной обстановки, а также в других приложениях, требующих точного оценивания координат и параметров движения объектов в условиях априорной неопределенности.

Ключевые слова: траекторный измеритель, оптимизация параметров, фильтр Калмана, IMM-фильтр, маневрирующий объект, обучающая выборка, априорная неопределенность, точность оценивания

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторе: *Хмарский Петр Александрович* – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, докторант Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. https://orcid.org/0000-0003-3404-3917. E-mail: pierre2009@mail.ru

Для цитирования: Хмарский, П. А. Обобщенная методика оптимизации параметров траекторных измерителей координат и параметров движения в системах мониторинга воздушной и наземной обстановки / П. А. Хмарский // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 2. – С. 159–165. https:// doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-159-165

Поступила в редакцию: 11.03.2025 Доработанный вариант: 14.03.2025 Утверждена к публикации: 12.06.2025 Подписана в печать: 19.06.2025

Introduction. The optimization of tracking estimators for coordinates and motion parameters is one of the key challenges in modern air and ground situation monitoring systems [1-4]. This task becomes particularly relevant when tracking maneuvering objects, where high estimation accuracy is required under conditions of a priori uncertainty in object motion patterns [6, 7]. Recent years have seen significant progress in the development and improvement of trajectory filtering algorithms [2, 5, 7, 8]. Modern approaches allow for substantial improvement in motion parameter estimation accuracy through the use of adaptive and multiple-model methods. However, the selection and tuning of estimator parameters that determine their performance under various operating conditions remains a crucial issue [3, 7, 8]. Despite significant achievements in this field, existing approaches to tracking estimator optimization have several limitations: complexity in accounting for a priori uncertainty of various models of object motion; insufficient development of comprehensive estimator parameter optimization; and difficulties in practical implementation of the proposed optimization algorithms. This paper presents a method for optimizing tracking estimators aimed at overcoming these limitations. The method is based on a systematic approach to training dataset formation and the application of specialized optimization algorithms that consider the specifics of both non-adaptive and adaptive estimators. Special attention is paid to the practical feasibility of the proposed solutions.

The *aim of this work* is to improve the accuracy of estimating coordinates and motion parameters of objects by optimizing tracking estimator parameters while accounting for a priori uncertainty in the motion patterns of observed objects.
Generalized Technique for Optimizing Tracking Estimators. The developed technique for optimizing tracking estimators represents a seven-stage process that provides a systematic approach to solving the parameter tuning problem for estimators of coordinates and motion parameters of various object classes.

The first stage involves initial data formation, including specification of observed object classes and their motion models. In air and ground situation monitoring systems, various object classes can be observed [1, 7]: aerial (including aerodynamic aircraft, helicopters, unmanned aerial vehicles), ground (cars, trucks, people) and false objects. Each class is characterized by its specific motion models that are incorporated into the multi-channel IMM filter structure. This takes into account limitations on the estimator structure, selection of possible parameter ranges for tracking filters for each object class, and determination of estimation quality criteria, such as root mean square (RMS) errors of coordinates and motion parameters.

The second stage includes preparation of the training dataset by generating typical trajectories for each object class. During dataset formation, various motion scenarios are simulated [1–4, 7]: straight-line uniform motion, movements with maneuvers of varying intensity, motion with velocity changes and other. An important aspect is the integration of real experimental data and simulation of primary sensor measurement noise considering their actual characteristics.

The third stage involves optimizer setup, which includes formalization of the objective function as RMS estimation error minimization, definition of constraints on optimized parameters, selection of initial search points, and tuning of optimization algorithm parameters [9]. Special attention is paid to defining optimization process stopping criteria.

The fourth stage is dedicated to direct optimization of the estimator structure. During this stage, the optimal number of channels for each object class is determined, and filter types are selected for the channels [1, 4]: linear Kalman filters of various orders, quasi-linear filters, nonlinear filters, and specialized filters such as the Singer filter. Individual filter parameters are tuned, and in the case of IMM (Interacting Multiple Model) structure, the transition probability matrix between channels is optimized, and their interaction algorithms are configured.

The fifth stage provides validation of obtained results by testing solutions on a test trajectory dataset. Solution stability is evaluated under various conditions, including different initial conditions, maneuver types, and measurement noise levels. Computational cost analysis and comparative analysis with base-line estimator variants are performed.

The sixth stage involves forming recommendations, including compilation of optimal parameter tables for various object classes, determining solution applicability conditions, developing practical implementation recommendations, and evaluating expected accuracy improvements for various application conditions.

The final seventh stage includes adaptive algorithm implementation, which involves software implementation of the optimized structure, configuration of inter-model interaction mechanisms, implementation of parameter adaptation algorithms, and real-time testing followed by result documentation.

Practical Implementation of the Technique. Measuring object angles is one of the key tasks in air and ground situation monitoring systems [1, 2, 4]. As a practical example, the task of tracking a maneuvering aerial object using only angular measurement information from a stationary direction finder was considered. In this single-sensor configuration, it is impossible to directly reconstruct the full spatial coordinates of the object, making the problem particularly challenging. The initial conditions are characterized by the following parameters: the RMS error of bearing measurement is 1 degree, with a data update interval of 10 s. During model experiments, trajectories were considered where the aerial object moved at a constant velocity of 220 m/s at an altitude of 1 km. Between the 32 and 41 scans of the direction finder, the object performed a steady turn in the horizontal plane at angles of 180, 270, and 360 degrees with normal acceleration $n_y = 1.1$, 1.5, and 2.0, depending on the specific trajectory. As shown in Figure 1, all trajectories are characterized by significantly nonlinear bearing change patterns. These strong nonlinearities in bearing measurements require approximation using high-order polynomials and create additional challenges for filtering algorithms [2, 4].

At the first stage of the study, a direct parameter search was conducted for a non-adaptive Kalman filter [1, 7, 8]. This approach, while conceptually straightforward, proved to be computationally intensive due to the need for exhaustive search across the parameter space. Figure 2 shows the dependence



Figure 1. Trajectories and bearing change patterns for model experiments: trajectories l-3 – with 90°, trajectories 4-6 – with 180°, and trajectories 7-9 – with 270° turns, each set at normal accelerations $n_v = 1.1$, 1.5, and 2.0



Figure 2. Dependence of total bearing filtering error on polynomial order and RMS random maneuver value

of the total bearing filtering error (averaged over all selected object trajectories) on the polynomial order and RMS random maneuver value. Analysis of the results revealed a complex multi-modal nature of the error surface, with several local minima, making the optimization process particularly challenging. Nevertheless, it was found that there exists an optimal combination of these parameters that provides minimal filtering error.

Further optimization of the Kalman filter was conducted using the developed technique. For this purpose, an algorithm based on *the Pattern Search method* was implemented [9]. The algorithm searches for optimal values of two key Kalman filter parameters: polynomial order N_{pol} and random maneuver standard deviation σ_m . The distinctive feature of the implemented algorithm is its adaptive search step and extended set of parameter space exploration directions, including both primary and diagonal directions. The search is performed within the space of permissible values, where the polynomial order varies from 1 to 5, and σ m ranges from 10^{-8} to 10^{-5} . The optimization process starts from an arbitrary point ($N_{pol} = 1$, $\sigma_m = 10^{-8}$) and sequentially improves the solution by minimizing the root mean square error of bearing filtering. To enhance computational efficiency, result caching is implemented, which helps avoiding repeated calculations for previously investigated parameter combinations. As shown in the graphs in Figure 3, the optimization process demonstrates stable convergence. After approximately 30 iterations, optimal parameter values are achieved: $N_{pol} = 2$ and $\sigma_m \approx 3.9 \cdot 10^{-8}$. With these parameters, the RMSE of bearing filtering is minimal at about 0.7 degrees, which is 30 % lower compared to the non-optimized filter.

The effectiveness of the optimized filter is confirmed by the results of filtering real trajectories (Figure 4), where significant improvement in bearing estimation quality is observed, especially in the object





Figure 3. Illustration of the non-adaptive filter optimization procedure

Figure 4. Comparison of non-adaptive filtering results for non-optimized and optimized filters

maneuvering region (from scan 32 to 41), with the optimized filter (magenta line) demonstrating superior tracking performance and better measurement noise suppression compared to the default filter (green line) throughout the entire trajectory.

IMM filter is one of the most effective adaptive filtering algorithms due to its ability to dynamically combine results from multiple motion models [1, 3, 4]. This enables high estimation accuracy both during uniform motion and various object maneuvers. However, tuning IMM filter parameters represents a complex optimization problem due to the large number of interrelated parameters and their nonlinear influence on filtering quality. The IMM filter includes three channels [1, 3, 4, 6, 7]: first- (constant velocity – CV) and second-order (constant acceleration – CA) Kalman filters, and a first-order Singer filter. The following parameters were optimized using genetic algorithm: σ_{CV} – RMS random maneuver for CV filter (from 10^{-6} to 10^{-2}); σ_{CA} – RMS random maneuver for CA filter (from 10^{-6}



Figure 5. Illustration of the adaptive IMM filter optimization procedure



Figure 6. Comparison of optimized filtering algorithm results

164

to 10^{-2}); $\sigma_{\text{Singer}} - \text{RMS}$ random maneuver in Singer model (from 0.1 to 2.0); τ_{m} – maneuver time constant (from 30 to 90 s); p – probability of IMM filter model transitions (from 0.8 to 0.95). The algorithm features adaptive mutation, logarithmic scaling for σ_{CV} and σ_{CA} , elitist strategy, and tournament selection. As shown in Figure 5, the optimization converges after approximately 50 generations, yielding optimal values: $\sigma_{\text{CV}} \approx 2.8 \cdot 10^{-4}$; $\sigma_{\text{CA}} \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$; $\sigma_{\text{Singer}} \approx 1.2$; $\tau_{\text{m}} \approx 45$ s; $p \approx 0.92$. Comparative analysis results (Figure 6) show that the optimized IMM filter provides: 40 % reduc-

tion in root mean square error of bearing estimation compared to the non-adaptive Kalman filter; faster adaptation to object maneuvers; stable operation under various types of maneuvers; shorter transient response time during changes in object motion patterns. The Figure 6 presents nine different trajectory scenarios 1–9, each showing the comparison between measurement data (blue line), IMM filter performance (red line), and CA filter performance (green line, using optimal parameters previously obtained in Figures 3 and 4 for the non-adaptive case). All RMS error values were calculated by averaging results over 5,000 Monte Carlo runs to ensure statistical significance of the comparison. The IMM filter consistently demonstrates lower RMS errors during steady-state periods compared to both raw measurements and the CA filter. During maneuver periods (visible as spikes in the plots around 400 s), the IMM filter shows temporary increase in RMS error but recovers more quickly than the CA filter. The CA filter maintains a relatively stable error level but fails to achieve the same level of accuracy as the IMM filter during both steady-state and maneuvering periods. Trajectories 7–9, which represent the most complex maneuvers (270° turns), show the IMM filter's superior ability to handle challenging scenarios while maintaining stable performance. The measurement noise level (approximately 1 degree RMS) is effectively filtered by both algorithms, with the IMM filter achieving better overall performance, especially during the post-maneuver settling period. The time scale extends to 800–1,000 s, providing sufficient duration to observe both transient and steady-state behavior of the filtering algorithms across various maneuver scenarios.

Conclusion. This paper presents a practical implementation for optimizing tracking estimators of coordinates and motion parameters in air and ground situation monitoring systems. Key research outcomes include development of a multi-stage optimization technique for both non-adaptive and adaptive estimators, implementation of a pattern search optimization algorithm for non-adaptive Kalman filter (achieving $N_{pol} = 2$ and $\sigma_m \approx 3.9 \cdot 10^{-8}$), and development of a specialized genetic algorithm for IMM filter optimization (achieving $\sigma_{CV} \approx 2.8 \cdot 10^{-4}$, $\sigma_{CA} \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$, $\sigma_{Singer} \approx 1.2$, $\tau_m \approx 45$ s, $p \approx 0.92$).

Model experiments with various aircraft trajectories (180°, 270°, and 360° turns with load factors $n_y = 1.1$, 1.5, and 2.0) confirmed the effectiveness of the developed methodology, demonstrating improved motion parameter estimation accuracy, better adaptation to object maneuvers, stable operation under various motion models, and reduced transient response times. Future research directions may include extending the methodology to other types of measurement information and observed object classes.

References

1. Blackman S., Popoli R. Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Boston, Artech House, 1999. 1230 p.

2. Radhika M., Mallick M., Tian X. IMM Filtering Algorithms for a Highly Maneuvering Fighter Aircraft: An Overview. *Algorithms*, 2024, vol. 17, no. 9, pp. 399–415. http://doi.org/10.3390/a17090399

3. Bar-Shalom Y., Rong Li X., Kirubarajan T. *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*. New York, Wiley-Interscience Publ., 2001. 558 p. https://doi.org/10.1002/0471221279

4. Ristic B., Arulampalam S., Gordon N. Beyond the Kalman Filter. Particle Filters for Tracking Applications. Boston, London, Artech House, 2004. 299 p.

5. Han B., Huang H., Lei L., Huang C., Zhang Z. An Improved IMM Algorithm Based on STSRCKF for Maneuvering Target Tracking. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 57795–57804. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2912983

6. Singer R. A. Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets. *IEEE Transactions* on Aerospace and Electronic Systems, 1970, vol. 6, no. 4, pp. 473–483. https://doi.org/10.1109/TAES.1970.310128

7. Li X. R., Jilkov V. P. Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I: Dynamic Models. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 1333–1364. https://doi.org/10.1109/TAES.2003.1261132

8. Grewal M. S., Andrews A. P. Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB. Wiley, 2014. 640 p. https://doi.org/10.1002/9780470377819

9. Yang X. S. Nature-Inspired Optimization Algorithms: Theory, Advances and Applications. 2nd ed. London, Academic Press, 2021. 446 p. https://doi.org/10.1016/C2019-0-02835-0

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

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-166-176 УДК 519.876.5 CC) BY 4.0

Оригинальная статья

М. Н. Петкевич^{*}, В. Ю. Юшкевич

Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии имени И. Н. Александрова, аг. Лесной, 223040, Минский район, Минская область, Республика Беларусь

РАЗРАБОТКА И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ЛЕЧЕНИЯ ECLIPSE

Аннотация. Выполнена автоматизация процесса подготовки к лучевой терапии путем разработки и машинного обучения многокритериальной модели распределения дозы ионизирующего излучения с помощью инструментария искусственного интеллекта, внедренного в модуль RapidPlan компьютерной системы планирования облучения Eclipse v16.1 (Varian Medical Systems). Для машинного обучения модели проведен ретроспективный анализ данных для 40 пациентов с патологиями грудного и поясничного отделов позвоночника. Для каждого пациента создан план распределения дозы излучения методом стереотаксической лучевой терапии с помощью инверсного метода моделирования с дозовым режимом фракционирования 6 Гр по пять фракций. Проведена оценка производительности созданной модели на тестовой выборке из 10 пациентов. Результаты верификации подтверждают пригодность модели для клинического применения в учреждениях здравоохранения онкологического профиля и перспективность ее использования для создания персонализированных планов лечения. Автоматизация процесса предлучевой подготовки позволила сократить временные затраты на компьютерное моделирование трехмерного распределения дозы ионизирующего излучения и повысить качество оказываемой специализированной медицинской помощи методом стереотаксической лучевой терапии.

Ключевые слова: многокритериальная модель, автоматизированное моделирование, трехмерное дозовое распределение, ионизирующее излучение, модуль RapidPlan v16.1, компьютерная система планирования облучения Eclipse v16.1, машинное обучение

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Петкевич Максим Николаевич* – начальник отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии Республиканского научно-практического центра онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова. E-mail: maxpetkevichn@gmail.com; *Юшкевич Виктория Юрьевна* – медицинский физик отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии Республиканского научно-практического центра онкологии и медицинской радиологии и медицинской радиологии и медицинской радиологии и медицинской радиологии имени Виктория (Прьевна – медицинский физик отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии Республиканского научно-практического центра онкологии и медицинской радиологии имени Виктория (Прьевна – медицинской радиологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова. E-mail: yushkevich.ur@gmail.com

Вклад авторов: авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Для цитирования: Петкевич, М. Н. Разработка и машинное обучение многокритериальной модели распределения дозы ионизирующего излучения в системе планирования лечения Eclipse / М. Н. Петкевич, В. Ю. Юшкевич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 2. – С. 166–176. https:// doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-166-176

Поступила в редакцию: 04.03.2025 Доработанный вариант: 05.05.2025 Утверждена к публикации: 12.06.2025 Подписана в печать: 19.06.2025

[©] Петкевич М. Н., Юшкевич В. Ю., 2025

^{*} Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Maksim N. Pietkevich^{*}, Viktoryia Yu. Yushkevich

N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, agro-town Lesnoy, 223040, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus

DEVELOPMENT AND MACHINE LEARNING OF A MULTI-CRITERIA IONIZING RADIATION DOSE DISTRIBUTION MODEL IN THE ECLIPSE TREATMENT PLANNING SYSTEM

Abstract. The automation of the radiotherapy preparation process is demonstrated through the development and machine learning of a multi-criteria ionizing radiation dose distribution model, using artificial intelligence tools embedded in the RapidPlan module of the Eclipse vl6.1 (Varian Medical Systems) treatment planning system. A retrospective data analysis of 40 patients with thoracic and lumbar spine pathologies was performed to train the model. For each patient, a radiation dose distribution model was created using stereotactic radiation therapy with an inverse planning method and a dose fractionation regimen of 6 Gy in 5 fractions. The performance of the developed model was evaluated on a test set of 10 patients. Verification results confirm the model's suitability for clinical application in oncological healthcare facilities and the prospect of using it to create personalized treatment plans. Automation of the pre-radiotherapy preparation process reduced the time spent on computer modeling of the three-dimensional ionizing radiation dose distribution and improved the quality of specialized medical care provided by stereotactic radiation therapy.

Keywords: multi-criteria model, automated modeling, three-dimensional dose distribution, ionizing radiation, RapidPlan v16.1, treatment planning system Eclipse v16.1, machine learning

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

Information about the authors: *Maksim N. Pietkevich* – Head of the Department for Engineering Support of Radiation Therapy at N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus. E-mail: maxpetkevichn@gmail.com; *Viktoryia Yu. Yushkevich* – Medical Physicist of the Department for Engineering Support of Radiation Therapy at N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus. E-mail: yushkevich.ur@gmail.com

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

For citation: Pietkevich M. N., Yushkevich V. Yu. Development and machine learning of a multi-criteria ionizing radiation dose distribution model in the Eclipse treatment planning system. *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. 2, pp. 166–176 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-166-176

Received: 04.03.2025 Modified: 05.05.2025 Approved for publication: 12.06.2025 Signed to the press: 19.06.2025

Введение. Клиническое применение лучевой терапии с модулированной интенсивностью (IMRT, Intensity-Modulated Radiation Therapy) и ротационного облучения с переменными характеристиками излучения (VMAT, Volumetric Modulated Arc Therapy) обосновано компьютерным моделированием оптимального трехмерного распределения дозы излучения. Однако процесс оптимизации трудоемкий, зависит от квалификации медицинского физика и приводит к вариативности характеристик трехмерного распределения дозы излучения, поскольку приходится идти на компромиссы между клиническими целями и сложностями при формализации этих целей для оптимизации.

Ярким примером указанных сложностей является лечение патологий грудного и поясничного отделов позвоночника методом стереотаксической лучевой терапии (СЛТ). Данный метод подразумевает использование современных технологий визуализации и пространственного моделирования распределения дозы излучения, что позволяет эффективно доставлять предписанные дозы излучения к мишени с высокой точностью. СЛТ показала свою результативность при лечении метастатических опухолей позвоночника, уменьшая болевой синдром и рост опухоли, а также при лечении радиорезистентных опухолей (почечно-клеточная карцинома и саркома [1]). Несмотря на эффективность СЛТ, анатомическое расположение новообразований по всей длине спинномозгового канала приводит к индивидуальным непредсказуемым особенностям расположения окружающих нормальных тканей и органов риска, а также конфигурации самих опухолей. Индивидуальные особенности расположения окружающих нормальных тканей и критических органов влияют на дозовые ограничения, что приводит к расхождениям в оценке параметров и характеристик моделей трехмерного распределения дозы излучения в разных отделах позвоночника.

Стереотаксическая лучевая терапия при патологиях отделов позвоночника – неотложный метод специализированной медицинской помощи при новообразованиях с компрессией спинного мозга [2]. Тем не менее компьютерное моделирование трехмерного распределения дозы излучения может занимать несколько часов или даже дней и требует множества итераций с изменением клинических и дозиметрических целей оптимизации и приоритетов для органов риска и планируемого объема облучения (PTV, Planning Target Volume). Временные затраты на создание трехмерной модели распределения дозы излучения также зависят от квалификации медицинского физика, компьютерной системы планирования облучения и параметров клинически приемлемой модели распределения дозы излучения (клинических целей) для каждого конкретного радиологического отделения [3].

Для стандартизации и оптимизации процесса моделирования авторами выбран инструмент RapidPlan – модуль на основе искусственного интеллекта (ИИ) в компьютерной системе планирования облучения Eclipse v.16.1 (Varian Medical Systems), который применяется для разработки и машинного обучения моделей распределения дозы излучения. Модуль RapidPlan использует предварительно загруженные авторами клинически приемлемые планы распределения дозы ионизирующего излучения с целью прогнозирования гистограмм доза-объем (DVH, Dose Volume Histogram) для органов риска и планируемых объемов облучения [4]. Несмотря на успешные результаты применения в Республиканском научно-практическом центре онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова (далее – Центр) модуля RapidPlan при создании многокритериальных моделей для различных новообразований, эффективность данного подхода в сложных случаях, таких как СЛТ опухолей позвоночника, требует дальнейших исследований.

Таким образом, *цель данного исследования* – повышение эффективности компьютерного моделирования трехмерного распределения дозы ионизирующего излучения для случаев СЛТ грудного и поясничного отделов позвоночника при оптимизации процесса предлучевой подготовки с помощью разработанной многокритериальной модели SRT_vertebrae (от англ. Stereotactic Radiation Therapy (SRT) – стереотаксическая радиотерапия, лат. vertebrae – позвонки).

В основе автоматизированного моделирования лежит применение искусственного интеллекта для обучения многокритериальных моделей на больших массивах данных, извлеченных из клинически приемлемых планов распределения дозы ионизирующего излучения, и дальнейшего использования этих моделей, созданных с помощью ИИ, для прогнозирования, принятия решений и автоматизации рутинных задач в процессе предлучевой подготовки [5]. Основное отличие автоматизированного моделирования от моделирования трехмерного распределения дозы ионизирующего излучения заключается в степени участия медицинского физика в процессе разработки плана распределения дозы излучения и в используемых инструментах оптимизации. Моделирование трехмерного распределения дозы ионизирующего излучения является неотъемлемой частью процесса предлучевой подготовки для каждого клинического случая.

Материалы и методы. Для исследования авторами сформирована библиотека планов из 50 пациентов с патологиями грудного и поясничного отделов позвоночника, которые ранее получали специализированную медицинскую помощь методом стереотаксической лучевой терапии. Выборка пациентов осуществлялась случайным образом, за исключением пациентов с патологиями поясничного отдела ниже L2-L3 позвонков по причине окончания спинного мозга в области L2. Дозиметрические и геометрические характеристики моделей трехмерного распределения дозы излучения для каждого пациента импортированы в компьютерную систему планирования облучения Eclipse v16.1 для разработки и машинного обучения многокритериальной модели SRT vertebrae.

Клинические цели представляют собой комплексные и индивидуализированные цели, направленные на максимизацию эффективности лечения и минимизацию побочных эффектов. Они требуют тщательного планирования, оптимизации и проверки, а также постоянного мониторинга и адаптации в процессе лечения. При оптимизации трехмерного распределения дозы излучения клинические цели определяют наилучшее дозовое распределение в PTV, учитывая минимальное повреждение окружающих здоровых тканей. Достижение клинических целей зачастую осложняется их многогранностью и внутренней противоречивостью, что обуславливает необходимость принятия компромиссных решений, адаптированных к индивидуальным особенностям каждого пациента. В табл. 1 представлены клинические цели оптимизации для органов риска при пятифракционной СЛТ.

Несмотря на вариативность набора структур для каждого конкретного случая, в базовый набор структур включены PTV, спинной мозг, сердце, аорта, легкие и пищевод, а также пла-

нируемый объем риска (PRV, Planning Risk Volume) для спинного мозга. Планируемый объем риска для органа – виртуальная структура, которая создается вокруг критически важного органа (OAR, organ at risk) при планировании лучевой терапии для учета неопределенностей и вариаций в процессе лечения, таких как движение пациента, неточности в позиционировании и анатомические изменения. PRV для спинного мозга определялся как виртуальное расширение спинного мозга на 1 мм. Критически важный орган (OAR) – это здоровый орган или ткани, расположенные вблизи PTV или входящие в него, которые могут быть повреждены в результате воздействия ионизирующего излучения.

Таблица 1. Дозовые нагрузки для критически важных органов при пятифракционной стереотаксической лучевой терапии позвоночника [6]

Анатомическая структура	Объем	Целевая доза излучения, Гр Target radiation dose, Gy		
Anatomical structure	Volume	допустимая permissible	строгая strict	
PTV	95 %	-	30	
Спинной мозг и PRV для спинного мозга Spinal cord and spinal cord PRV	0,035 см ³	25,3	28	
	0,1 см ³	23	30	
	0,35 см ³	-	22	
	1 см ³	14,5	_	
	1,2 см ³	-	14,5	
Сердце Heart	0,035 см ³	_	38	
	0,5 см ³	27	29	
	15 см ³	_	32	
Аорта Aorta	0,035 см ³	-	53	
	0,03 см ³	-	60	
	0,5 см ³	_	53	
	10 см ³	-	47	
Легкие (правое и левое) Lungs (right and left)	10 %	20	_	
	15 %	-	20	
	1000 см ³	-	13,5	
для мужчин / for men	1500 см ³		12.5	
для женщин / for women	950 см ³		12,5	
Пищевод	0,035 см ³	35	38	
Esophagus	0,03 см ³	-	35	
	0,5 см ³	32	34	
	5 см ³	19,5	32,5	

Table 1. Dose constraints for organs at risk in five-fraction stereotactic radiotherapy of the spine [6]

Для компьютерного моделирования трехмерного распределения дозы излучения и оценки дозовых нагрузок на OAR и PTV в случаях наложения PTV на спинномозговой канал авторами создана структура PTV сгор путем вычитания объема спинномозгового канала из PTV.

При создании библиотеки планов для обучения модели распределения дозы излучения медицинский физик применял стандартные методы моделирования: техника четырех компланарных дуг с индивидуальной настройкой угла коллиматора для каждого клинического случая и критерии оценки дозовых нагрузок для критически важных органов и планируемого объема облучения (см. табл. 1). Планы распределения дозы оптимизировались в компьютерной системе планирования облучения Eclipse v16.1 с помощью алгоритма Photon Optimizer v16.1, с использованием клинических целей оптимизации, представленных в табл. 1, и дозовое распределение рассчитывалось с помощью алгоритма Acuros XB v16.1. Дозовый режим фракционирования – 6 Гр по пять фракций на PTV при ограничении дозы излучения на критические органы риска. Для всех моделей применялся автоматический контроль дозы излучения в нормальных (здоровых) тканях организма пациента (NTO, normal tissue objectives). Для повышения точности оптимизации, обусловленной наличием небольших оцениваемых структур (спинной мозг и PRV для спинного мозга), разрешение расчетной сетки установлено на 1,25 мм. После создания библиотеки планов трехмерного распределения дозы излучения, оптимизированных с применением стандартных методов моделирования, случайным образом была сформирована выборка из 40 планов распределения дозы для добавления в многокритериальную модель SRT_vertebrae. Оставшиеся 10 планов распределения дозы излучения сформировали независимую выборку для проверки многокритериальной модели SRT_vertebrae. При добавлении плана распределения дозы излучения в SRT_vertebrae извлекаются следующие данные: геометрические характеристики пучков облучения, набор структур, трехмерное дозовое распределение, гистограммы DVH и гистограммы расстояния до цели – расстояния между мишенью и точками, получающими дозу излучения (DTH, dose-to-target histogram), которые преобразуются в параметры многокритериальной модели [4].

Машинное обучение многокритериальной модели происходит после завершения процесса извлечения данных. Для этого обучения необходимо как минимум 20 планов распределения дозы излучения, также она должна присутствовать в наборе структур не менее чем в 20 планах для включения в модель конкретной структуры. При создании и машинном обучении модели модуль RapidPlan на основе извлеченных данных формирует ряд статистических графиков, параметров и журнал обучения, чтобы определить работоспособность модели. Журнал обучения включает такие статистические данные, как коэффициент детерминации и хи-квадрат (χ^2), которые показывают работоспособность первоначальной модели. Также можно оценить гистограммы DVH для каждой структуры на одном графике, что позволяет легко обнаружить выбросы, графики зависимости регрессии и графики зависимости остатков.

При обнаружении выбросов необходимо определить, является ли данный случай геометрическим или дозиметрическим выбросом [7, 8]. В зависимости от типа выявленного выброса для улучшения работы многокритериальной модели можно добавить дополнительные схожие случаи и актуализировать данный случай для достижения необходимых геометрических или дозиметрических характеристик либо удалить план распределения дозы излучения из библиотеки планов [8].

После корректировки выбросов для проверки приемлемости модели SRT_vertebrae авторами проведена верификация на независимой статистической выборке из 10 пациентов. Для каждого из контрольных случаев создан план распределения дозы излучения с помощью модели SRT_vertebrae, чтобы оценить гистограммы DVH и достижение клинических целей оптимизации. На рис. 1 отображено графическое представление распределения дозы излучения для критически важных органов: спинного мозга (кривая синего цвета) и PRV для спинного мозга (кривая зеленого цвета). Также визуализированы сгенерированные многокритериальной моделью SRT_vertebrae диапазоны гистограмм DVH (кривые, выполненные пунктирной линией), основанные на информации о предписанной дозе излучения и анатомии пациента, которые предсказывают наиболее вероятное положение кривых указанных гистограмм для OAR. Для планируемого объема облучения диапазон гистограмм DVH не генерируется.



Рис. 1. Гистограммы доза-объем для планов распределения дозы излучения с помощью автоматизированного моделирования для опухоли грудного отдела позвоночника (*a*) и доза-объем для планов распределения дозы излучения с помощью автоматизированного моделирования для опухоли поясничного отдела позвоночника (*b*)
Fig. 1. Dose-volume histograms for radiation dose distribution plans using automated modeling for a thoracic spine tumor (*a*) and for radiation dose distribution plans using automated modeling for a lumbar spine tumor (*b*)

При оптимизации трехмерного распределения дозы излучения модуль RapidPlan выделяет приоритет целевой структуре, что создает определенные сложности при наложении органа риска на PTV. Чтобы избежать переобучения многокритериальной модели, использовалась структура PTV_crop. Модель SRT_vertebrae запоминает не только общие закономерности в данных, но и случайные колебания и специфические особенности обучающего набора. В результате SRT_vertebrae идеально работает на обучающих данных, однако показывает плохие результаты на новых данных, так как она запомнила детали, которые не являются репрезентативными для генеральной совокупности [9, 10].

Результаты и их обсуждение. Являющиеся независимой статистической выборкой все 10 планов трехмерного распределения дозы излучения (см. рис. 2, 3), оптимизированные с применением стандартных методов моделирования и с помощью многокритериальной модели SRT_vertebrae, соответствуют приоритетным дозовым ограничениям, указанным в табл. 1. Планы распределения дозы излучения не нормализованы, чтобы не ухудшить результат оптимизации. Нормализация плана – это процесс масштабирования дозового распределения, гарантирующий обеспечение требуемых условий облучения по отношению к PTV, например, 95 % целевого объема получает предписанную дозу.

Визуальное сравнение результатов моделирования, сгенерированных моделью SRT_vertebrae и оптимизированных медицинским физиком с помощью стандартных методов моделирования, представлено на рис. 2, 3. На рис. 4, 5 показано сравнение результатов моделирования планов распределения дозы излучения с помощью гистограмм DVH.







Рис. 3. План распределения дозы излучения для опухоли поясничного отдела позвоночника, оптимизированный с использованием стандартных методов моделирования (слева) и с помощью автоматизированного моделирования (справа) Fig. 3. Radiation dose distribution model for a lumbar spine tumor, optimized using standard modeling techniques (left) and automated modeling (right)



Рис. 4. Сравнение результатов моделирования планов распределения дозы излучения с помощью гистограмм доза-объем для опухоли грудного отдела позвоночника:
 1 – использование стандартных методов моделирования, 2 – использование автоматизированного моделирования Fig. 4. Comparison of radiation dose distribution plan modeling results using dose-volume histograms for a thoracic spine tumor: 1 – using standard modeling techniques, 2 – using automated modeling





Fig. 5. Comparison of radiation dose distribution plan modeling results using dose-volume histograms for a lumbar spine tumor; a – optimized with automated modeling, b – optimized with standard modeling techniques

Результаты оценки для спинного мозга и PRV для спинного мозга путем количественного сравнения параметров D0.035см³, D0.1см³, D0.35см³, D1см³, D1.2см³, а также для планируемого объема облучения для планов распределения дозы излучения, оптимизированных с использованием стандартных методов моделирования и сгенерированных с помощью модели SRT vertebrae [6], представлены в табл. 2.

Применение модели SRT_vertebrae привело к улучшению результата при выгораживании OAR по сравнению с моделями распределения дозы излучения, оптимизированными стандартными методами моделирования, без существенных изменений в покрытии PTV D95%. Клинические цели для оптимальной модели распределения дозы излучения включают дозу в 95 % (D95%) объема PTV_crop, получающего предписанную дозу (30 Гр) или больше (D95% – D100%), а максимальная доза излучения в 1 % (D1%) объема PTV сгор должна соответствовать ≤ 160 %

от предписанной дозы излучения (D1% – D160%). Все планы распределения дозы излучения, сгенерированные многокритериальной моделью SRT_vertebrae, соответствуют клинической цели D95% – D100%. При этом только 8 из 10 планов, оптимизированных медицинским физиком с помощью стандартных методов моделирования, соответствовали клинической цели D95% – D100% предписанной дозы излучения. Все планы распределения дозы излучения, оптимизированные медицинским физиком с помощью стандартных методов моделирования дозы излучения. Все планы распределения дозы излучения, оптимизированные медицинским физиком с помощью стандартных методов моделирования, соответствовали клинической цели D1% – D160%.

Таблица 2. Сравнение дозовых нагрузок на OAR и PTV в планах распределения дозы излучения, рассчитанных с использованием стандартных методов моделирования и планах распределения дозы излучения, оптимизированных моделью SRT_vertebrae (значения – среднее ± стандартное отклонение) Table 2. Comparison of dose exposure to OARs and PTV in radiation dose distribution models: standard planning and automated planning (mean ± standard deviation)

Спинной мозг и PRV для спинного мозга Spinal cord and spinal cord PRV									
Объем критического органа, см 3 Volume of the organ at risk, cm 3	0,035	0,1	0,35		1,0	1,2			
Доза излучения, Гр Radiation dose, Gy	28,0	30,0	22,0		14,5	14,5			
Доза излучения для планов, рассчитанных с использованием стандартных методов моделирования, Гр Radiation dose for plans calculated using standard modeling methods, Gy	27,55 ± 1,22	29,79 ± 1,01	21,46 ± 1,69		15,81 ± 2,41	17,96 ± 3,12			
Доза излучения для планов, рассчитанных с использованием автоматизированного моделирования, Гр Radiation dose for plans calculated using automated modeling, Gy	24,78 ± 0,95	21,03 ± 0,89	17,32 ± 0,45		10,46 ± 0,43	12,37 ± 0,67			
Планируемый объем облучения Planned Target Volume (PTV)									
PTV, %	95–100			1–160					
Доза излучения для планов, рассчитанных с использованием стандартных методов моделирования, % Radiation dose for plans calculated using standard modeling methods, %	95 ± 1,85			140 ± 5,22					
Доза излучения для планов, рассчитанных с использованием автоматизированного моделирования, % Radiation dose for plans calculated using automated modeling, %	98 ± 0.78			135 ± 4,45					

При оптимизации планов трехмерного распределения дозы излучения стандартными методами моделирования медицинскому физику требовалось от 5 до 8 итераций для создания клинически приемлемой модели. Временные затраты на компьютерное моделирование составили от 6 до 18 ч. В то время как генерация плана распределения дозы излучения многокритериальной моделью SRT vertebrae без вмешательства медицинского физика продолжалась 40–60 мин.

После завершения процесса машинного обучения многокритериальной модели SRT_vertebrae модуль Model Configuration [4], входящий в состав компьютерной системы планирования облучения Eclipse v.16.1, позволяет анализировать работоспособность созданной модели: этап оценки рассматривается как часть процесса конфигурации, где выявляются и обрабатываются возможные выбросы. Высокое значение коэффициента детерминации (\mathbb{R}^2) не гарантирует получение эффективной многокритериальной модели, поэтому следует учитывать значение данного параметра, чтобы избежать переобучения модели. Согласно [4, 10] оптимальное значение коэффициента детерминации яногокритериальной модели SRT_vertebrae трехмерного распределения дозы излучения численное значение \mathbb{R}^2 равно 0,65, то есть 65 % изменчивости зависимой переменной объясняется независимыми переменными

в модели. Это позволяет ей адаптироваться к различным анатомическим особенностям пациентов. Оптимальное значение χ^2 лежит в пределах 1,1–1,2 [4, 10]. Для созданной модели SRT_vertebrae численное значение данного критерия равно 1,14.

Модуль Model Configuration также позволяет визуально оценить графики зависимости регрессии и зависимости выбросов (рис. 6, 7) на основе идентифицированных критических органов (спинной мозг и PRV для спинного мозга).

На рис. 6 визуализирован доверительный интервал, показывающий диапазон значений, в котором, вероятно, находится истинное значение зависимой переменной для заданного значения независимой переменной. На графике зависимости регрессии можно визуализировать выбросы, то есть точки данных, которые значительно отклоняются от линии регрессии, оказывающие влияние на регрессионную модель. Чем меньше разброс данных вокруг линии регрессии, тем лучше модель соответствует данным [11].

График зависимости остатков – это инструмент для диагностики регрессионных моделей, помогающий выявить проблемы, такие как нелинейность, гетероскедастичность, выбросы и зависимость остатков, что позволяет улучшить многокритериальную модель и получить более надежные результаты. На рис. 7 остатки распределены случайным образом, что указывает на отсутствие систематической ошибки в данных.

Таким образом, результаты верификации показывают адекватность созданной модели SRT_ vertebrae и подтверждают ее пригодность для клинического применения в радиологических отделениях учреждений здравоохранения онкологического профиля.

В исследовании продемонстрирована эффективность автоматизированного моделирования на примере многокритериальной модели SRT_vertebrae, созданной с помощью модуля RapidPlan на основе ИИ, для автоматизации процесса предлучевой подготовки для опухолей грудного и поясничного отделов позвоночника в отделениях Центра. Многокритериальная модель SRT_vertebrae оптимизирует планы распределения дозы излучения, эквивалентные или улучшенные по срав-



Рис. 6. График зависимости регрессии, где по оси X – независимая переменная: общий объем облучения критической структуры, по оси Y – зависимая переменная: наиболее вероятная гистограмма доза-объем для критической структуры, прогнозируемая моделью SRT_vertebrae на основе геометрии критической структуры



Fig. 6. Regression plot: X-axis – total irradiated volume (critical structure), Y-axis – model-predicted DVH (critical structure geometry)

Рис. 7. График зависимости остатков, где по оси X – независимая переменная: предсказанные значения компонент гистограммы доза-объем для критической структуры, по оси Y – зависимая переменная: гистограммы доза-объем, сформированные основываясь на предсказанных значениях

Fig. 7. Residual plot: X-axis - predicted DVH components (critical structure), Y-axis - DVHs formed from predictions

нению с планами, созданными медицинским физиком стандартными методами моделирования, существенно сокращая временные затраты на создание плана распределения дозы излучения.

Преимуществами многокритериальной модели SRT_vertebrae являются прежде всего оптимизация и автоматизация процесса моделирования, что приводит к сокращению временных затрат на создание клинически приемлемого плана распределения дозы, а также потенциальное улучшение характеристик планов распределения дозы излучения и возможность стандартизировать качество и клинические цели оптимизации. Успешное внедрение в клиническую практику SRT_vertebrae привело к повышению эффективности и улучшению параметров компьютерного моделирования трехмерного распределения дозы излучения методом СЛТ для грудного и поясничного отделов позвоночника. Несмотря на временные затраты, необходимые для разработки, машинного обучения и валидации многокритериальной модели SRT_vertebrae, ее использование позволяет перераспределить временные затраты и сосредоточиться на выполнении приоритетных рабочих задач.

Для создания клинически приемлемого плана распределения дозы излучения с минимальным участием или без участия медицинского физика существуют альтернативные методы оптимизации: автоматизированная, приоритетная и многокритериальная оптимизация. Однако уникальным преимуществом рассматриваемой модели является возможность воспроизвести качество планов распределения дозы излучения, достигнутое ранее.

Модель SRT_vertebrae продемонстрировала соответствие клиническим протоколам и стандартам, принятым в Центре. Она не содержит идентифицирующей информации о пациентах, что позволяет внедрить ее в клиническую практику других медицинских учреждений при условии проведения тщательной валидации и адаптации, обеспечивающей соответствие клинической картине медицинского учреждения. На процесс внедрения многокритериальной модели влияют следующие факторы: сопоставимость протоколов лечения, наличие необходимого оборудования, квалификация сотрудников, использующих принципы и методы визуализации целевых объемов и критических органов, а также методы моделирования трехмерного распределения дозы излучения.

Заключение. Настоящее исследование показало эффективность применения созданной многокритериальной модели SRT_vertebrae на основе модуля RapidPlan для усовершенствования процесса оптимизации предлучевой подготовки в радиологических отделениях Центра. В частности, созданная модель SRT_vertebrae на основе ИИ позволила значительно сократить временные затраты на моделирование трехмерного распределения дозы излучения для СЛТ грудного и поясничного отделов позвоночника (от 6–18 ч до 40–60 мин). Это привело к существенному повышению эффективности работы и высвобождению ресурсов для решения других задач.

Анализ параметров полученных планов распределения дозы излучения показал, что планы распределения дозы излучения, сгенерированные многокритериальной моделью SRT_vertebrae, не уступают по своим дозиметрическим характеристикам планам распределения дозы излучения, разработанным с помощью стандартных методов моделирования (техника четырех компланарных дуг с индивидуальной настройкой угла коллиматора для каждого клинического случая и критерии оценки дозовых нагрузок для критически важных органов и планируемого объема облучения (см. табл. 1)). Применение модуля RapidPlan позволило оптимизировать планы распределения дозы излучения, улучшенные по сравнению с планами, созданными медицинским физиком стандартными методами моделирования. Более того, по мере накопления опыта использования модуля RapidPlan и дальнейшего совершенствования предиктивных моделей можно ожидать дальнейшего повышения параметров моделирования трехмерного распределения дозы излучения. Результаты верификации созданной модели SRT_vertebrae доказывают ее адекватность и пригодность для клинического применения в учреждениях здравоохранения онкологического прифила ($\mathbb{R}^2 = 0,65, \chi^2 = 1,14$).

В перспективе усовершенствованные многокритериальные модели могут быть использованы для создания индивидуализированных моделей распределения дозы излучения, адаптированных к уникальным анатомическим особенностям каждого пациента, что позволит минимизировать риск побочных эффектов, связанных с недостаточным облучением целевого объема и превышением допустимых дозовых ограничений для органов риска.

Список использованных источников

1. The efficacy of external beam radiotherapy and stereotactic body radiotherapy for painful spinal metastases from renal cell carcinoma / G. K. Hunter, E. H. Balagamwala, S. A. Koyfman [et al.] // Practical Radiation Oncology. – 2012. – Vol. 2, № 4. – P. 95–100. https://doi.org/10.1016/j.prro.2012.01.005

2. Stereotactic body radiotherapy for metastatic spinal sarcoma: a detailed patterns-of-failure study / J. E. Leeman, M. Bilsky, I. Laufer [et al.] // Journal of Neurosurgery. – 2016. – Vol. 25, № 1. – P. 52–58. https://doi.org/10.3171/2015.11.SPINE151059

3. Reducing inter- and intra-planner variability in radiotherapy plan output with a commercial knowledge-based planning solution / A. Scaggion, M. Fusella, A. Roggio [et al.] // European Journal of Medical Physics. – 2018. – Vol. 53. – P. 86–93. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.08.016

4. Eclipse Photon and Electron Algorithms Reference Guide. – Varian Medical Systems, Inc., 2014. – Ch. 10: DVH Estimation Algorithm for RapidPlan. – P. 219–229. – URL: https://jpneylon.github.io/ABR/PDFs/Add_052418/ EclipseAlgorithms13.6 RefGuide.pdf (date of access: 01.02.2025).

5. Искусственный интеллект в медицинской физике: функции, обязанности, образование и подготовка медицинских физиков клинической квалификации / IAEA (Междунар. агентство по атом. энергии). – Вена, 2025. – 43 с. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-83_R_web.pdf (дата обращения: 01.02.2025).

6. Normal tissue constraints for SRS/SBRT. – URL: https://www.iba-dosimetry.com/fileadmin/user_upload/products/02_radiation therapy/myqa srs/iba dose contraints poster rev2 0522.pdf (date of access: 01.02.2025).

7. Machine learning and modeling: data, validation, communication challenges / I. El Naqa, D. Ruan, G. Valdes [et al.] // Medical Physics. – 2018. – Vol. 45, Iss. 10. – P. 834–840. https://doi.org/10.1002/mp.12811

8. Effect of Dosimetric Outliers on the Performance of a Commercial Knowledge-Based Planning Solution / A. R. Delaney, J. P. Tol, M. Dahele [et al.] // International Journal of Radiation Oncology Biology Physics. – 2016. – Vol. 94, Iss. 3. – P. 469–477. https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2015.11.011

9. Development and evaluation of a clinical model for lung cancer patients using stereotactic body radiotherapy (SBRT) within a knowledge-based algorithm for treatment planning / K. C. Snyder, J. Kim, A. Reding [et al.] // Journal of Applied Clinical Medical Physics. – 2016. – Vol. 17, Iss. 6. – P. 263–275. https://doi.org/10.1120/jacmp.v17i6.6429

10. An analysis of knowledge-based planning for stereotactic body radiation therapy of the spine / J. J. Foy, R. Marsh, R. K. Ten Haken [et al.] // Practical Radiation Oncology. – 2017. – Vol. 7, Iss. 5. – P. E355–E360. https://doi.org/10.1016/j.prro.2017.02.007

11. Can knowledgebased DVH predictions be used for automated, individualized quality assurance of radiotherapy treatment plans? / J. P. Tol, M. Dahele, A. R. Delaney [et al.] // Radiation Oncology. – 2015. – Vol. 10, № 1. – Art. ID 234. https://doi.org/10.1186/s13014-015-0542-1

References

1. Hunter G. K., Balagamwala E. H., Koyfman S. A., Bledsoe T., Sheplan L. J., Reddy C. A., S. T. Chao [et al.]. The efficacy of external beam radiotherapy and stereotactic body radiotherapy for painful spinal metastases from renal cell carcinoma. *Practical Radiation Oncology*, 2012, vol. 2, no. 4, pp. 95–100. https://doi.org/10.1016/j.prro.2012.01.005

2. Leeman J. E., Bilsky M., Laufer I., Folkert M. R., Taunk N. K., Osborne J. R., Arevalo-Perez J. [et al.]. Stereotactic body radiotherapy for metastatic spinal sarcoma: a detailed patterns-of-failure study. *Journal of Neurosurgery*, 2016, vol. 25, no. 1, pp. 52–58. https://doi.org/10.3171/2015.11.SPINE151059

3. Scaggion A., Fusella M., Roggio A., Bacco S., Pivato N., Rossato M. A., Peña L. M. A. [et al.]. Reducing interand intra-planner variability in radiotherapy plan output with a commercial knowledge-based planning solution. *European Journal of Medical Physics*, 2018, vol. 53, pp. 86–93. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.08.016

4. Chapter 10. DVH Estimation Algorithm for RapidPlan. *Eclipse Photon and Electron Algorithms Reference Guide*. Varian Medical Systems, Inc., 2014, pp. 219–229. Available at: https://jpneylon.github.io/ABR/PDFs/Add_052418/ EclipseAlgorithms13.6_RefGuide.pdf (accessed 1 February 2025).

5. IAEA. Artificial Intelligence in Medical Physics. Roles, Responsibilities, Education and Training of Clinically Qualified Medical Physicists. Vienna, 2023. 46 p. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-83 R web.pdf (accessed 1 February 2025).

6. Normal tissue constraints for SRS/SBRT. Available at: https://www.iba-dosimetry.com/fileadmin/user_upload/ products/02_radiation_therapy/myqa_srs/iba_dose_contraints_poster_rev2_0522.pdf (accessed 1 February 2025).

7. El Naqa I., Ruan D., Valdes G., Dekker A., McNutt T., Ge Y., Wu J. Q. [et al.]. Machine learning and modeling: data, validation, communication challenges. *Medical Physics*, 2018, vol. 45, iss. 10, pp. 834–840. https://doi.org/10.1002/mp.12811

8. Delaney A. R., Tol J. P., Dahele M., Cuijpers J., Slotman B. J., Verbakel W. F.A.R. Effect of Dosimetric Outliers on the Performance of a Commercial Knowledge-Based Planning Solution. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 2016, vol. 94, iss. 3, pp. 469–477. https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2015.11.011

9. Snyder K. C., Kim J., Reding A., Fraser C., Gordon J., Ajlouni M., Movsas B. [et al.]. Development and evaluation of a clinical model for lung cancer patients using stereotactic body radiotherapy (SBRT) within a knowledge-based algorithm for treatment planning. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 2016, vol. 17, iss. 6, pp. 263–275. https://doi.org/10.1120/jacmp.v17i6.6429

10. Foy J. J., Marsh R., Ten Haken R. K., Kelly C. Younge, Schipper M., Sun Yi., Owen D. [et al.]. An analysis of knowledgebased planning for stereotactic body radiation therapy of the spine. *Practical Radiation Oncology*, 2017, vol. 7, iss. 5, pp. E355–E360. https://doi.org/10.1016/j.prro.2017.02.007

11. Tol J. P., Dahele M., Delaney A. R., Slotman B. J., Verbakel W. F. A. R. Can knowledgebased DVH predictions be used for automated, individualized quality assurance of radiotherapy treatment plans? *Radiation Oncology*, 2015, vol. 10, no. 1, art. ID 234. https://doi.org/10.1186/s13014-015-0542-1