

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

МИНСК. БЕЛОРУССКАЯ НАУКА. 2018. ТОМ 62. № 6

Выходит шесть номеров в год

Журнал основан в июле 1957 года

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 387 от 18.05.2009.

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

Главный редактор

Владимир Григорьевич Гусаков

Председатель Президиума Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Редакционная коллегия

С. А. Чижик

первый заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
(заместитель главного редактора)

С. Я. Килин

заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
(заместитель главного редактора)

А. В. Кильчевский

главный научный секретарь Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
(заместитель главного редактора)

Т. П. Петрович

(ведущий редактор журнала)

И. М. Богдевич – Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

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

И. Д. Волоотовский – Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь

С. В. Гапоненко – Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований, Минск, Беларусь

А. Е. Дайнеко – Институт мясо-молочной промышленности Научно-практического центра
Национальной академии наук Беларуси по продовольствию, Минск, Беларусь

О. А. Ивашкевич – Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Н. А. Изобов – Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Н. С. Казак – Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

А. А. Коваленя – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Ф. Ф. Комаров – Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко

Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

И. В. Когляров – Комиссия по опросам общественного мнения при Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь

В. А. Лабунов – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

А. П. Ласковнев – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

- О. Н. Левко** – Институт истории Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
А. И. Лесникович – Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
В. Ф. Логинов – Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
А. А. Махнач – Научно-производственный центр по геологии, Минск, Беларусь
А. А. Михалевич – Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
М. Е. Никифоров – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
В. А. Орлович – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
О. Г. Пенязков – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
Ю. М. Плескачевский – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь
Н. С. Сердюченко – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
А. Ф. Смянович – Республиканский научно-практический центр неврологии и нейрохирургии, Минск, Беларусь
Л. М. Томильчик – Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
С. А. Усанов – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
Л. В. Хотылева – Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
В. А. Хрипач – Институт биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
И. П. Шейко – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству, Жодино, Беларусь

Р е д а к ц и о н н ы й с о в е т

- Ж. И. Алферов** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
К. П. Валуцкас – Национальный институт рака, Вильнюс, Литва
С. Воденичаров – Болгарская академия наук, София, Болгария
И. М. Дунин – Всероссийский научно-исследовательский институт племенного дела Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, Лесные Поляны, Россия
Н. Желев – Медицинский биотехнологический центр молекулярной и клеточной технологии Абергейского университета, Данди, Шотландия
Н. Н. Казанский – Институт лингвистических исследований Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
А. Карклинш – Институт почвоведения и растениеводства Латвийского сельскохозяйственного университета в Елгаве, Елгава, Латвия
С. П. Карпов – Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия
М. Ларссон – Университетский центр Алба Нова Стокгольмского университета, Стокгольм, Швеция
А. Г. Наумовец – Национальная академия наук Украины, Киев, Украина
И. Д. Рашаль – Институт биологии Латвийского университета, Рига, Латвия
В. А. Садовничий – Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия
А. Г. Тарарико – Национальная академия аграрных наук Украины, Киев, Украина
Л. Трипольская – Литовский центр аграрных и лесных наук, Вильнюс, Литва
Тьяу Ван Минь – Вьетнамская академия наук и технологий, Ханой, Вьетнам
А. Цайлингер – Институт квантовой оптики и квантовой информатики Австрийской академии наук, Вена, Австрия
В. Ф. Чехун – Институт экспериментальной патологии, онкологии и радиологии имени Р. Е. Кавецкого Национальной академии наук Украины, Киев, Украина
Чжао Лян – Хэнаньская академия наук, Хэнань, Китай

Адрес редакции:

*ул. Академическая, 1, к. 119, 220072, Минск, Республика Беларусь.
Тел.: +375 17 284-19-19; e-mail: doklady_nanb@mail.ru
doklady.belnauka.by*

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ. 2018. Т. 62. № 6

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор Т. П. Петрович
Компьютерная верстка Н. И. Кашиба

Сдано в набор 03.12.2018. Выпуск в свет 27.12.2018. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 148 экз. Заказ 288.

Цена: индивидуальная подписка – 10,66 руб.; ведомственная подписка – 25,67 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, 220141, г. Минск.

© «Издательский дом «Беларуская навука».
Доклады НАН Беларуси, 2018

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

MINSK. BELARUSKAYA NAVUKA. 2018. Vol. 62. No. 6

Published bimonthly

The journal has been published since July, 1957

Founder – National Academy of Sciences of Belarus

The journal is registered on May 18, 2009 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus
in the State Registry of Mass Media, reg. no. 387.

*The journal included in the List of Journal 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

Vladimir Grigorievich Gusakov

Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Editorial Board

Sergey A. Chizhik

First Vice Chairman of the Presidium of the National Academy, Minsk, Belarus
of Sciences of Belarus (*Associate Editor-in-Chief*)

Sergey Ya. Kilin

Vice Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
(*Associate Editor-in-Chief*)

Aleksandr V. Kilchevsky

Chief Scientific Secretary of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus (*Associate Editor-in-Chief*)

Tatiana P. Petrovich

(*Lead editor*)

Iosiph M. Bogdevich – Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus

Alexey Ye. Daineko – Institute for Meat and Dairy Industry of the Scientific
and Practical Center for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Sergey V. Gaponenko – Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, Minsk, Belarus

Oleg A. Ivashkevich – Belarusian State University, Minsk, Belarus

Nikolai A. Izobov – Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Nikolai S. Kazak – B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Lubov V. Khotyleva – Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Vladimir A. Khripach – Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Fadei F. Komarov – A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Belarus

Igor V. Kotlyarov – Commission for opinion polls of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Aleksandr A. Kovalenya – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Vladimir A. Labunov – Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Aleksandr P. Laskovnev – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Anatoly I. Lesnikovich – Belarusian State University, Minsk, Belarus

Olga N. Levko – Institute of History of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Vladimir F. Loginov – Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Anatoly A. Makhnach – Scientific and Practical Center on Geology, Minsk, Belarus
Aleksandr A. Mikhalevich – Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Mikhail Ye. Nikiforov – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Valentine A. Orlovich – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Oleg G. Penyazkov – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Yury M. Pleskachevsky – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus
Nikolai S. Serduchenko – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Ivan P. Sheiko – Scientific and Practical Center for Animal Breeding, Zhodino, Belarus
Arnold F. Smeyanovich – Republican Scientific and Practical Center of Neurology and Neurosurgery, Minsk, Belarus
Lev M. Tomilchik – B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Sergey A. Usanov – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Petr A. Vitiaz – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Igor D. Volotovskii – Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Editorial Council

Zhores Alferov – Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia
Chau Van Minh – Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam
Vasily F. Chekhun – Kavetsky Institute of Experimental Pathology, Oncology and Radiology of the National Academy of Sciences, Kiev, Ukraine
Ivan M. Dunin – All-Russian Scientific Research Institute of Breeding of the Ministry of Agriculture Economy of the Russian Federation, Lesnye Poliany, Russia
Aldis Karklinsh – Institute of Soil Science and Plant of the Latvia University of Agriculture in Elgava, Jelgava, Latvia
Sergey P. Karpov – Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Nikolai N. Kazansky – Institute for Linguistic Studies of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia
Mats Larsson – Alba Nova University Center of the University of Stockholm, Stockholm, Sweden
Anton G. Naumovets – National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine
Isaak D. Rashal – Institute of Biology of the University of Latvia, Riga, Latvia
Viktor A. Sadovnichiy – Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
Aleksandr G. Tarariko – National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine
Ludmila Tripolskaya – Lithuanian Centre of Agricultural and Forest Sciences, Vilnius, Lithuania
Konstantinas P. Valuckas – National Cancer Institute, Vilnius, Lithuania
Stefan Vodenicharov – Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
Anton Zeilinger – Institute for Quantum Optics and Quantum Information of the Austrian Academy of Sciences, Vienna, Austria
Zhao Liang – Henan Academy of Sciences, Henan, China
Nikolai Zhelev – Medical Biotechnology Center of Molecular and Cellular Technology of the Abertay University, Dundee, Scotland

Address of the Editorial Office:

*1, Akademicheskaya Str., room 119, 220072, Minsk, Republic of Belarus.
Phone: +375 17 284-19-19; e-mail: doklady_nanb@mail.ru
doklady.belnauka.by*

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS. 2018. Vol. 62. No. 6

Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor T. P. Petrovich
Computer Imposition N. I. Kashuba

Sent for press 03.12.2018. Output 27.12.2018. Format 60×84¹/₈. Offset paper.
Digital press. Printed sheets 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 148 copies. Order 288.
Price: individual subscription – 10,66 BYN, departmental subscription – 25,67 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 of August 2, 2013. License for press no. 02330/455 dated of December 30, 2013.
40, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus.

© RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka".
Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

- Корзюк В. И., Козловская И. С., Соколович В. Ю.** Классическое решение в четверти плоскости смешанной задачи для волнового уравнения 647

ИНФОРМАТИКА

- Чернявский А. Ф., Коляда А. А., Протасеня С. Ю.** Применение нейросетевой вычислительной технологии для расчета интервально-индексной характеристики минимально избыточного модулярного кода 652

ФИЗИКА

- Кисель В. В., Плетюхов В. А., Овсюк Е. М., Войнова Я. А., Веко О. В., Редьков В. М.** Фермион с тремя массовыми параметрами: взаимодействие с внешними полями 661
- Комаров С. О., Горбацевич А. К., Тарасенко А. Н.** Красное смещение излучения точечного источника, движущегося в поле вращающейся черной дыры 668
- Клубович В. В., Кулак М. М., Хина Б. Б.** Влияние мощного ультразвука на процессы горения и фазовый состав тугоплавких соединений титана при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе 674

ХИМИЯ

- Генарова Т. Н., Грушевский В. В., Кривошеев П. Н., Пенязьков О. Г., Буяков И. Ф., Дмитренко Ю. М., Жданок С. А., Чернухо А. П.** Состав отходящих газов при каталитическом синтезе углеродных наноматериалов при пиролитическом разложении пропан-бутановой смеси 685
- Бильдюкевич А. В., Глевицкая Т. А., Шустиков А. А.** Влияние «жесткости» осадителя в формовочном растворе на структуру и свойства полиэфирсульфоновых мембран 694
- Гайдаш А. А., Кулак А. И., Дроздовский К. В., Казбанов В. В., Крутько В. К., Мусская О. Н., Линник Ю. И., Скроцкая К. В.** Структурные и физико-химические преобразования перикардиальных имплантатов, модифицированных эпоксидной смолой 703

БИОЛОГИЯ

- Орловская О. А., Вакула С. И., Хотылева Л. В., Кильчевский А. В.** Качество зерна у линий мягкой пшеницы *T. aestivum* с интродукцией генетического материала *T. dicoccoides* и *T. dicoccum* 712

МЕДИЦИНА

- Семак Г. Р., Людчик А. В., Жерко И. Ю.** Новый подход к лечению хронических дистрофических заболеваний роговицы 719
- Волотовский П. А., Тапальский Д. В., Ситник А. А., Козлова А. И., Герасименко М. А.** Антибактериальное покрытие имплантатов на основе полиметилметакрилатного костного цемента *in vitro* и *in vivo* 725
- Даниленко О. А., Макаревич Е. Р., Сердюченко Н. С., Малашко А. В.** Реконструкция поврежденных ротаторно-бицепитального комплекса при оперативном лечении переломов проксимального отдела плеча 732

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Романов С. Л., Червань А. Н., Коробова Е. М., Яблонская Т. С.** Особенности проявления йододефицита на территории Республики Беларусь 739
- Лысенко С. А., Логинов В. Ф., Ошечков С. Л.** Механизмы стабилизации современного климата 750

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Жукова Ю. В., Терех А. М., Руденко А. И.** Конвективный теплообмен и аэродинамическое сопротивление двух расположенных бок о бок труб в узком канале при различных числах Рейнольдса (на англ. яз.) 756
- Костромицкий С. М., Шумский А. П., Давыденко И. Н.** Структуры и математические модели автокомпенсаторов мешающих излучений градиентного типа 763

CONTENTS*MATHEMATICS*

- Korzyuk V. I., Kozlovskaya I. S., Sokolovich V. Yu.** Classical solution of the mixed problem in the quarter of the plane for the wave equation..... 647

INFORMATICS

- Chernyavskiy A. F., Kolyada A. A., Protasenia S. Yu.** Application of the neural network computing technology for calculating the interval-index characteristics of a minimally redundant modular code..... 652

PHYSICS

- Kisel V. V., Pletyukhov V. A., Ovsyuk E. M., Voynova Ya. A., Veko O. V., Red'kov V. M.** Fermion with three mass parameters: interaction with external fields 661
- Komarov S. O., Gorbatsievich A. K., Tarasenko A. N.** Redshift of radiation of a point-like source moving in the external Kerr field 668
- Klubovich V. V., Kulak M. M., Khina B. B.** Effect of powerful ultrasound on the combustion processes and phase composition of refractory compounds of titanium at the self-propagating high-temperature synthesis 674

CHEMISTRY

- Henarava T. M., Hrusheuski U. U., Krivosheev P. M., Penyazkov O. G., Buiakov I. F., Dmitrenko Yu. M., Zhdanok S. A., Chernuho A. P.** Waste gases in the catalytic synthesis of carbon nanomaterials by pyrolytic decomposition of a propane-butane mixture 685
- Bildyukevich A. V., Hliavitskaya T. A., Shustikov A. A.** Influence of different non-solvent additives to the casting solution on the structure and properties of PES membranes 694
- Gaidash A. A., Kulak A. I., Drozdovski K. V., Kazbanov V. V., Krut'ko V. K., Musskaya O. N., Linnik Yu. I., Skrotskaya K. V.** Structural and physico-chemical transformations of modified with epoxy resin pericardia implants 703

BIOLOGY

- Orlovskaya O. A., Vakula S. I., Khotyleva L. V., Kilchevsky A. V.** Grain quality in bread wheat lines *T. aestivum* with introgression of genetic material *T. dicoccoides* and *T. dicoccum*..... 712

MEDICINE

- Semak G. R., Lyudchik A. V., Zherko I. Yu.** New approach to treating chronic dystrophic cornea diseases 719
- Volotovskiy P. A., Tapalski D. V., Sitnik A. A., Kozlova A. I., Gerasimenko M. A.** Polymethylmethacrylate-based antibacterial coating *in vitro* and *in vivo* 725
- Danilenko O. A., Makarevich E. R., Serdyuchenko N. S., Malashko A. V.** Reconstruction of damages of the rotary-bicipitale complex at surgical treatment of fractures of the proximal shoulder 732

EARTH SCIENCES

- Romanov S. L., Chervan A. N., Korobova E. M., Yablonskaya T. S.** Features of iodine deficiency in the territory of the Republic of Belarus..... 739
- Lysenko S. A., Loginov V. F., Oshepkov S. L.** Mechanisms of stabilization of modern climate 750

TECHNICAL SCIENCES

- Zhukova Yu. V., Terekh A. M., Rudenko A. I.** Convective heat transfer and drag of two side-by-side tubes in the narrow channel at different Reynolds number..... 756
- Kostromitski S. M., Shumski A. P., Davydzhenka I. N.** Structure and mathematical model of gradient jammer cancellers 763

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

МАТЕМАТИКА
MATHEMATICS

УДК 517.955
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-647-651>

Поступило в редакцию 29.08.2018
Received 29.08.2018

Академик В. И. Корзюк¹, И. С. Козловская¹, В. Ю. Соколович²

¹*Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

²*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

**КЛАССИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ В ЧЕТВЕРТИ ПЛОСКОСТИ СМЕШАННОЙ ЗАДАЧИ
ДЛЯ ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ**

Аннотация. В данной работе в аналитическом виде представлено классическое решение со смешанными граничными условиями в четверти плоскости для волнового уравнения. Граница области состоит из двух перпендикулярных полупрямых. На одной из них задаются условия Коши. Вторая полупрямая разделена на две части: конечный отрезок и оставшаяся часть в виде полупрямой. На отрезке задается условие Дирихле, на полупрямой – условие Неймана. В классе дважды непрерывно дифференцируемых функций в четверти плоскости определяется классическое решение рассматриваемой задачи. Для построения этого решения выписывается частное решение исходного волнового уравнения. Для заданных функций задачи выписываются условия согласования, которые являются необходимыми и достаточными, чтобы решение задачи было классическим и единственным.

Ключевые слова: волновое уравнение, условия Коши, условие Дирихле, условие Неймана, смешанная задача, смешанные условия, условия согласования, классическое решение

Для цитирования. Корзюк, В. И. Классическое решение в четверти плоскости смешанной задачи для волнового уравнения / В. И. Корзюк, И. С. Козловская, В. Ю. Соколович // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 647–651. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-647-651>

Academician Viktor I. Korzyuk¹, Inessa S. Kozlovskaya¹, Vladimir Yu. Sokolovich²

¹*Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*

**CLASSICAL SOLUTION OF THE MIXED PROBLEM IN THE QUARTER
OF THE PLANE FOR THE WAVE EQUATION**

Abstract. This article presents the classical solution with mixed boundary conditions in the quarter of the plane for the wave equation in the analytical form. The boundary of the region consists of two perpendicular half-straight lines. On one of them, Cauchy's boundary conditions are assigned. The second half-straight line is divided into two parts. Dirichlet's condition is assigned on the straight line and Neumann's conditions – on the half-straight line. The classical solution of the considered problem is defined in the class of double continuous differentiable functions in the quarter of the plane. To build this solution, the partial solution of the initial wave equation is written. For the assigned functions of the problem, the matching conditions are written, which are necessary and enough so that the solution of the problem would be classical and unique.

Keywords: wave equation, Cauchy's condition, Dirichlet's condition, Neumann's condition, mixed problem, mixed conditions, matching conditions, classical solution

For citation: Korzyuk V. I., Kozlovskaya I. S., Sokolovich V. Yu. Classical solution of the mixed problem in the quarter of the plane for the wave equation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 647–651 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-647-651>

Введение. В [1; 2] и другой литературе по уравнениям математической физики и дифференциальным уравнениям с частными производными для представления классического решения задачи Коши в случае волнового уравнения использована формула Даламбера (решение однородного уравнения) и частное решение неоднородного уравнения, построенное методом Дюамеля.

В [2] при определении классического решения для волнового уравнения в четверти плоскости частное решение построено также методом Дюамеля. Но здесь следует отметить, что заданная функция правой части неоднородного уравнения по второму независимому переменному с полупрямой непрерывным образом продолжена на все множество действительных чисел. Однако частное решение можно построить без продолжения правой части уравнения, заданной в четверти плоскости. Указанная его конструкция предлагается в данном сообщении.

Постановка задачи. В замыкании $\bar{Q} = [0, \infty) \times [0, \infty)$ двух независимых переменных $\mathbf{x} = (x_0, x_1)$ рассматривается одномерное волновое уравнение

$$(\partial_{x_0}^2 - a^2 \partial_{x_1}^2)u(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \bar{Q}, \quad (1)$$

где a^2 – положительное число из \mathbb{R} ; $\partial_{x_j}^2$ – частные производные по x_j второго порядка, $j = 0, 1$. На части границы ∂Q области Q к (1) присоединяются условия Коши

$$u(0, x_1) = \varphi(x_1), \quad \partial_{x_0} u(0, x_1) = \psi(x_1), \quad x_1 \in [0, \infty), \quad (2)$$

на другой полупрямой – граничные условия

$$u(x_0, 0) = \mu^{(1)}(x_0), \quad x_0 \in [0, \tau], \quad (3)$$

$$\partial_{x_0} u(x_0, 0) = \mu^{(2)}(x_0), \quad x_0 \in (\tau, \infty), \quad (4)$$

где $\tau \in \mathbb{R}$ и $0 < \tau < +\infty$.

Задача. Определить в аналитическом виде классическое решение уравнения (1) u из класса дважды непрерывно дифференцируемых функций $C^2(\bar{Q})$, удовлетворяющее условиям (2), (3), (4).

Дополнительные ограничения на заданные функции $f, \varphi, \psi, \mu^{(j)}$ ($j = 1, 2$) в виде требований гладкости и условий согласования будут сформулированы в процессе изучения решения задачи (1)–(4).

Частное решение уравнения (1). Общее решение уравнения (1), например, из класса $C^2(\bar{Q})$ представляет собой сумму

$$u(\mathbf{x}) = u^{(0)}(\mathbf{x}) + v_p(\mathbf{x}),$$

где $u^{(0)}$ – общее решение из $C^2(\bar{Q})$ однородного уравнения (1) и частного решения $v_p \in C^2(\bar{Q})$ уравнения (1). Общее решение $u^{(0)}$ однородного уравнения (1) представимо [1] в виде

$$u^{(0)}(\mathbf{x}) = g^{(1)}(x_1 - ax_0) + g^{(2)}(x_1 + ax_0),$$

где $g^{(j)}$ – произвольные функции из классов $C^2(D(g^{(j)}))$, $j = 1, 2$, $D(g^{(j)})$ – области определения функций $g^{(j)}$ для любых $\mathbf{x} \in \bar{Q}$.

В аналитическом виде определим частное решение $v_p \in C^2(\bar{Q})$. Частное решение определяется через функцию f . Формула его зависит и от области Q . В [1] для четверти плоскости решение определяется методом Дюамеля, где f по второму аргументу продолжается на все множество действительных чисел \mathbb{R} . Здесь v_p определим без продолжения функции f с областью определения $D(f) = \bar{Q}$.

Область Q характеристикой $\{\mathbf{x} | x_1 = ax_0\}$ разделим на две подобласти $Q^{(j)} = \{\mathbf{x} | (-1)^j(ax_0 - x_1) > 0\}$, $j = 1, 2$. В замыкании $\bar{Q}^{(j)}$ каждой из подобластей $Q^{(j)}$ рассмотрим функции

$$v_p^{(j)}(\mathbf{x}) = f^{(1,j)}(x_1 - ax_0) + f^{(2)}(x_1 + ax_0) - \frac{1}{4a^2} \int_0^{x_1 - ax_0} dy \int_{(-1)^j(ax_0 - x_1)}^{x_1 + ax_0} f\left(\frac{z-y}{2a}, \frac{z+y}{2}\right) dz, \quad \mathbf{x} \in \bar{Q}^{(j)}, \quad (5)$$

где $f^{(1,j)} \in C^2(\mathbb{R})$, $f^{(2)} \in C^2(D(f^{(2)}))$, $a > 0$ (для определенности). Если $f \in C^1(\bar{Q})$, то из представлений (5) следует, что функции $v_p^{(j)} \in C^2(\bar{Q}^{(j)})$ и каждая из них удовлетворяют уравнению (1) на множестве $\bar{Q}^{(j)}$, $j = 1, 2$.

Определим функцию частного решения v_p на всем замыкании \overline{Q} области Q формулой

$$v_p(\mathbf{x}) = v_p^{(j)}(\mathbf{x}), \quad x \in \overline{Q^{(j)}}, \quad j = 1, 2. \tag{6}$$

Чтобы функция v_p принадлежала множеству $C^2(\overline{Q})$, кроме условия $f \in C^1(\overline{Q})$ необходимо совпадение на характеристике $\gamma = \{\mathbf{x} \mid x_1 = ax_0\}$ значений $v_p^{(j)}(\mathbf{x})$ функций $v_p^{(j)}$ и их производных первого и второго порядков, т. е.

$$\partial_{x_0}^k \partial_{x_1}^p v_p^{(1)}(\mathbf{x}) = \partial_{x_0}^k \partial_{x_1}^p v_p^{(2)}(\mathbf{x}), \quad x \in \gamma, \quad 0 \leq k + p \leq 2, \tag{7}$$

где k, p – целые неотрицательные числа.

Заметим, что функция $\mathcal{F}^{(2)}(x) = f^{(2)}(x_1 + ax_0)$ в силу своего определения из класса $C^2(\overline{Q})$. Поэтому равенство (7) будет выполняться для $k = p = 0$, если

$$f^{(1,1)}(0) = f^{(1,2)}(0). \tag{8}$$

Вычисляя первые и вторые производные функций $v^{(j)}$ и рассматривая их на характеристике γ можно убедиться, что равенства (7) для $k + p = 1$ выполняются тогда и только тогда, когда

$$df^{(1,1)}(0) = df^{(1,2)}(0), \tag{9}$$

а для $k + p = 2$ – тогда и только тогда, когда

$$d^2 f^{(1,2)}(0) - d^2 f^{(1,1)}(0) = \frac{1}{a^2} f(0, 0). \tag{10}$$

За счет функций $f^{(1,1)}$ и $f^{(2)}$ можно определить дополнительные удобные для использования условия на v_p . Пусть

$$\begin{aligned} v_p(0, x_1) &= 0 = f^{(1,1)}(x_1) + f^{(2)}(x_1), \\ \partial_{x_0} v_p(0, x_1) &= 0 = -adf^{(1,1)}(x_1) + adf^{(2)}(x_1), \quad x_1 \in [0, \infty). \end{aligned} \tag{11}$$

Отсюда и уравнения (1) следует условие и для второй производной

$$\partial_{x_0}^2 v_p(0, x_1) = f(0, x_1), \quad x_1 \in [0, \infty). \tag{12}$$

Полученные результаты сформулируем в виде теоремы.

Т е о р е м а 1. Если для функций $f \in C^1(\overline{Q})$, $f^{(1,j)} \in C^2(\mathbb{R})$, $f^{(2)} \in C^2([0, \infty))$ выполнены условия (8)–(10), то функция v_p определяется формулами (6) и (5), принадлежит классу $C^2(\overline{Q})$, является решением уравнения (1) и удовлетворяет условиям (11) и (12).

Решение задачи (1)–(4). Область Q характеристиками $\gamma = \{\mathbf{x} \in \overline{Q} \mid x_1 = ax_0\}$ и $\Gamma = \{\mathbf{x} \in \overline{Q} \mid ax_0 - ax_1 = a\tau\}$ разобьем на три подобласти $Q^{(1)} = \{\mathbf{x} \in Q \mid x_1 - ax_0 > 0\}$, $Q^{(2)} = \{\mathbf{x} \in Q \mid 0 < ax_0 - x_1 < a\tau\}$, $Q^{(3)} = \{\mathbf{x} \in Q \mid ax_0 - x_1 > a\tau\}$.

Как известно, общее решение в областях $Q^{(j)}$, $j = 1, 2, 3$, уравнения (1) из класса $C^2(\overline{Q^{(j)}})$ представимо в виде

$$u^{(j)}(x) = g^{(1,j)}(x_1 - ax_0) + g^{(2)}(x_1 + ax_0) + v_p(x), \quad x \in \overline{Q^{(j)}}, \tag{13}$$

где $\overline{Q^{(j)}}$ – замыкание области $Q^{(j)}$; $g^{(1,j)}$ – произвольные функции из класса $C^2(\mathbb{R})$; $g^{(2)}$ – произвольная функция из $C^2([0, \infty))$; v_p – частное решение уравнения (1) из класса $C^2(\overline{Q})$. Следовательно, общее решение u из класса $C^2(\overline{Q})$ уравнения (1) определяется соотношениями

$$u(\mathbf{x}) = u^{(j)}(\mathbf{x}) = g^{(1,j)}(x_1 - ax_0) + g^{(2)}(x_1 + ax_0) + v_p(\mathbf{x}), \quad x \in \overline{Q^{(j)}}, \tag{14}$$

где $g^{(1,j)}$ удовлетворяют условиям непрерывности

$$d^p g^{(1,2)}(0) = d^p g^{(1,1)}(0), \tag{15}$$

$$d^p g^{(1,3)}(-a\tau) = d^p g^{(1,2)}(-a\tau), \quad (16)$$

d^p – оператор обыкновенной производной порядка $p = 0, 1, 2$. Из общего решения (14) выбираем то, которое удовлетворяет условиям (2)–(4), т. е. представление (14) подставляем в эти условия, чтобы определить соответствующим образом значения функций $g^{(1,j)}$ и $g^{(2)}$, $j = 1, 2, 3$.

Удовлетворяя условиям Коши (2), в силу условий (11), получим значения функции $u^{(1)}$, а именно

$$u^{(1)}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}[\varphi(x_1 - ax_0) + \varphi(x_1 + ax_0)] + \frac{1}{2a} \int_{x_1 - ax_0}^{x_1 + ax_0} \psi(\xi) d\xi + v_p(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \overline{Q^{(1)}}. \quad (17)$$

Аналогично, удовлетворяя условию (3), получим решение на $\overline{Q^{(2)}}$ задачи (1)–(4)

$$u^{(2)}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}[\varphi(ax_0 - x_1) - \varphi(x_1 + ax_0)] + \frac{1}{2a} \int_{ax_0 - x_1}^{x_1 + ax_0} \psi(\xi) d\xi - v_p\left(\frac{ax_0 - x_1}{a}, 0\right) + v_p(\mathbf{x}) + \mu^{(1)}\left(\frac{ax_0 - x_1}{a}\right), \quad \mathbf{x} \in \overline{Q^{(2)}}. \quad (18)$$

Удовлетворяем условиям (15) значения функций $g^{(1,1)}$ и $g^{(1,2)}$, полученные при выводе формул (17) и (18),

$$g^{(1,1)}(z) = \frac{1}{2}\varphi(z) - \frac{1}{2a} \int_0^z \psi(\xi) d\xi - C, \quad z \in [0, \infty),$$

$$g^{(1,2)}(z) = \mu^{(1)}\left(-\frac{z}{a}\right) - \frac{1}{2}\varphi(-z) - \frac{1}{2a} \int_0^{-z} \psi(\xi) d\xi - v_p\left(-\frac{z}{a}, 0\right) - C, \quad z \in (-\infty, 0],$$

где C – произвольная из \mathbb{R} постоянная. В результате получим условия согласования на заданные функции задачи (1)–(4) в начале координат ($x_0 = x_1 = 0$)

$$\varphi(0) = \mu^{(1)}(0), \quad \psi(0) = d\mu^{(1)}(0), \quad d^2\mu^{(1)}(0) - a^2 d^2\varphi(0) - f(0, 0) = 0. \quad (19)$$

Теперь на $\overline{Q^{(3)}}$ рассматриваем значения $u^{(3)}(\mathbf{x})$ функции $u^{(3)}$ согласно представлению (13). Удовлетворяя условию (4), получим

$$g^{(1,3)}(z) = \frac{1}{2}\varphi(-z) + \frac{1}{2a} \int_0^{-z} \psi(\xi) d\xi + \int_{-a\tau}^z \mu^{(2)}\left(-\frac{\xi}{a}\right) d\xi - \int_{-a\tau}^z \partial_{x_1} v_p\left(-\frac{\xi}{a}, 0\right) d\xi + C + C_1, \quad z \in (-\infty, -a\tau], \quad (20)$$

где C_1 – произвольная константа, которая появилась в результате интегрирования после подстановки $u^{(3)}(\mathbf{x})$ в условие (4); C – произвольная константа, которая входит в определение функции $g^{(2)}$ из условий Коши, а именно

$$g^{(2)}(z) = \frac{1}{2}\varphi(z) + \frac{1}{2a} \int_0^z \psi(\xi) d\xi + C, \quad z \in [a\tau, \infty). \quad (21)$$

Из формулы (13) в силу (20) и (21) в области $Q^{(3)}$ имеем решение

$$u^{(3)}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}[\varphi(ax_0 - x_1) + \varphi(x_1 + ax_0)] + \frac{1}{2a} \int_{ax_0 - x_1}^{x_1 + ax_0} \psi(\xi) d\xi + \int_{-a\tau}^{x_1 - ax_0} \mu^{(2)}\left(-\frac{\xi}{a}\right) d\xi - \int_{-a\tau}^{x_1 - ax_0} \partial_{x_1} v_p\left(-\frac{\xi}{a}, 0\right) d\xi + C + C_1, \quad \mathbf{x} \in \overline{Q^{(3)}}. \quad (22)$$

Подставляя соотношения (20) и (21) в условия согласования (16), получим

$$C + C_1 = \mu^{(1)}(\tau) - \varphi(a\tau) - \frac{1}{a} \int_0^{a\tau} \psi(\xi) d\xi - v_p(\tau, 0)$$

и вместо (16) в случае $p = 1, 2$ условия согласования вида

$$\mu^{(2)}(\tau) + \frac{1}{a} d\mu^{(1)}(\tau) - d\varphi(a\tau) - \frac{1}{a} \psi(a\tau) - \frac{1}{a} \partial_{x_0} v_p(\tau, 0) - \partial_{x_1} v_p(\tau, 0) = 0, \quad (23)$$

$$d\mu^{(2)}(\tau) + \frac{1}{a} d^2\mu^{(1)}(\tau) - ad^2\varphi(a\tau) - d\psi(a\tau) - \frac{1}{a} \partial_{x_0}^2 v_p(\tau, 0) - \partial_{x_0} \partial_{x_1} v_p(\tau, 0) = 0.$$

Заметим, что для того чтобы решение $u(\mathbf{x}) = u^{(j)}(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} \in \overline{Q^{(j)}}$, $j = 1, 2, 3$, задачи (1)–(4) было из класса $C^2(\overline{Q})$, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия (15) и (16), а следовательно – и условия (19) и (23).

Из предыдущих рассуждений следует утверждение.

Т е о р е м а 2. Пусть $\varphi \in C^2([0, \infty))$, $\psi \in C^1([0, \infty))$, $f \in C^1(\overline{Q})$, $\mu^{(1)} \in C^2([0, \infty))$, $\mu^{(2)} \in C^1([0, \infty))$. Существует единственное классическое решение задачи (1)–(4) из класса $C^2(\overline{Q})$ и представимо в аналитическом виде (5), (14), (17), (18), (22) тогда и только тогда, когда выполняются условия согласования (19) и (23), и условия (8)–(10).

З а к л ю ч е н и е. Рассмотрена граничная задача со смешанными условиями Коши, Дирихле и Неймана для одномерного волнового уравнения в четверти плоскости. В аналитическом виде построено классическое решение из класса дважды непрерывно дифференцируемых функций. Для представления решения задачи без продолжения заданной функции неоднородного уравнения в классе C^2 функций построено частное решение. Доказаны необходимые и достаточные условия на заданные функции, при выполнении которых при определенных требованиях гладкости этих функций существует в аналитическом виде классическое решение рассматриваемой задачи.

Без существенных изменений представленная в работе схема переносится на аналогичные задачи с другими смешанными условиями для волнового и других обобщающих уравнений.

Список использованных источников

1. Корзюк, В. И. Классические решения задач для гиперболических уравнений: Курс лекций в 10 ч. / В. И. Корзюк, И. С. Козловская. – Минск, 2017. – Ч. 1. – 48 с.
2. Корзюк, В. И. Классические решения задач для гиперболических уравнений: Курс лекций в 10 ч. / В. И. Корзюк, И. С. Козловская. – Минск, 2017. – Ч. 2. – 52 с.

References

1. Korzyuk V. I., Kozlovskaya I. S. *Classical problem solutions for hyperbolic equations: A course of lectures in 10 parts*. Minsk, 2017, part 1. 48 p. (in Russian).
2. Korzyuk V. I., Kozlovskaya I. S. *Classical problem solutions for hyperbolic equations: A course of lectures in 10 parts*. Minsk, 2017, part 2. 52 p. (in Russian).

Информация об авторах

Корзюк Виктор Иванович – академик, д-р физ.-мат. наук, профессор. Институт математики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 11, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: korzyuk@bsu.by.

Козловская Инесса Станиславовна – канд. физ.-мат. наук, доцент. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kozlovskaja@bsu.by.

Соколович Владимир Юрьевич – студент. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vovasokoll@gmail.com.

Information about the authors

Korzyuk Viktor Ivanovich – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor. Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus (11, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: korzyuk@bsu.by.

Kozlovskaya Inessa Stanislavovna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kozlovskaja@bsu.by.

Sokolovich Vladimir Yurevich – Student. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vovasokoll@gmail.com.

ИНФОРМАТИКА
INFORMATICSУДК 004.9, 004.94, 004.56
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-652-660>Поступило в редакцию 25.04.2018
Received 25.04.2018**Академик А. Ф. Чернявский, А. А. Коляда, С. Ю. Протасеня***Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь***ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ РАСЧЕТА ИНТЕРВАЛЬНО-ИНДЕКСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
МИНИМАЛЬНО ИЗБЫТОЧНОГО МОДУЛЯРНОГО КОДА**

Аннотация. Сообщение посвящено проблеме создания высокоскоростных нейронных сетей (НС) для расчета интервально-индексных характеристик минимально избыточного модулярного кода. Функциональную базу предлагаемого решения составляет расширенный класс НС конечного кольца, осуществляющих позиционно-модулярные кодовые преобразования масштабируемых чисел с применением модифицированной редукционной технологии. Разработанная НС для вычисления интервально-индексных характеристик имеет однородную параллельную структуру, проста в реализации и требует близких к теоретической нижней оценке временных затрат порядка $(3\lceil \log_2 b \rceil + 2\lceil \log_2 k \rceil + 6)t_{\text{сл}}$, где b и k – соответственно средняя разрядность и количество модулей; $t_{\text{сл}}$ – длительность двухместной операции сложения целых чисел. Отказ от нормировки цифр модулярного кода приводит к сокращению необходимого набора НС конечного кольца на $(k - 1)$ компонент. Вместе с тем ненормированная конфигурация минимально избыточного модулярного кодирования требует в среднем k -кратного увеличения модуля интервального индекса (по отношению к остальным основаниям модулярной системы счисления), что ведет к адекватному повышению аппаратных затрат по данному модулю. Кроме того, переход от нормированного к ненормированному кодированию снижает уровень однородности структуры НС для расчета интервально-индексных характеристик. Исследована возможность снижения структурной сложности предложенной НС за счет использования ненормированных интервально-индексных характеристик.

Ключевые слова: нейронная сеть, нейронная сеть конечного кольца, синаптические веса, модулярная система счисления, интервально-индексные характеристики, редукционный метод

Для цитирования. Чернявский, А. Ф. Применение нейросетевой вычислительной технологии для расчета интервально-индексной характеристики минимально избыточного модулярного кода / А. Ф. Чернявский, А. А. Коляда, С. Ю. Протасеня // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 652–660. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-652-660>

Academician Alexander F. Chernyavskiy, Andrey A. Kolyada, Stella Yu. Protasenia*Institute of Applied Physical Problems named after A. N. Sevchenko of the Belarusian State University,
Minsk, Republic of Belarus***APPLICATION OF THE NEURAL NETWORK COMPUTING TECHNOLOGY FOR CALCULATING
THE INTERVAL-INDEX CHARACTERISTICS OF A MINIMALLY REDUNDANT MODULAR CODE**

Abstract. The article is devoted to the problem of creation of high-speed neural networks (NN) for calculation of interval-index characteristics of a minimally redundant modular code. The functional base of the proposed solution is an advanced class of neural networks of a final ring. These neural networks perform position-modular code transformations of scalable numbers using a modified reduction technology. A developed neural network has a uniform parallel structure, easy to implement and requires the time expenditures of the order $(3\lceil \log_2 b \rceil + 2\lceil \log_2 k \rceil + 6)t_{\text{sum}}$ close to the lower theoretical estimate. Here b and k is the average bit capacity and the number of modules respectively; t_{sum} is the duration of the two-place operation of adding integers. The refusal from a normalization of the numbers of the modular code leads to a reduction of the

required set of NN of the finite ring on the $(k - 1)$ component. At the same time, the abnormal configuration of minimally redundant modular coding requires an average k -fold increase in the interval index module (relative to the rest of the bases of the modular number system). It leads to an adequate increase in hardware expenses on this module. Besides, the transition from normalized to unregulated coding reduces the level of homogeneity of the structure of the NN for calculating interval-index characteristics. The possibility of reducing the structural complexity of the proposed NN by using abnormal interval-index characteristics is investigated.

Keywords: neural network, neural network of finite ring, synaptic weights, modular number system, interval-index characteristics, reduction method

For citation: Chernyavskiy A. F., Kolyada A. A., Protasenia S. Yu. Application of the neural network computing technology for calculating the interval-index characteristics of a minimally redundant modular code. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 652–660 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-652-660>

Введение. В современном процессе развития высокопроизводительных вычислительных технологий, и в частности технологий быстрых вычислений на диапазонах больших чисел (ДБЧ), особая роль отводится модулярным системам счисления (МСС) [1–8], которые обладают параллельной кодовой структурой. Отмеченное свойство МСС позволяет использовать их как эффективный инструмент для решения задачи перевода трудоемких вычислений из ДБЧ в компьютерные диапазоны целых чисел (ЦЧ) стандартной разрядности. Важнейшим фактором, способствующим неуклонному повышению уровня востребованности модулярных вычислительных структур (МВС), является их идеальная приспособленность к нейросетевым реализациям [1; 3]. Разработка нейросетевых МВС на основе оптимально согласованных свойств параллелизма искусственных нейронных сетей (НС) и модулярной арифметики (МА) – арифметики МСС составляет активно развиваемое в настоящее время новое перспективное направление в области параллельных вычислений.

Ключевую роль в технологии синтеза МВС нейросетевого типа выполняют НС, осуществляющие преобразования колец вычетов по модулям МСС. Такие НС принято называть нейронными сетями конечного кольца (НСКК) [1; 3; 9–11]. Центральное место в классе НСКК занимают сети, которые реализуют позиционно-модулярные преобразования ЦЧ в остатки по модулям базиса МСС [9–13]. Как структурно, так и на операционном уровне НСКК должны быть максимально согласованы с естественным кодовым параллелизмом МА. В полной мере данному условию удовлетворяет редукционный метод рекурсивного понижения разрядности элементов последовательности вычетов, получаемой в процессе приведения исходных ЦЧ к остаткам по модулям рабочего базиса [1]. Традиционно в качестве операционной основы НСКК используется преобразование ЦЧ из двоичной системы счисления в модулярную. Принимая, однако, во внимание то обстоятельство, что при построении различных конфигураций МА ключевую роль выполняют преобразования масштабируемых вычетов в остатки по модулям МСС, в развиваемом направлении исследований в качестве нейросетевой реализационной базы применяется расширенный класс НСКК, которые осуществляют преобразования масштабируемых ЦЧ. Фундаментальные преимущества МА наиболее полно удается реализовать в рамках так называемого минимально избыточного кодирования [1; 14], ассоциированного с интервально-модулярной формой чисел и связанными с ней интервально-индексными характеристиками кода. В соответствии с этим первостепенную важность в разработках перспективных МВС нейросетевого типа представляет проблема вычисления с применением рассматриваемого нового подхода интервально-индексных характеристик минимально избыточного модулярного кода. Решению данной задачи и посвящено настоящее сообщение.

Позиционные формы и интегральные характеристики модулярных чисел. Введем обозначения:

\mathbf{Z} – множество ЦЧ;

$\lfloor a \rfloor$ и $\lceil a \rceil$ – наибольшее и наименьшее ЦЧ соответственно не большее и не меньшее вещественной величины a ;

$\mathbf{Z}_m = \{0, 1, \dots, m - 1\}$, $\mathbf{Z}_m^- = \{-\lfloor m / 2 \rfloor, -\lfloor m / 2 \rfloor + 1, \dots, \lceil m / 2 \rceil - 1\}$ – множества наименьших неотрицательных и абсолютно наименьших вычетов по натуральному модулю m ;

$\lfloor a \rfloor_m$ и $\lceil a \rceil_m^-$ – элементы множеств \mathbf{Z}_m и \mathbf{Z}_m^- , сравнимые с a (в общем случае рациональным числом) по модулю m ;

$\mathbf{M} = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ – набор модулей базовой МСС (модулярный базис; k – мощность базиса);
 $X = (|X|_{m_1}, |X|_{m_2}, \dots, |X|_{m_k})$ – представление ЦЧ X в МСС с базисом \mathbf{M} .

Пусть в МСС с базисом \mathbf{M} задано ЦЧ $X = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$ ($\chi_i = |X|_{m_i}$ ($i = \overline{1, k}$)).

Согласно Китайской теореме об остатках [15] для X выполняется сравнение

$$X \equiv \sum_{i=1}^{k-1} M_{i,k-1} \chi_{i,k-1} \pmod{M_{k-1}}, \quad (1)$$

где $M_{i,k-1} = M_{k-1} / m_i$; $M_{k-1} = \prod_{j=1}^{k-1} m_j$; $\chi_{i,k-1} = |\mu_{i,k-1} \chi_i|_{m_i}$; $\mu_{i,k-1} = |M_{i,k-1}^{-1}|_{m_i}$.

Из (1) следует, что для каждого X существует единственное ЦЧ $I_k(X)$, удовлетворяющее соотношению

$$X = \sum_{i=1}^{k-1} M_{i,k-1} \chi_{i,k-1} + M_{k-1} I_k(X). \quad (2)$$

Величина $I_k(X)$ представляет собой интегральную характеристику модулярного кода $(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_{k-1}, \chi_k)$ и называется интервальным индексом (ИИ) числа X по базису \mathbf{M} , а равенство (2) называют интервально-модулярной формой (ИМФ) данного числа [1; 14].

В [1] доказано нижеследующее утверждение.

Т е о р е м а 1 (О минимально избыточном модулярном кодировании). *Для того чтобы в МСС с попарно простыми основаниями m_1, m_2, \dots, m_k ИИ $I_k(X)$ каждого элемента $X = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$ диапазона $\mathbf{Z}_{2M}^- = \{-M, -M + 1, \dots, M - 1\}$ ($M = m_0 M_{k-1}$; m_0 – вспомогательный модуль) полностью определялся компьютерным ИИ – вычетом $\hat{I}_k(X) = |I_k(X)|_{m_k}$, необходимо и достаточно, чтобы k -е основание удовлетворяло условию*

$$m_k \geq 2m_0 + k - 2 \quad (m_0 \geq k - 2). \quad (3)$$

При этом для $I_k(X)$ верны расчетные соотношения

$$I_k(X) = \begin{cases} \hat{I}_k(X), & \text{если } \hat{I}_k(X) < m_0, \\ \hat{I}_k(X) - m_k, & \text{если } \hat{I}_k(X) \geq m_0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\hat{I}_k(X) = \left| \sum_{i=1}^k R_{i,k}(\chi_i) \right|_{m_k}; \quad (5)$$

$$R_{i,k}(\chi_i) = \left| -m_i^{-1} |M_{i,k-1}^{-1} \chi_i|_{m_i} \right|_{m_k} \quad (i \neq k), \quad R_{k,k}(\chi_k) = \left| \frac{\chi_k}{M_{k-1}} \right|_{m_k}. \quad (6)$$

Благодаря условию (3) мощность $|\mathbf{Z}_{2M}^-| = 2M$ диапазона $|\mathbf{Z}_{2M}^-|$ превышает мощность $|\mathbf{Z}_{M_k}^-| = M_k = \prod_{i=1}^k m_i$ множества $|\mathbf{Z}_{M_k}^-|$ всех абсолютно наименьших вычетов по модулю M_k . Это означает, что МСС с базисом \mathbf{M} и диапазоном $|\mathbf{Z}_{2M}^-|$ в отличие от МСС с тем же базисом \mathbf{M} и диапазоном $|\mathbf{Z}_{M_k}^-|$ является избыточной. Несмотря на то что ввозимая избыточность весьма мала, она обеспечивает значительное упрощение процедуры вычисления ИИ $I_k(X)$, описываемой расчетными соотношениями (4)–(6). Это приводит к адекватному уменьшению сложности алгоритмов немодульных операций в минимально-избыточной МСС [1; 14]. Отмеченное преимущество минимально избыточной МА (МИМА) дает ей приоритетные позиции при решении проблемы оптимизации МВС, в том числе МВС нейросетевого типа.

В немодульных процедурах МИМА фундаментальную роль выполняет интервально-индексная характеристика $I_k(X)$. Поэтому в настоящем сообщении главное внимание уделяется нейросетевой реализации расчетных соотношений для ИИ.

Редукционный метод позиционно-модулярного линейного преобразования целых чисел. Эффективную основу для создания нейрокompьютерного обеспечения современных МА-приложений составляет класс нейронных сетей конечного кольца, осуществляющих преобразование

$$\chi = |CX|_m, \tag{7}$$

где χ – результирующий остаток от деления произведения CX на заданный модуль m ; C – целочисленная константа (масштабирующий множитель); X – входное неотрицательное ЦЧ, представленное b -разрядным двоичным кодом $(x_{b-1}x_{b-2} \dots x_0)_2$ ($x_j \in \{0, 1\}$ ($j = 0, b-1$)).

Вполне понятно, что НСКК как структурно, так и на операционном уровне должны быть максимально согласованы с естественным кодовым параллелизмом МА. По критерию простоты нейросетевой реализации наиболее приемлемым методом выполнения операции (7) является метод модулярной редукции суммы взвешенных операндов по рекурсивной схеме понижения разрядности элементов получаемой последовательности вычетов [1; 3; 10].

Положим

$$X^{(0)} = (x_{b_0-1}^{(0)} x_{b_0-2}^{(0)} \dots x_0^{(0)})_2 = \sum_{j=0}^{b_0-1} 2^j x_j^0 \quad (b_0 = b, x_j^{(0)} = x_j) \tag{8}$$

и пусть

$$W_j(C) = |C2^j|_{m_0}^- = \begin{cases} |C2^j|_m, & \text{если } |C2^j|_m < \left\lceil \frac{m}{2} \right\rceil, \\ |C2^j|_m - m, & \text{если } |C2^j|_m \geq \left\lceil \frac{m}{2} \right\rceil, \end{cases} \quad (j = \overline{0, b-1}). \tag{9}$$

В случае $C = 1$ далее употребляется также обозначение $W_j = W_j(1)$.

При необходимости конкретизации модуля МСС в (9): $m = m_i$, вместо $W_j(C)$ и W_j будем использовать $W_{j,i}(C)$ и $W_{j,i}$ ($i = 1, k$). Для наборов констант, определяемых выражением (9), в дальнейшем применяются обозначения типа $\mathbf{W}(C, b, m)$, $\mathbf{W}(C)$, $\mathbf{W} = \mathbf{W}(1)$, $\mathbf{W}_i(C, b) = \mathbf{W}(C, b, m_i)$, $\mathbf{W}_i(C) = \mathbf{W}_i(C, b)$, $\mathbf{W}_i = \mathbf{W}_i(1)$.

Применяемая редукционная схема описывается операционной последовательностью

$$\left\langle \begin{aligned} X^{(1)} &= \sum_{j=0}^{b_0-1} W_j(C)x_j^{(0)} = (x_{b_1-1}^{(1)} x_{b_1-2}^{(1)} \dots x_0^{(1)})_2 - 2^{b_1} x_{b_1-1}^{(1)} = \sum_{j=0}^{b_1-2} 2^j x_j^{(1)} - 2^{b_1-1} x_{b_1-1}^{(1)}, \\ X^{(s)} &= \sum_{j=0}^{b_{s-1}-2} W_j x_j^{(s-1)} - W_{b_{s-1}-1} x_{b_{s-1}-1}^{(s-1)} = (x_{b_s-1}^{(s)} x_{b_s-2}^{(s)} \dots x_0^{(s)})_2 - 2^{b_s} x_{b_s-1}^{(s)} = \\ &= \sum_{j=0}^{b_s-2} 2^j x_j^{(s)} - 2^{b_s-1} x_{b_s-1}^{(s)} \quad (s = \overline{2, S}); \quad \chi = |X^{(S)}|_m \end{aligned} \right\rangle, \tag{10}$$

где b_1 и b_s – длины дополнительных двоичных кодов $(x_{b_1-1}^{(1)} x_{b_1-2}^{(1)} \dots x_0^{(1)})_2$ и $(x_{b_s-1}^{(s)} x_{b_s-2}^{(s)} \dots x_0^{(s)})_2$, соответственно ЦЧ $X^{(1)}$ и $X^{(s)}$, которые, как следует из (9), могут быть как отрицательными, так и неотрицательными; S – количество итераций схемы.

Основополагающая идея редукционного метода, реализуемая в рамках вычислительной схемы (10) в целях приведения ЦЧ CX к остатку по модулю m состоит в замене коэффициентов $C2^j$ правой части равенства

$$CX = CX^{(0)} = \sum_{j=0}^{b_0-1} (C2^j)x_j^{(0)}$$

на вычеты $W_j(C)$, определяемые по правилу (9), а коэффициенты $2^j, 2^{b_s-1}$ выражения

$$X^{(s)} = \sum_{j=0}^{b_{s-1}-2} 2^j x_j^{(s-1)} - 2^{b_{s-1}-1} x_{b_{s-1}-1}^{(s-1)}$$

на вычеты $W_j, W_{b_{s-1}-1}$ при $s = \overline{2, S}$. В виду (9) все получаемые после указанных замен ЦЧ $X^{(s)}$ ($s = \overline{1, S}$) равноостаточны по модулю m . Они являются элементами одного и того же класса вычетов по данному модулю: $\mathbf{R}_m(CX) = \{R \in \mathbf{Z} \mid R \equiv CX \pmod{m}\}$ (\mathbf{Z} – множество ЦЧ).

Проведенная оценка мощности диапазона изменения и разрядности b_s ЦЧ $X^{(s)}$ ($s = \overline{1, S}$) позволяет сформулировать следующее утверждение.

Т е о р е м а 2. Пусть модуль m имеет разрядность $b_{\text{mod}} = \lceil \log_2 m \rceil$ бит. Тогда для длины b_s дополнительного двоичного кода $(x_{b_s-1}^{(s)} x_{b_s-2}^{(s)} \dots x_0^{(s)})_2$ вычета $X^{(s)}$, определяемого по редуccionной схеме (10) для входного ЦЧ (8) с использованием синаптических весов (9), верна оценка $b_s < b_{\text{mod}} + \log_2 b_{s-1}$ (b_{s-1} – разрядность ЦЧ $X^{(s-1)}$ ($s = \overline{1, S}$)).

При этом для произвольного целочисленного масштабирующего множителя C существует $S \geq 1$, при котором последовательность b_1, b_2, \dots, b_s длин дополнительных двоичных кодов вычетов $X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(s)}$, получаемых по рекурсивной редуccionной схеме (10), является строго убывающей.

Для функции, описывающей преобразование $X \rightarrow |CX|_m$, которое осуществляется по редуccionной схеме (10) введем обозначение

$$\chi = PM_Reduc(X; C, b, m), \tag{11}$$

где χ – результирующий остаток; X – аргумент (входное ЦЧ); C – масштабирующий множитель; $b = b_X$ – разрядность аргумента X ; m – заданный модуль.

Далее для b -входовой НСКК, реализующей функцию (11), употребляется условное графическое обозначение, приведенное на рис. 1.

Структура нейронной сети для расчета интервально-индексной характеристики минимально избыточного модулярного кода. Операционный анализ базовых расчетных соотношений для синтеза немодульных процедур позволяет заключить, что основу их реализации с применением нейросетевой вычислительной технологии составляют представленные на рис. 1 НСКК, которые выполняют преобразования вида $X \rightarrow |CX|_m$, где X – некоторое ЦЧ; C – масштабирующий множитель; m – модуль используемого модулярного базиса. Поскольку при построении МА ключевую роль играют интегральные характеристики модулярного кода (ИХМК), то в процессе разработки требуемых конфигураций немодульных процедур для МА-приложений исследуемого класса в первую очередь необходимо решить задачу синтеза НС для расчета применяемых ИХМК. В нашем случае такой характеристикой является интервальный индекс числа, определяемый по расчетным соотношениям (3)–(6).

Отметим, что аналитическим аналогом НСКК, осуществляющей позиционно-модулярное преобразование $X \rightarrow |CX|_m$, служит функция вида (11). На языке аппарата данной функции – функции PM_Reduc формула (5) для вычисления компьютерного интервального индекса $\hat{I}_k(X)$ ЦЧ $X = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$ в МСС с базисом $\mathbf{M} = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ с учетом обозначений: $m_{i,k} = \left| -m_i^{-1} \right|_{m_k}$, $\mu_{i,k-1} = \left| M_{i,k-1}^{-1} \right|_{m_i}$, $\chi_{i,k-1} = \left| \mu_{i,k-1} \chi_i \right|_{m_i}$ ($i = \overline{1, k-1}$), $\mu_{k,k} = \left| M_{k-1}^{-1} \right|_{m_k}$, $\chi_{k,k} = \left| \mu_{k,k} \chi_k \right|_{m_k}$, представляется операционной последовательностью

$$\left\langle s_k = \sum_{i=1}^{k-1} \left| m_{i,k} \chi_{i,k-1} \right|_{m_k} + \chi_{k,k} = \sum_{i=1}^{k-1} PM_Reduc (PM_Reduc(\chi_i; \mu_{i,k-1}, b_{\text{mod}_i}, m_i); m_{i,k}, b_{\text{mod}_i}, m_k) + PM_Reduc(\chi_k; \mu_{k,k}, b_{\text{mod}_k}, m_k); \right. \tag{12}$$

$$\left. \hat{I}_k(X) = PM_Reduc(s_k; 1, b_{s_k}, m_k) \right\rangle,$$

где $b_{\text{mod}_i} = \lceil \log_2 m_i \rceil$ – разрядность модуля m_i ; $b_{s_k} = \lceil \log_2 (k(m_k - 1)) \rceil$ – разрядность суммы s_k . Принятое для суммы s_k значение b_{s_k} разрядности согласовано с оценкой

$$b_{s_k} = \lceil \log_2 s_k \rceil \leq \lceil \log_2 \sum_{i=1}^k (m_k - 1) \rceil = \lceil \log_2 (k(m_k - 1)) \rceil.$$

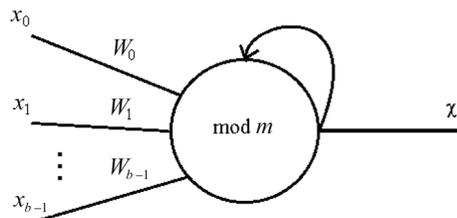


Рис. 1. Условное графическое обозначение НСКК по модулю m

Fig. 1. Conditional graphic designation of NNFR on the module m

Вычислительной схеме (12) отвечает НС, которая имеет структуру, показанную на рис. 2. Базовыми элементами данной НС служат типовые НСКК (рис. 1), реализующие используемые в (12) функции PM_Reduc по редуccionной схеме (10). Представленная на рис. 2 НС для расчета интервально-индексной характеристики $\hat{I}_k(X)$ числа X в МСС с базисом \mathbf{M} состоит из входного слоя, выполняющего роль регистра для фиксации модулярного кода $(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$

входного ЦЧ X , первого и второго скрытых слоев НСКК, блока SMR суммирования вычетов, объединяющего скрытые слои с третьего по $(\lceil \log_2 k \rceil + 2)$ -й, и выходной слой из одиночной НСКК. Блок суммирования вычетов – SMR построен на основе двоичных сумматоров SM и имеет $\lceil \log_2 k \rceil$ -каскадную «пирамидальную» архитектуру, обеспечивающую суммирование k -компонентных наборов вычетов за время порядка $\lceil \log_2 k \rceil t_{\text{сл}}$ ($t_{\text{сл}}$ – длительность двухместной операции сложения).

Вычисление интервально-индексной характеристики $\hat{I}_k(X)$ нейронной сетью, представленной на рис. 2, осуществляется следующим образом. НСКК первого скрытого слоя по цифрам модулярного кода $(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_{k-1}, \chi_k)$, зарегистрированного во входном слое, и весовым коэффициентам $\mu_{1,k-1}, \mu_{2,k-1}, \dots, \mu_{k-1,k-1}, \mu_{k,k}$ получают нормированные остатки $\chi_{1,k-1}, \chi_{2,k-1}, \dots, \chi_{k-1,k-1}, \chi_{k,k}$ ЦЧ X по модулям $m_1, m_2, \dots, m_{k-1}, m_k$ базовой МСС. Затем НСКК второго скрытого слоя по остаткам $\chi_{1,k-1}, \chi_{2,k-1}, \dots, \chi_{k-1,k-1}$ и масштабирующим коэффициентам $m_{i,k}$ определяют вычеты $R_i = |m_{i,k} \chi_{i,k-1}|_{m_k}$ для всех $i = 1, k-1$. Сформированный набор вычетов: $\{R_1, R_2, \dots, R_{k-1}, R_k = \chi_{k,k}\}$, поступают в БСВ SMR, который, реализуя $\lceil \log_2 k \rceil$ -каскадную процедуру суммирования с максимальным распараллеливанием на уровне двухместных операций сложения в скрытых слоях с третьего по $(\lceil \log_2 k \rceil + 2)$ -й, находит сумму $s_k = \sum_{i=1}^k R_i$. С приведением s_k к остатку $I = \hat{I}_k(X) = |s_k|_{m_k}$ по модулю m_k , осуществляемым НСКК выходного слоя, процесс расчета интервально-индексной характеристики $\hat{I}_k(X)$ завершается.

Нейросетевая реализация редуционного метода позиционно-модулярного кодового преобразования масштабируемых ЦЧ в структурном отношении становится более простой при ис-

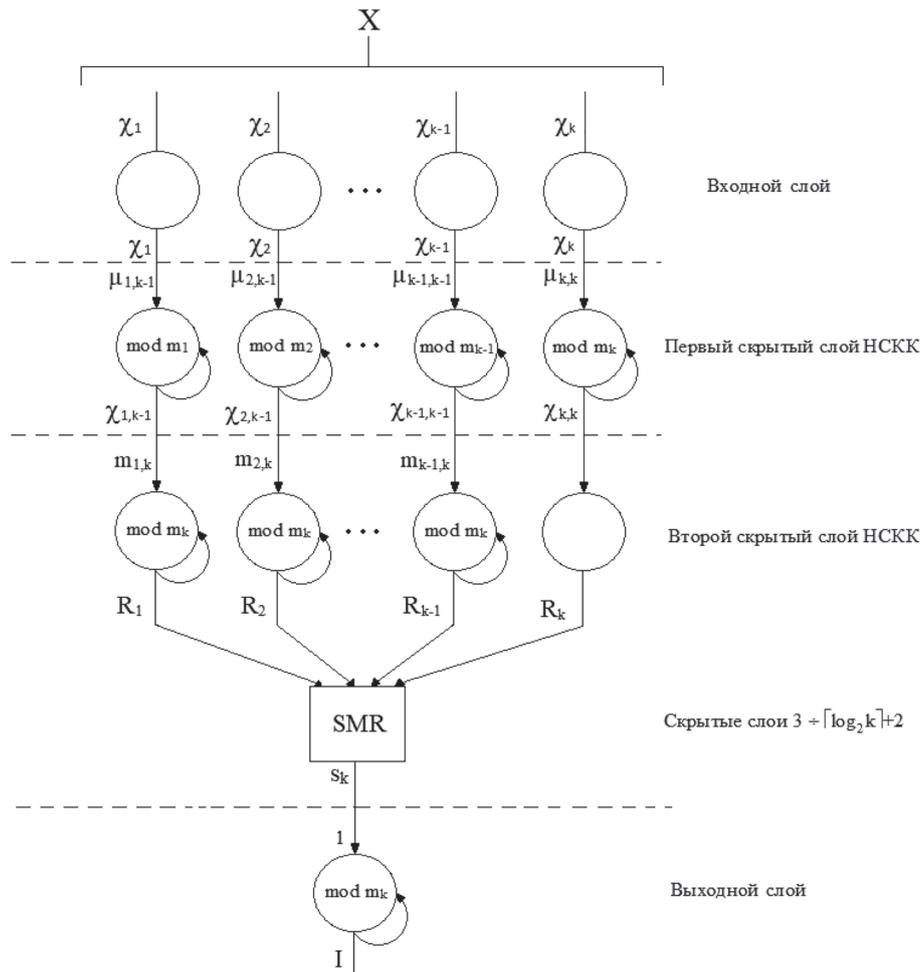


Рис. 2. Нейронная сеть для расчета нормированной интервально-индексной характеристики минимально избыточного модулярного кода

Fig. 2. Neural network for calculating the normalized interval-index characteristic of a minimally redundant modular code

пользовании МИМА, базирующейся на ненормированной ИМФ, которая вытекает из соответствующей версии китайской теоремы об остатках

$$X = \sum_{i=1}^{k-1} M_{i,k-1} \mu_{i,k-1} \chi_i \pmod{M_{k-1}}, \quad (13)$$

и имеет вид

$$X = \sum_{i=1}^{k-1} M_{i,k-1} \mu_{i,k-1} \chi_i + M_{k-1} \mathcal{J}_k(X), \quad (14)$$

где $\mathcal{J}_k(X)$ – ненормированный аналог интервального индекса $I_k(X)$ числа X в МСС с базисом \mathbf{M} и диапазоном $|\mathbf{Z}_{2M}^-|$ ($M = m_0 M_{k-1}$; m_0 – вспомогательный модуль).

Из (13) следует, что для любого X существует единственная целочисленная величина $r_{k-1}(X)$, определяемая равенством

$$|X|_{M_{k-1}} = \sum_{i=1}^{k-1} M_{i,k-1} \mu_{i,k-1} \chi_i - M r_{k-1} r_{k-1}(X), \quad (15)$$

и называемая ненормированным рангом ЦЧ X по базису $\{m_1, m_2, \dots, m_{k-1}\}$. Из (15) для ранговой характеристики $r_{k-1}(X) = r_{k-1}(|X|_{M_{k-1}})$ вытекает равенство

$$r_{k-1}(X) = \left\lfloor \sum_{i=1}^{k-1} \frac{\mu_{i,k-1} \chi_i}{m_i} \right\rfloor. \quad (16)$$

Как видно из (16), максимуму r_{max} характеристики $r_{k-1}(X)$ отвечает ЦЧ $M_{k-1} - 1$, которое в МСС с основаниями m_1, m_2, \dots, m_{k-1} имеет код $(m_1 - 1, m_2 - 1, \dots, m_{k-1} - 1)$. Таким образом,

$$r_{\text{max}} = r_{k-1}(M_{k-1} - 1) = \left\lfloor \sum_{i=1}^{k-1} \frac{\mu_{i,k-1}(m_i - 1)}{m_i} \right\rfloor = \sum_{i=1}^{k-1} \mu_{i,k-1} - \left\lfloor \sum_{i=1}^{k-1} \frac{\mu_{i,k-1}}{m_i} \right\rfloor. \quad (17)$$

Сущность минимально избыточного модулярного кодирования, ассоциированного с интервально-модулярной формой (14) и интервально-индексной характеристикой $\mathcal{J}_k(X)$, раскрывает нижеследующее утверждение.

Т е о р е м а 3 (О минимально избыточном модулярном кодировании). Для того чтобы в МСС с попарно простыми основаниями m_1, m_2, \dots, m_k ИИ $I_k(X)$ каждого элемента $X = (\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$ диапазона $\mathbf{Z}_{2M}^- = \{-M, -M + 1, \dots, M - 1\}$ ($M = m_0 M_{k-1}$; m_0 – вспомогательный модуль) полностью определялся компьютерным ИИ-вычетом $\hat{I}_k(X) = |I_k(X)|_{m_k}$, необходимо и достаточно, чтобы k -е основание удовлетворяло условию

$$m_k \geq 2m_0 + r_{\text{max}}, \quad (18)$$

где r_{max} вычисляется по (17).

При этом для $\mathcal{J}_k(X)$ верны расчетные соотношения

$$\mathcal{J}_k(X) = \begin{cases} \hat{\mathcal{J}}_k(X), & \text{если } \hat{\mathcal{J}}_k(X) < m_0, \\ \hat{\mathcal{J}}_k(X) - m_k, & \text{если } \hat{\mathcal{J}}_k(X) \geq m_0; \end{cases} \quad (19)$$

$$\hat{\mathcal{J}}_k(X) = \left\lfloor \sum_{i=1}^k |C_{i,k} \chi_i|_{m_k} \right\rfloor_{m_k}; \quad (20)$$

$$C_{i,k} = \left\lfloor -m_i^{-1} \mu_{i,k-1} \right\rfloor_{m_k} \quad (i = \overline{1, k-1}), \quad C_{k,k} = \mu_{k,k} = \left\lfloor M_{k-1}^{-1} \right\rfloor_{m_k}. \quad (21)$$

Нейронная сеть для вычисления по формуле (20) с использованием синаптических весов (21) интервально-индексной характеристики $\hat{\mathcal{J}}_k(X)$ реализует операционную последовательность

$$\left\langle R_i = PM_Reduc(\chi_i; C_{i,k}, b_mod_i, m_k) \ (i = \overline{1, k}); \right. \\ \left. s_k = \sum_{i=1}^k R_i; \mathcal{J}_k(X) = \hat{\mathcal{J}}_k(X) = PM_Reduc(s_k; 1, b_s_k, m_k) \right\rangle. \quad (22)$$

В отличие от НС для вычисления нормированного компьютерного ИИ $\hat{I}_k(X)$ (см. рис. 2) НС для расчета $\hat{\mathcal{J}}_k(X)$ согласно схеме (22) не содержит НСКК для получения нормированных остатков $\chi_{1,k-1}, \chi_{2,k-1}, \dots, \chi_{k-1,k-1}$. Поэтому в структурном отношении она является более простой. Вместе с тем, как видно из сравнения условий (3) и (18) с учетом (17), налагаемых на k -е основание минимально избыточной МСС теоремами 1 и 3, применение ненормированных интервально-индексных характеристик вместо нормированных требует примерно k -кратного увеличения модуля m_k по отношению к остальным модулям МСС, а следовательно и адекватного повышения аппаратных затрат по модулю m_k . Кроме того, отмеченное обстоятельство приводит к неоднородности нейросетевых вычислительных МИМА-структур соответствующего класса.

Заключение. Основные результаты представленных в сообщении исследований по проблематике создания нейросетевых МВС для высокоскоростных МА-приложений различного назначения, включая приложения в области защиты информации, состоят в нижеследующем.

Дана математическая формализация редуccionного метода позиционно-модулярного кодового преобразования больших чисел, который ориентирован на создание расширенного класса нейронных сетей конечного кольца – НСКК, осуществляющих приведение к остаткам по модулям МСС масштабируемых целых чисел. Это открывает принципиально новые возможности для построения нейросетевых конфигураций компьютерных алгоритмов МА.

Новые возможности модифицированной редуccionной технологии синтеза нейросетевых МВС продемонстрированы на примере параллельной НС для расчета интегральных характеристик минимально избыточного модулярного кода. Структура предложенной НС отличается высоким уровнем однородности, а также простотой реализации.

В целях снижения сложности синтезированной НС для вычисления базовой интервально-индексной характеристики минимально избыточной МА исследован альтернативный вариант разработанной НС, осуществляющий формирование ненормированных интегральных характеристик минимально избыточного модулярного кода. Показано, что применение ненормированной интервально-индексной характеристики приводит к структурному упрощению базовой НС. При этом, однако, существенно увеличиваются (примерно в k раз) аппаратные затраты по модулю интервального индекса – k -му модулю МСС.

Список использованных источников

1. Модулярная арифметика и ее приложения в инфокоммуникационных технологиях / Н. И. Червяков [и др.]. – М., 2017. – 400 с.
2. Ananda Mohan, P. V. Residue number systems: Theory and applications / P. V. Ananda Mohan. – Basel, 2016. – 351 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0997-4>
3. Применение искусственных нейронных сетей и системы остаточных классов в криптографии / Н. И. Червяков [и др.]. – М., 2012. – 280 с.
4. Инютин, С. А. Основы модулярной алгоритмики / С. А. Инютин. – Ханты-Мансийск, 2009. – 347 с.
5. Omondi, Amos. Residue number systems: Theory and implementation / Amos Omondi, Benjamin Premkumar. – Singapore, 2007. – 311 p. <https://doi.org/10.1142/9781860948671>
6. Оцоков, Ш. А. Способ организации высокоточных вычислений в модулярной арифметике / Ш. А. Оцоков // Первая международная конференция «Параллельная компьютерная алгебра и ее приложения в новых инфокоммуникационных системах»: сб. науч. трудов. – Ставрополь, 2014. – С. 270–277.
7. Комарова, Ю. А. Аналитический обзор методов и структур для работы с большими данными / Ю. А. Комаров, И. А. Талалаев // Первая международная конференция «Параллельная компьютерная алгебра и ее приложения в новых инфокоммуникационных системах»: сб. науч. трудов. – Ставрополь, 2014. – С. 477–485.
8. Афонин, М. С. Способ обработки больших чисел на ПЛИС с малой ресурсной мощностью / М. С. Афонин // Первая международная конференция «Параллельная компьютерная алгебра и ее приложения в новых инфокоммуникационных системах»: сб. науч. трудов. – Ставрополь, 2014. – С. 511–520.
9. Червяков, Н. И. Нейронные сети конечного кольца для реализации пороговых схем разделения секрета / Н. И. Червяков, А. А. Евдокимов // Нейрокомпьютеры: разраб., применение. – 2007. – № 2–3. – С. 45–50.
10. Нейронная сеть конечного кольца: пат. № 2279132 РФ. МКП G06N3/04. / Ю. А. Стрекалов, Н. И. Червяков, В. А. Галкина, С. В. Лавриненко. – Оpubл.: 27.06.2006.

11. Червяков, Н. И. Нейронная сеть конечного кольца прямого распространения для операций на эллиптических кривых / Н. И. Червяков, А. Б. Спельников, А. Ф. Мезенцева // Нейрокомпьютеры: разработ., применение. – 2008. – № 1–2. – С. 28–34.
12. Тихонов, Э. Е. Программно-аппаратная реализация нейронных сетей / Э. Е. Тихонов, А. А. Евдокимов. – Невиномысск, 2013. – 116 с.
13. Кондрашѐв, А. В. Нейронная сеть для преобразования чисел, представленных в позиционном коде в систему остаточных классов / А. В. Кондрашѐв, Д. В. Горденко, Д. Н. Павлюк // Исследования в области естественных наук. – 2015. – № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://science.snauka.ru/2015/01/8925>. – Дата доступа: 25.04.2018.
14. Коляда, А. А. Обобщенная интегрально-характеристическая база модулярных систем счисления / А. А. Коляда // Информационные технологии. – 2017. – Т. 23, № 9. – С. 641–649.
15. Виноградов, И. М. Основы теории чисел / И. М. Виноградов. – СПб., 2009. – 176 с.

References

1. Chervjakov N. I., Koljada A. A., Ljahov P. A., Babenko M. G., Lavrinenko I. N., Lavrinenko A. V. *Modular Arithmetic and its Applications in Infocommunication Technologies*. Moscow, 2017. 400 p. (in Russian).
2. Ananda Mohan P. V. *Residue number systems: Theory and applications*. Basel, 2016. 351 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0997-4>
3. Chervjakov N. I., Evdokimov A. A., Galushkin A. I., Lavrinenko I. N., Lavrinenko A. V. *The Use of Artificial Neural Networks and the Residual Class System in Cryptography*. Moscow, 2012. 280 p. (in Russian).
4. Injutin S. A. *Fundamentals of Modular Algorithms*. Khanty-Mansiysk, 2009. 347 p. (in Russian).
5. Omondi A., Premkumar B. *Residue number systems: Theory and implementation*. Singapore, 2007. 311 p. <https://doi.org/10.1142/9781860948671>
6. Otsokov Sh. A. The way to organize high-precision calculations in modular arithmetic. *Pervaya mezhdunarodnaya konferentsiya «Parallel'naya komp'yuternaya algebra i ee prilozheniya v novykh infokommunikatsionnykh sistemakh»: sbornik nauchnykh trudov [First International Conference "Parallel Computer Algebra and Its Applications in New Infocommunication Systems": collection of scientific papers]*. Stavropol, 2014, pp. 270–277 (in Russian).
7. Komarova Yu. A., Talalaev I. A. Analytical review of methods and structures for working with large data. *Pervaya mezhdunarodnaya konferentsiya «Parallel'naya komp'yuternaya algebra i ee prilozheniya v novykh infokommunikatsionnykh sistemakh»: sbornik nauchnykh trudov [First International Conference "Parallel Computer Algebra and Its Applications in New Infocommunication Systems": collection of scientific papers]*. Stavropol, 2014, pp. 477–485 (in Russian).
8. Afonin M. S. The way of processing large numbers on a PLIS with a small resource capacity. *Pervaya mezhdunarodnaya konferentsiya «Parallel'naya komp'yuternaya algebra i ee prilozheniya v novykh infokommunikatsionnykh sistemakh»: sbornik nauchnykh trudov [First International Conference "Parallel Computer Algebra and Its Applications in New Infocommunication Systems": collection of scientific papers]*. Stavropol, 2014, pp. 511–520 (in Russian).
9. Chervjakov N. I., Evdokimov A. A. Neural networks of the finite ring for the implementation of threshold separation schemes for secretion. *Nejrokompyutery: razrabotka, primeneniye [Neurocomputers]*, 2007, no. 2–3, pp. 45–50 (in Russian).
10. Strekalov Yu. A., Chervyakov N. I., Galkina V. A., Lavrinenko S. V. *Neural network of a finite ring*. Patent RF no 2279132 МКП G06N3/04. Publ.: 27.06.2006.
11. Chervjakov N. I., Spel'nikov A. B., Mezenceva A. F. Neural network of a finite ring of direct propagation for operations on elliptic curves. *Nejrokompyutery: razrabotka, primeneniye [Neurocomputers]*, 2008, no. 1–2, pp. 28–34 (in Russian).
12. Tihonov Je. E., Evdokimov A. A. *Software and Hardware Implementation of Neural Networks*. Nevinnomyssk, 2013. 116 p. (in Russian).
13. Kondrashov A. V., Gordenko D. V., Pavljuk D. N. Neural network to convert numbers presented in the position code in the residual class. *Researches in Science*, 2015. no. 1. Available at: <http://science.snauka.ru/en/2015/01/8925> (accessed 25.04.2018) (in Russian).
14. Kolyada A. A. Generalized Integrated Characteristic Base of Modular Number System. *Informacionnye tehnologii [Information Technologies]*, 2017, vol. 23, no. 9, pp. 641–649 (in Russian).
15. Vinogradov I. M. *Fundamentals of number theory*. Saint Petersburg, 2009. 176 p. (in Russian).

Информация об авторах

Чернявский Александр Федорович – академик, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: niipfp@bsu.by.

Коляда Андрей Алексеевич – д-р физ.-мат. наук, доцент, гл. науч. сотрудник. Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: razan@tut.by.

Протасеня Стелла Юрьевна – мл. науч. сотрудник. Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Estellita@mail.ru.

Information about the authors

Chernyavsky Alexander Fedorovich – Academician, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory. Institute of Applied Physical Problems named after A. N. Sevchenko of the Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: niipfp@bsu.by.

Kolyada Andrey Alexeyevich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Associate professor, Chief researcher. Institute of Applied Physical Problems named after A. N. Sevchenko of the Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: razan@tut.by.

Protaseniya Stella Yuryevna – Junior researcher. Institute of Applied Physical Problems named after A. N. Sevchenko of the Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Estellita@mail.ru.

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 539.12
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-661-667>

Поступило в редакцию 08.08.2018
Received 08.08.2018

В. В. Кисель¹, В. А. Плетюхов², Е. М. Овсюк³, Я. А. Войнова⁴, О. В. Веко⁴, В. М. Редьков⁴

¹*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь*

²*Брестский государственный университет им. А. С. Пушкина, Брест, Республика Беларусь*

³*Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина,
Мозырь, Республика Беларусь*

⁴*Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

**ФЕРМИОН С ТРЕМЯ МАССОВЫМИ ПАРАМЕТРАМИ:
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ВНЕШНИМИ ПОЛЯМИ**

(Представлено членом-корреспондентом Л. М. Томильчиком)

Аннотация. В рамках формализма Гельфанда–Яглома развита теория частицы со спином 1/2 и тремя массовыми параметрами. Модель основана на использовании расширенного набора представлений группы Лоренца, 20-компонентная волновая функция состоит из биспинора и вектор-биспинора. Из волновой функции строятся три вспомогательных биспинора, выведена система уравнений для этих биспиноров. При отсутствии внешних полей система имеет вид трех несвязанных уравнений дираковского типа с различными массами M_1, M_2, M_3 . При наличии внешнего электромагнитного поля уравнения для трех биспиноров зацепляются друг с другом. Выполнено обобщение на случай искривленных моделей пространства. Если скалярная кривизна пространства отлична от нуля, то между тремя биспинорными компонентами возникают дополнительные геометрические члены взаимодействия. Показано, что модель фермиона с тремя массовыми параметрами допускает ограничение к случаю майорановских частиц.

Ключевые слова: уравнение Дирака, обобщенные волновые уравнения, три массовых параметра, электромагнитное поле, искривленное пространство–время, нейтральная майорановская частица

Для цитирования. Фермион с тремя массовыми параметрами: взаимодействие с внешними полями / В. В. Кисель [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 661–667. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-661-667>

**Vasilii V. Kisel¹, Vladimir A. Pletyukhov², Elena M. Ovsyuk³, Yanina A. Voynova⁴,
Olga V. Veko⁴, Viktor M. Red'kov⁴**

¹*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

²*Brest State University named after A. S. Pushkin, Brest, Republic of Belarus*

³*Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin, Mozyr, Republic of Belarus*

⁴*B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

FERMION WITH THREE MASS PARAMETERS: INTERACTION WITH EXTERNAL FIELDS

(Communicated by Corresponding Member Lev M. Tomilchik)

Abstract. In the article, using the Gelfand–Yaglom general approach, a new 20-component wave equation for spin 1/2 fermion that is characterized by three mass parameters is derived. Based on the 20-component wave function three auxiliary bispinors are determined, in the absence of an external field, these bispinors obey three separate Dirac-like equations with different masses M_1, M_2, M_3 . In the presence of external electromagnetic fields, the main equation is not split into the separated equations; instead quite definite mixing of three Dirac-like equations arises. The model is extended to the curved space-time background. If the scalar space curvature differs from zero, then additional terms of geometrical interaction occur between three bispinor components. The model for fermion with three mass parameters allows for the restriction to the case of the neutral Majorana particle.

Keywords: Dirac equation, generalized wave equation, three mass parameters, electromagnetic field, curved space-time, neutral Majorana particle

For citation: Kisel V. V., Pletyukhov V. A., Ovsyuk E. M., Voynova Ya. A., Veko O. V., Red'kov V. M. Fermion with three mass parameters: interaction with external fields. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 661–667 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-661-667>

В контексте существования трех типов нейтрино с разными массами и похожими физическими свойствами представляет интерес исследование возможности строить обобщенные уравнения с несколькими значениями спина, с несколькими значениями массовых параметров и некоторыми дополнительными внутренними характеристиками частиц [1–9]. В данной работе будет введена и исследована модель фермиона с единственным значением спина $s = 1/2$ и тремя массовыми параметрами, при этом речь не идет о трех отдельных уравнениях Дирака. Имеется в виду единая физическая система с соответствующим обобщенным волновым уравнением, строящимся в рамках теории релятивистских волновых уравнений с расширенными наборами представлений группы Лоренца. Ранее в [10] была построена более простая модель частицы со спином $1/2$ и двумя массовыми параметрами.

Релятивистская система уравнений для фермиона с тремя массовыми параметрами основана на использовании 20-компонентной волновой функции, включающей биспинор Ψ_0 и вектор-биспинор Ψ_μ . Опуская технические детали формулировки соответствующей теории в рамках формализма Гельфанда–Яглома, будем исходить из записи свободного уравнения (в отсутствие внешних полей) в спин-тензорной форме

$$\begin{aligned} c_1 \hat{\partial}(\gamma_\mu \Psi_\mu) + \frac{c_3}{\sqrt{6}} (\hat{\partial}(\gamma_\mu \Psi_\mu) - 4(\partial_\mu \Psi_\mu)) + M(\gamma_\mu \Psi_\mu) &= 0, \\ c_2 \hat{\partial}\Psi_0 - i \frac{4c_4}{\sqrt{6}} \left(-\frac{1}{4} \hat{\partial}(\gamma_\mu \Psi_\mu) + (\partial_\mu \Psi_\mu) \right) + M\Psi_0 &= 0, \\ -\frac{2fc_3^*}{\sqrt{6}} \left(\partial_\lambda(\gamma_\mu \Psi_\mu) - \frac{1}{4} \gamma_\lambda \hat{\partial}(\gamma_\mu \Psi_\mu) \right) + \\ + i \frac{2gc_4^*}{\sqrt{6}} \left(\partial_\lambda \Psi_0 - \frac{1}{4} \gamma_\lambda \hat{\partial}\Psi_0 \right) + M \left(\Psi_\lambda - \frac{1}{4} \gamma_\lambda(\gamma_\mu \Psi_\mu) \right) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

числовые параметры c_1, c_2 – вещественные, а c_3, c_4 – комплексные, величины $f, g \in \{\pm 1\}$; используется сокращенное обозначение для свертки оператора дифференцирования по координатам с матрицами Дирака $\hat{\partial} = \gamma_\mu \partial_\mu$. Физический смысл параметров станет понятным ниже.

После ряда математических преобразований систему уравнений (1) можно привести к виду, когда в ней в качестве неизвестных функций входят только три биспинора: $(\gamma_\mu \Psi_\mu), \Psi_0, (\partial_\mu \Psi_\mu)$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{c_2(c_1 + c_3/\sqrt{6})} \left\{ c_1 c_2 (c_1 + c_3/\sqrt{6}) + fc_2 |c_3|^2 - \frac{g}{\sqrt{6}} c_3 |c_4|^2 \right\} \hat{\partial}(\gamma_\mu \Psi_\mu) - \\ - ig \frac{c_3 c_4^*}{c_2} \hat{\partial}\Psi_0 - \frac{4c_3}{M\sqrt{6}} \frac{fc_2 |c_3|^2 + gc_1 |c_4|^2}{c_2(c_1 + c_3/\sqrt{6})} \hat{\partial}(\partial_\mu \Psi_\mu) + M(\gamma_\mu \Psi_\mu) &= 0, \\ \frac{i}{\sqrt{6}} \frac{c_4}{c_2(c_1 + c_3/\sqrt{6})} \{ \sqrt{6} fc_2 c_3^* - g |c_4|^2 \} \hat{\partial}(\gamma_\mu \Psi_\mu) + \frac{c_2^2 + g |c_4|^2}{c_2} \hat{\partial}\Psi_0 - \\ - i \frac{4c_4}{M\sqrt{6}} \frac{fc_2 |c_3|^2 + gc_1 |c_4|^2}{c_2(c_1 + c_3/\sqrt{6})} \hat{\partial}(\partial_\mu \Psi_\mu) + M\Psi_0 &= 0, \\ + \frac{M}{4} \frac{1}{c_2(c_1 + c_3/\sqrt{6})} \{ \sqrt{6} fc_2 c_3^* - g |c_4|^2 - c_2(c_1 + c_3/\sqrt{6}) \} \hat{\partial}(\gamma_\mu \Psi_\mu) - \\ - igM \frac{\sqrt{6}}{4} \frac{c_4^*}{c_2} \hat{\partial}\Psi_0 - \frac{fc_2 |c_3|^2 + gc_1 |c_4|^2}{c_2(c_1 + c_3/\sqrt{6})} \hat{\partial}(\partial_\mu \Psi_\mu) + M(\partial_\mu \Psi_\mu) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

В матричной форме систему (2) можно представить так:

$$K \hat{\partial} \begin{pmatrix} \gamma_\mu \Psi_\mu \\ \Psi_0 \\ \partial_\mu \Psi_\mu \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} \gamma_\mu \Psi_\mu \\ \Psi_0 \\ \partial_\mu \Psi_\mu \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Трехмерную числовую матрицу K из (3) можно диагонализировать, соответствующее характеристическое уравнение дает кубическое уравнение для возможных диагональных элементов

$$\lambda^3 - \lambda^2(c_1 + c_2) + \lambda(c_1c_2 - f|c_3|^2 - g|c_4|^2) + (fc_2|c_3|^2 + gc_1|c_4|^2) = 0. \quad (4)$$

Таким образом, матрица K приводима к диагональному виду

$$K = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 & R_1 \\ A_2 & B_2 & R_2 \\ A_3 & B_3 & R_3 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix},$$

при этом система уравнений (2), (3) трансформируется в три несвязанных уравнения дираковского типа с различными массами:

$$M_1 = \frac{M}{\lambda_1}, \quad M_2 = \frac{M}{\lambda_2}, \quad M_3 = \frac{M}{\lambda_3}.$$

Диагонализация проводится линейным преобразованием S над волновой функцией:

$$\Psi' = S\Psi, \quad SKS^{-1} = \hat{K}' = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ r_1 & r_2 & r_3 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Матрица S из (5) подчиняется уравнению

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ r_1 & r_2 & r_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 & B_1 & R_1 \\ A_2 & B_2 & R_2 \\ A_3 & B_3 & R_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ r_1 & r_2 & r_3 \end{pmatrix},$$

откуда получаем три линейные однородные системы

$$\begin{aligned} a_1A_1 + a_2A_2 + a_3A_3 &= \lambda_1a_1, a_1B_1 + a_2B_2 + a_3B_3 = \lambda_1a_2, a_1R_1 + a_2R_2 + a_3R_3 = \lambda_1a_3; \\ b_1A_1 + b_2A_2 + b_3A_3 &= \lambda_2b_1, b_1B_1 + b_2B_2 + b_3B_3 = \lambda_2b_2, b_1R_1 + b_2R_2 + b_3R_3 = \lambda_2b_3; \\ r_1A_1 + r_2A_2 + r_3A_3 &= \lambda_3r_1, r_1B_1 + r_2B_2 + r_3B_3 = \lambda_3r_2, r_1R_1 + r_2R_2 + r_3R_3 = \lambda_3r_3. \end{aligned}$$

Их решения однотипны и имеют следующий явный вид:

$$\begin{aligned} a_2 &= a_1 \frac{-igc_3c_4^*(c_1 + \frac{c_3}{\sqrt{6}})\lambda_1}{\lambda_1c_2(\lambda_1 - c_2) + (\lambda_1 - c_2)[fc_2|c_3|^2 + gc_1|c_4|^2] - \lambda_1(c_1 + \frac{c_3}{\sqrt{6}})g|c_4|^2}, \\ a_3 &= -\frac{4a_1}{\sqrt{6}M} \frac{c_3(\lambda_1 - c_2)[fc_2|c_3|^2 + gc_1|c_4|^2]}{\lambda_1c_2(\lambda_1 - c_2) + (\lambda_1 - c_2)[fc_2|c_3|^2 + gc_1|c_4|^2] - \lambda_1(c_1 + \frac{c_3}{\sqrt{6}})g|c_4|^2}, \\ b_2 &= b_1 \frac{-igc_3c_4^*(c_1 + \frac{c_3}{\sqrt{6}})\lambda_2}{\lambda_2c_2(\lambda_2 - c_2) + (\lambda_2 - c_2)[fc_2|c_3|^2 + gc_1|c_4|^2] - \lambda_2(c_1 + \frac{c_3}{\sqrt{6}})g|c_4|^2}, \\ b_3 &= -\frac{4b_1}{\sqrt{6}M} \frac{c_3(\lambda_2 - c_2)[fc_2|c_3|^2 + gc_1|c_4|^2]}{\lambda_2c_2(\lambda_2 - c_2) + (\lambda_2 - c_2)[fc_2|c_3|^2 + gc_1|c_4|^2] - \lambda_2(c_1 + \frac{c_3}{\sqrt{6}})g|c_4|^2}, \\ r_2 &= r_1 \frac{-igc_3c_4^*(c_1 + \frac{c_3}{\sqrt{6}})\lambda_3}{\lambda_3c_2(\lambda_3 - c_2) + (\lambda_3 - c_2)[fc_2|c_3|^2 + gc_1|c_4|^2] - \lambda_3(c_1 + \frac{c_3}{\sqrt{6}})g|c_4|^2}, \\ r_3 &= -\frac{4r_1}{\sqrt{6}M} \frac{c_3(\lambda_3 - c_2)[fc_2|c_3|^2 + gc_1|c_4|^2]}{\lambda_3c_2(\lambda_3 - c_2) + (\lambda_3 - c_2)[fc_2|c_3|^2 + gc_1|c_4|^2] - \lambda_3(c_1 + \frac{c_3}{\sqrt{6}})g|c_4|^2}. \end{aligned}$$

Проанализируем значения корней $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ характеристического уравнения (4). Можно показать, что вещественные положительные значения корней возможны, если $c_1 > 0, c_2 > 0, f = -1, g = -1$. С использованием обозначений

$$|c_4|^2 = a^2, |c_3|^2 = b^2, \quad \Gamma = \frac{c_1 a^2 + c_2 b^2}{(c_1 + c_2)^3}$$

для этих положительных корней применима такая параметризация:

$$M_3 = \frac{M}{\lambda_3} = \frac{\mu}{\cos \alpha}, \quad \mu = \frac{M}{(c_1 + c_2)}, \quad M_{1,2} = \frac{M}{\lambda_{2,1}} = \frac{\mu}{\sin^2(\alpha/2) \pm \sqrt{\sin^4(\alpha/2) - \Gamma / \cos \alpha}}.$$

Существуют особые случаи. Например,

$$a \rightarrow 0, \quad b \rightarrow 0 \Rightarrow M_3 = \frac{\mu}{\cos \alpha}, \quad M_1 \rightarrow \infty, \quad M_2 = \frac{\mu}{1 - \cos^2 \alpha},$$

есть и другие.

Таким образом, в случае свободной частицы исходное уравнение можно привести к виду трех отдельных уравнений дираковского типа с массами M_1, M_2, M_3 для трех специальных комбинаций биспиноров:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= a_1(\gamma_\mu \Psi_\mu) + a_2 \Psi_0 + a_3(\partial_\mu \Psi_\mu), \quad (\hat{\partial} + M_1)\Phi_1 = 0, \quad M_1 = M / \lambda_1; \\ \Phi_2 &= b_1(\gamma_\mu \Psi_\mu) + b_2 \Psi_0 + b_3(\partial_\mu \Psi_\mu), \quad (\hat{\partial} + M_2)\Phi_2 = 0, \quad M_2 = M / \lambda_2; \\ \Phi_3 &= r_1(\gamma_\mu \Psi_\mu) + r_2 \Psi_0 + r_3(\partial_\mu \Psi_\mu), \quad (\hat{\partial} + M_3)\Phi_3 = 0, \quad M_3 = M / \lambda_3. \end{aligned}$$

Теперь рассмотрим эту модель, когда присутствует внешнее электромагнитное поле. Следует вернуться к системе (1) и удлинить производную стандартным способом: $D_\mu = \partial_\mu - ieA_\mu(x)$. Так, получаем

$$c_2 \hat{D} \Psi_0 - \frac{4ic_4}{\sqrt{6}} \left[(D_\mu \Psi_\mu) - \frac{1}{4} \hat{D}(\gamma_\mu \Psi_\mu) \right] + M \Psi_0 = 0, \quad (6a)$$

$$\left(c_1 + \frac{c_3}{\sqrt{6}} \right) \hat{D}(\gamma_\mu \Psi_\mu) - \frac{4c_3}{\sqrt{6}} (D_\mu \Psi_\mu) + M(\gamma_\mu \Psi_\mu) = 0, \quad (6b)$$

$$\begin{aligned} & - \frac{2fc_3^*}{\sqrt{6}} \left[\frac{3}{4} D^2 - \frac{1}{4} (-ieF_{\lambda\rho}) \sigma_{\lambda\rho} \right] (\gamma_\mu \Psi_\mu) + \\ & + \frac{2igc_4^*}{\sqrt{6}} \left[\frac{3}{4} D^2 - \frac{1}{4} (-ieF_{\lambda\rho}) \sigma_{\lambda\rho} \right] \Psi_0 - \frac{M}{4} \hat{D}(\gamma_\mu \Psi_\mu) + M(D_\lambda \Psi_\lambda) = 0. \end{aligned} \quad (6c)$$

Уравнение (6с) содержит оператор второго порядка D^2 . Используя первое и второе уравнения, можно исключить этот оператор из третьего уравнения. Используя введенные ранее обозначения $A_i, B_i, R_i, i = 1, 2, 3$, получаем систему уравнений 1-го порядка:

$$\begin{aligned} A_1 \hat{D} \bar{\Phi}_1 + B_1 \hat{D} \bar{\Phi}_2 + R_1 \hat{D} \bar{\Phi}_3 + M \bar{\Phi}_1 + \frac{4f|c_3|^2}{3M} \Sigma \bar{\Phi}_1 - \frac{4igc_3c_4^*}{3M} \Sigma \bar{\Phi}_2 &= 0, \\ A_2 \hat{D} \bar{\Phi}_1 + B_2 \hat{D} \bar{\Phi}_2 + R_2 \hat{D} \bar{\Phi}_3 + M \bar{\Phi}_2 + \frac{4ifc_3^*c_4}{3M} \Sigma \bar{\Phi}_1 + \frac{4g|c_4|^2}{3M} \Sigma \bar{\Phi}_2 &= 0, \\ A_3 \hat{D} \bar{\Phi}_1 + B_3 \hat{D} \bar{\Phi}_2 + R_3 \hat{D} \bar{\Phi}_3 + M \bar{\Phi}_3 + \frac{2}{\sqrt{6}} fc_3^* \Sigma \bar{\Phi}_1 - i \frac{2}{\sqrt{6}} gc_4^* \Sigma \bar{\Phi}_2 &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\bar{\Phi}_1 = \gamma_\mu \Psi_\mu, \quad \bar{\Phi}_2 = \Psi_0, \quad \bar{\Phi}_3 = D_\mu \Psi_\mu, \quad (-ieF_{\lambda\rho}) \sigma_{\lambda\rho} = \Sigma.$$

Система уравнений (7) отличается от аналогичной системы (3) в свободном случае присутствием дополнительных слагаемых, зависящих от тензора электромагнитного поля $F_{\mu\nu}$. Из уравне-

ний (7) по уже известной методике диагонализации выводим систему уравнений для трех новых функций:

$$\begin{aligned}
 \Phi_1 &= a_1 \bar{\Phi}_1 + a_2 \bar{\Phi}_2 + a_3 \bar{\Phi}_3, \quad \Phi_2 = b_1 \bar{\Phi}_1 + b_2 \bar{\Phi}_2 + b_3 \bar{\Phi}_3, \quad \Phi_3 = r_1 \bar{\Phi}_1 + r_2 \bar{\Phi}_2 + r_3 \bar{\Phi}_3, \\
 \lambda_1 \widehat{D} \Phi_1 + M \Phi_1 + \left(a_1 \frac{4}{3} \frac{f |c_3|^2}{M} + a_2 \frac{4i}{3} \frac{fc_3^* c_4}{M} + a_3 \frac{2}{\sqrt{6}} fc_3^* \right) \Sigma \bar{\Phi}_1 + \\
 &+ \left(-a_1 \frac{4i}{3} \frac{gc_3 c_4^*}{M} + a_2 \frac{4}{3} \frac{g |c_4|^2}{M} - a_3 \frac{2i}{\sqrt{6}} gc_4^* \right) \Sigma \bar{\Phi}_2 = 0, \\
 \lambda_1 \widehat{D} \bar{\Phi}_2 + M \Phi_2 + \left(b_1 \frac{4}{3} \frac{f |c_3|^2}{M} + b_2 \frac{4i}{3} \frac{fc_3^* c_4}{M} + b_3 \frac{2}{\sqrt{6}} fc_3^* \right) \Sigma \bar{\Phi}_1 + \\
 &+ \left(-b_1 \frac{4i}{3} \frac{gc_3 c_4^*}{M} + b_2 \frac{4}{3} \frac{g |c_4|^2}{M} - b_3 \frac{2i}{\sqrt{6}} gc_4^* \right) \Sigma \bar{\Phi}_2 = 0, \\
 \lambda_1 \widehat{D} \Phi_3 + M \Phi_3 + \left(r_1 \frac{4}{3} \frac{f |c_3|^2}{M} + r_2 \frac{4i}{3} \frac{fc_3^* c_4}{M} + r_3 \frac{2}{\sqrt{6}} fc_3^* \right) \Sigma \bar{\Phi}_1 + \\
 &+ \left(-r_1 \frac{4i}{3} \frac{gc_3 c_4^*}{M} + r_2 \frac{4}{3} \frac{g |c_4|^2}{M} - r_3 \frac{2i}{\sqrt{6}} gc_4^* \right) \Sigma \bar{\Phi}_2 = 0.
 \end{aligned} \tag{8}$$

После алгебраических преобразований систему уравнений (8) приводим к форме

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 \widehat{D} \Phi_1(x) + M \Phi_1 + \frac{4c_2 c_3}{3M} \lambda_1 (\lambda_1 - c_2) \Sigma(x) [fc_3^* \bar{\Phi}_1 - igc_4^* \bar{\Phi}_2] &= 0, \\
 \lambda_2 \widehat{D} \Phi_2 + M \Phi_2 + \frac{4c_2 c_3}{3M} \lambda_2 (\lambda_2 - c_2) \Sigma(x) [fc_3^* \bar{\Phi}_1 - igc_4^* \bar{\Phi}_2] &= 0, \\
 \lambda_3 \widehat{D} \Phi_3 + M \Phi_3 + \frac{4c_2 c_3}{3M} \lambda_3 (\lambda_3 - c_2) \Sigma(x) [fc_3^* \bar{\Phi}_1 - igc_4^* \bar{\Phi}_2] &= 0.
 \end{aligned}$$

Дальше, выражая функции $\bar{\Phi}_i$ через функции Φ_j , устанавливаем окончательный вид уравнений:

$$\begin{aligned}
 \widehat{D} \Phi_1(x) + M_1 \Phi_1(x) + Y_1 \Sigma(x) \Phi(x) &= 0, \\
 \widehat{D} \Phi_2(x) + M_2 \Phi_2(x) + Y_2 \Sigma(x) \Phi(x) &= 0, \\
 \widehat{D} \Phi_3(x) + M_3 \Phi_3(x) + Y_3 \Sigma(x) \Phi(x) &= 0,
 \end{aligned}$$

где использованы обозначения

$$\begin{aligned}
 Y_i &= \frac{4c_3}{3M} c_2 (\lambda_i - c_2), \quad \Phi(x) = L_1 \Phi_1(x) + L_2 \Phi_2(x) + L_3 \Phi_3(x), \\
 L_1 &= \frac{-L |c_4|^2 - L |c_3|^2 + c_2^2 - c_2 (\lambda_2 + \lambda_3) + \lambda_2 \lambda_3}{L c_2 c_3 (\lambda_1 - \lambda_2) (\lambda_1 - \lambda_3)}, \\
 L_2 &= \frac{-L |c_4|^2 - L |c_3|^2 + c_2^2 - c_2 (\lambda_3 + \lambda_1) + \lambda_3 \lambda_1}{L c_2 c_3 (\lambda_2 - \lambda_3) (\lambda_2 - \lambda_1)}, \\
 L_3 &= \frac{-L |c_4|^2 - L |c_3|^2 + c_2^2 - c_2 (\lambda_1 + \lambda_2) + \lambda_1 \lambda_2}{L c_2 c_3 (\lambda_3 - \lambda_1) (\lambda_3 - \lambda_2)}.
 \end{aligned}$$

Обобщим эту модель на случай риманова пространства–времени. Для этого нужно сделать несколько изменений. Вместо *ict*-метрики в пространстве Минковского, в случае риманова пространства используем метрический тензор $g_{\alpha\beta}(x)$. Нужно выполнить замену $M \rightarrow iM$. Удлиненные производные заменяются на более общие [11]:

$$D_\alpha(x) = \nabla_\alpha + \Gamma_\alpha(x) + ieA_\alpha(x), \quad \widehat{D} = \gamma^\alpha(x)D_\alpha(x),$$

где $\Gamma_\alpha(x)$ – биспинорная связность и $\gamma^\alpha(x) = \gamma^a e_{(a)}^\alpha(x)$. При обобщении уравнений нужно учитывать тождества [11]

$$\begin{aligned} \gamma^\rho(x)D_\beta &= D_\beta\gamma^\rho(x), \\ D_\sigma(x)g_{\alpha\beta}(x) &= g_{\alpha\beta}(x)D_\sigma(x), \quad \widehat{D}\widehat{D} = -\Sigma(x), \\ D^2 &= D^\alpha D_\alpha, \quad \Sigma(x) = -ieF_{\alpha\beta}\sigma^{\alpha\beta}(x) + \frac{R(x)}{4}, \end{aligned} \quad (9)$$

$R(x)$ – скаляр Риччи.

Проведенный анализ остается в основном тем же самым. Общековариантная система уравнений для фермиона с тремя массовыми параметрами представляется так:

$$\begin{aligned} i\gamma^\alpha(x)[\partial_\alpha + \Gamma_\alpha(x) + ieA_\alpha(x)]\Phi_1(x) - M_1\Phi_1(x) + Y_1\Sigma(x)\Phi(x) &= 0, \\ i\gamma^\alpha(x)[\partial_\alpha + \Gamma_\alpha(x) + ieA_\alpha(x)]\Phi_2(x) - M_2\Phi_2(x) + Y_2\Sigma(x)\Phi(x) &= 0, \\ i\gamma^\alpha(x)[\partial_\alpha + \Gamma_\alpha(x) + ieA_\alpha(x)]\Phi_3(x) - M_3\Phi_3(x) + Y_3\Sigma(x)\Phi(x) &= 0, \end{aligned}$$

где использованы прежние обозначения

$$Y_i = \frac{4c_3}{3M}c_2(\lambda_i - c_2), \quad \Phi(x) = L_1\Phi_1(x) + L_2\Phi_2(x) + L_3\Phi_3(x).$$

Отметим, что поскольку в величине $\Sigma(x)$ (см. (9)) присутствует скаляр Риччи $R(x)$, то даже в отсутствие электромагнитного поля обобщенная система уравнений зацепляет три биспинора в единую систему при условии, что $R(x) \neq 0$:

$$\begin{aligned} i\gamma^\alpha(x)[\partial_\alpha + \Gamma_\alpha(x)]\Phi_1(x) - M_1\Phi_1(x) + Y_1\frac{R(x)}{4}\Phi(x) &= 0, \\ i\gamma^\alpha(x)[\partial_\alpha + \Gamma_\alpha(x)]\Phi_2(x) - M_2\Phi_2(x) + Y_2\frac{R(x)}{4}\Phi(x) &= 0, \\ i\gamma^\alpha(x)[\partial_\alpha + \Gamma_\alpha(x)]\Phi_3(x) - M_3\Phi_3(x) + Y_3\frac{R(x)}{4}\Phi(x) &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

В заключение специально отметим, что поскольку в любом майорановском базисе выполняются равенства

$$[i\gamma^\alpha(x)]^* = i\gamma^\alpha(x), \quad \Gamma_\alpha^*(x) = \Gamma_\alpha(x),$$

то система (10) допускает ограничение к случаю вещественных (и чисто мнимых) биспиноров Φ_i , т. е. к случаю майорановской частицы с тремя массовыми параметрами.

Список использованных источников

1. Гинзбург, В. Л. О волновых уравнениях для частиц с переменным спином / В. Л. Гинзбург, Я. А. Смородинский // ЖЭТФ. – 1943. – Т. 13. – С. 274.
2. Гельфанд, И. М. Общие релятивистски инвариантные уравнения и бесконечномерные представления группы Лоренца / И. М. Гельфанд, А. М. Яглом // ЖЭТФ. – 1948. – Т. 18, вып. 8. – С. 703–733.
3. Bhabha, H. J. An equation for a particle with two mass states and positive charge density / H. J. Bhabha // Philosophical Magazine. – 1952. – Vol. 43 (336). – P. 33–47. <https://doi.org/10.1080/14786440108520964>
4. Федоров, Ф. И. Обобщенные релятивистские волновые уравнения / Ф. И. Федоров // Докл. АН СССР. – 1952. – Т. 82, № 1. – С. 37–40.
5. Ginzburg, V. L. On relativistic wave equations with a mass spectrum / V. L. Ginzburg // Acta Phys. Pol. – 1956. – Vol. 15. – P. 163–175.
6. Shimazu, H. A relativistic wave equation for a particle with two mass states of spin 1 and 0 / H. Shimazu // Progress of Theoretical Physics. – 1956. – Vol. 16, N 4. – P. 287–298. <https://doi.org/10.1143/ptp.16.287>
7. Федоров, Ф. И. Группа Лоренца / Ф. И. Федоров. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
8. Плетюхов, В. А. Релятивистские волновые уравнения и внутренние степени свободы / В. А. Плетюхов, В. М. Редьков, В. И. Стражев. – Минск: Беларус. навука, 2015. – 328 с.

9. Elementary particles with internal structure in external field / V. V. Kisel [et al.]. – USA: Nova Science Publishers, Inc., 2018.

10. Spin 1/2 particle with two mass states: interaction with external fields / V. V. Kisel [et al.] // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. – 2017. – Vol. 20, N 4. – P. 404–423.

11. Редьков, В. М. Поля частиц в римановом пространстве и группа Лоренца / В. М. Редьков. – Минск: Беларуская навука, 2009. – 486 с.

References

1. Ginzburg V. L., Smorodinskiy Ya. A. On wave equations for particles with variable spin. *Zhurnal Eksperimentalnoy i Teoreticheskoy Fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1943, vol. 13, pp. 274 (in Russian).

2. Gelfand I. M., Yaglom A. M. General relativistically invariant equations and infinite-dimensional representations of the Lorentz group. *Zhurnal Eksperimentalnoy i Teoreticheskoy Fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1948, vol. 18, no. 8, pp. 703–733 (in Russian).

3. Bhabha H. J. An equation for a particle with two mass states and positive charge density. *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1952, vol. 43, no. 336, pp. 33–47. <https://doi.org/10.1080/14786440108520964>

4. Fedorov F. I. Generalized relativistic wave equations. *Doklady Akademii nauk SSSR = Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 1952, vol. 82, no. 1, pp. 37–40 (in Russian).

5. Ginzburg V. L. On relativistic wave equations with a mass spectrum. *Acta Physica Polonica*, 1956, vol. 15, pp. 163–175.

6. Shimazu H. A relativistic wave equation for a particle with two mass states of spin 1 and 0. *Progress of Theoretical Physics*, 1956, vol. 16, no. 4, pp. 287–298. <https://doi.org/10.1143/ptp.16.287>

7. Fedorov F. I. *Lorentz group*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 384 p. (in Russian).

8. Pletyukhov V. A., Red'kov V. M., Strazhev V. I. *Relativistic wave equations and internal degrees of freedom*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2015. 328 p. (in Russian).

9. Kisel V. V., Ovsyuk E. M., Balan V., Veko O. V., Red'kov V. M. *Elementary particles with internal structure in external field*. USA, Nova Science Publishers, Inc., 2018.

10. Kisel V. V., Pletyukhov V. A., Gilewsky V. V., Ovsyuk E. M., Veko O. V., Red'kov V. M. Spin 1/2 particle with two mass states: interaction with external fields. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 404–423.

11. Red'kov V. M. *Field particles in Riemannian space and the Lorentz group*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2009. 496 p. (in Russian).

Информация об авторах

Кисель Василий Васильевич – канд. физ.-мат. наук, доцент. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Vasily_bspu@mail.ru.

Плетюхов Владимир Анестиевич – д-р физ.-мат. наук, профессор. Брестский государственный университет им. А. С. Пушкина (ул. Космонавтов, 21, 224016, Брест, Республика Беларусь). E-mail: terphys@brsu.brest.by.

Овсюк Елена Михайловна – канд. физ.-мат. наук, доцент. Мозырский государственный педагогический университет им. И. П. Шамякина (ул. Студенческая, 28, 247760, Мозырь, Республика Беларусь). E-mail: e.ovsiyuk@mail.ru.

Войнова Янина Александровна – аспирант. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: voinyuschka@mail.ru.

Вeko Ольга Владимировна – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vekoolga@mail.ru.

Редьков Виктор Михайлович – д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (пр. Независимости, 68, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: redkov@ifanbel.bas-net.by.

Information about the authors

Kisel Vasily Vasilievich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate professor. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Vasily_bspu@mail.ru.

Pletyukhov Vladimir Anestievich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor. Brest State University named after A. S. Pushkin (12, Kosmonavtov Str., 224016, Brest, Republic of Belarus). E-mail: terphys@brsu.brest.by.

Ovsyuk Elena Mikhaylovna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate professor. Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin (28, Studencheskaya Str, 247760, Mozyr, Republic of Belarus). E-mail: e.ovsiyuk@mail.ru.

Voynova Yanina Akeksandrovna – Postgraduate student. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Science of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: voinyuschka@mail.ru.

Veko Olga Vladimirovna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Researcher. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Science of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vekoolga@mail.ru.

Red'kov Viktor Mikhaylovich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Chief researcher. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Science of Belarus (68, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: redkov@ifanbel.bas-net.by.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 530.12

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-668-673>

Поступило в редакцию 15.10.2018

Received 15.10.2018

С. О. Комаров, А. К. Горбачевич, А. Н. Тарасенко*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь.***КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА,
ДВИЖУЩЕГОСЯ В ПОЛЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ***(Представлено членом-корреспондентом Л. М. Томильчиком)*

Аннотация. Для точечного источника электромагнитного излучения, движущегося в гравитационном поле вращающейся черной дыры, описываемой метрикой Керра, разработан метод вычисления красного смещения как функции времени удаленного наблюдателя. В отличие от широко представленных в литературе способов, граничная задача для траектории луча решена не численным подбором параметров, а на основе приближенных аналитических выражений для изотропных геодезических в метрике Керра. Предложенный метод проиллюстрирован на примере модельной задачи с параметрами, соответствующими реальным звездам, движущимся в непосредственной близости сверхмассивной черной дыры, находящейся в центре нашей Галактики. На этом же примере показана эффективность и хорошая точность данного метода.

Ключевые слова: метрика Керра, релятивистское красное смещение, гравитационное линзирование, геодезические

Для цитирования. Комаров, С. О. Красное смещение излучения точечного источника, движущегося в поле вращающейся черной дыры / С. О. Комаров, А. К. Горбачевич, А. Н. Тарасенко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 668–673. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-668-673>

Stanislav O. Komarov, Alexander K. Gorbatsievich, Alexander N. Tarasenko*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus***REDSHIFT OF RADIATION OF A POINT-LIKE SOURCE MOVING IN THE EXTERNAL KERR FIELD***(Communicated by Corresponding Member Lev M. Tomilchik)*

Abstract. The method of calculation of redshift of light from a point-like source that moves in the gravitational field of the Kerr black hole as a function of time of observation is developed. The widely presented in literature methods for solving the boundary problem are based on a numerical selection of parameters of geodesics. In contrast, the proposed method is based on approximate analytical expressions for isotropic geodesics in the Kerr metric. The proposed method is illustrated by the example of a model problem with parameters corresponding to real stars moving in the immediate vicinity of a super-massive black hole located in the Center of our Galaxy. The same example shows the efficiency and good accuracy of this method.

Keywords: Kerr metric, relativistic redshift, gravitational lensing, geodesics

For citation: Komarov S. O., Gorbatsievich A. K., Tarasenko A. N. Redshift of radiation of a point-like source moving in the external Kerr field. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 668–673 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-668-673>

Введение. На протяжении десятков лет проводились исследования движения звезд в окрестности центра нашей Галактики, в результате которых было установлено, что в этой области находится сверхмассивная черная дыра массой $m_{\text{ВН}} \approx 4 \cdot 10^6 m_{\text{С}}$ [1; 2]; $m_{\text{С}}$ – масса Солнца. Одним из крупнейших скоплений звезд в непосредственной окрестности этой черной дыры является S-кластер [3]. Наблюдения за звездами из этого кластера в силу их близости к черной дыре позволяют проверять различные теории гравитации для сильных гравитационных полей [4; 5].

В рамках общей теории относительности, наиболее общее гравитационное поле вращающейся черной дыры описывается метрикой Керра, а одним из параметров, доступных для измерений и дающих информацию о движении звезд, является красное смещение. Метод расчета красного смещения электромагнитного излучения звезды, движущейся в гравитационном поле Керра, как функции времени наблюдения, разработан в настоящей работе.

Красное смещение. В приближении геометрической оптики [6], мировые линии света $x^i = x^i(\lambda)$ являются изотропными геодезическими: $k^i_{;j}k^j = 0$, $k_i k^i = 0$, где $k^i = dx^i / d\lambda$ – волновой 4-вектор; λ – аффинный параметр. Две задачи: о вычислении красного смещения и вычислении интервалов времени между приходящими импульсами пульсара, могут быть сведены к одной, если учесть соотношение [7]

$$t_{TOA}^{(N)} = t_{TOA}^{(N-1)} + T_P(1+z),$$

где $t_{TOA}^{(N)}$ – время прихода N -го импульса в системе отсчета наблюдателя; T_P – период испускания импульсов в системе отсчета источника, а z – красное смещение: $z = (k_{si}u_s^i) / (k_{oj}u_o^j) - 1$, где k_{si} и k_{oj} – волновой 4-вектор в точке испускания и в точке приема сигнала соответственно, а u_s^i и u_o^j – векторы 4-скорости источника и приемника соответственно.

Для описания движения звезды мы будем рассматривать ее как пробную точечную массу, мировая линия которой представляет собой времениподобную геодезическую. Для вычисления красного смещения в некоторый момент времени необходимо найти изотропную геодезическую, пересекающую как мировую линию источника, так и мировую линию наблюдателя. Таким образом, поиск этой изотропной геодезической сводится к решению граничной задачи.

Метрика Керра. В координатах Бойера–Лидквиста $\{r, \theta, \varphi, t\}$, метрика Керра, как известно, имеет следующий вид:

$$ds^2 = -\rho^2 \frac{\Delta}{\Sigma^2} c^2 dt^2 + \frac{\Sigma^2}{\rho^2} \left[d\varphi - \left(\frac{2aMr}{\Sigma^2} \right) c dt \right]^2 \sin^2 \theta + \frac{\rho^2}{\Delta} dr^2 + \rho^2 d\theta^2,$$

где $\rho^2 = r^2 + a^2 \cos^2 \theta$; $\Delta = r^2 - 2Mr + a^2$; $\Sigma^2 = (r^2 + a^2)^2 - a^2(r^2 + a^2 - 2Mr) \sin^2 \theta$; a – параметр Керра (удельный момент импульса источника), а $M = Gm / c^2$ – масса источника в геометрических единицах. Уравнения геодезической в случае метрики Керра могут быть приведены к виду, допускающему разделение переменных [8; 9]:

$$dr / d\tau_M = \pm \sqrt{R(r)}, \quad d \cos \theta / d\tau_M = \pm \sqrt{\Theta(\cos \theta)}, \tag{1}$$

$$d\varphi / d\tau_M = \Phi(r, \cos \theta), \quad dt / d\tau_M = T(r, \cos \theta). \tag{2}$$

Явные выражения для функций $R(r)$, $\Theta(\cos \theta)$, $\Phi(r, \cos \theta)$, $T(r, \cos \theta)$ приведены в [9], $\tau_M = \int_0^\tau d\tau / (r^2 + a^2 \cos^2 \theta)$ – так называемый временной параметр Мино. Для получения времениподобной геодезической, описывающей движение источника, систему уравнений (1)–(2) решим численно. Для записи изотропных же геодезических, описывающих распространение света, нам необходимо аналитическое решение, приведенное в [8; 9]. В рамках рассматриваемой модели, приближение $a / r_p \ll 1$, где r_p – минимальное значение координаты r луча, является оправданным с физической точки зрения, чем мы и воспользуемся в дальнейшем, записывая решения системы (1)–(2) в линейном приближении по этому параметру. Найдем точный аналитический вид зависимости $\tau_M(\theta)$ из (1). Получим из (1) (здесь $1 / u = r$):

$$\frac{du}{d\tau_M} = -a^2 \eta u^4 + 2[\eta + (\xi - a)^2] u^3 + (a^2 - \xi^2 - \eta) u^2 + 1, \tag{3}$$

где $\xi = L / E$, $\eta = Q / E^2$. В нашем приближении можно пренебречь слагаемым $-a^2 \eta u^4$ в правой части (3). В дальнейшем подробно рассмотрим лишь те решения, для которых $\eta > 0$ и существует перигеум. Тогда из (3) и найденной функции $\tau_M(\theta)$ следует

$$\frac{1}{r_s A_u} = 1 + 2 \sin\left(\varepsilon_u - \frac{2\pi}{3}\right) + 2\sqrt{3} \cos(\varepsilon_u) \times$$

$$\times sn^2 \left\{ \frac{i \sqrt{\cos\left(\varepsilon_u - \frac{\pi}{3}\right)}}{\sqrt{2\sqrt{3} \cos \varepsilon}} \left[F \left[\arccos \left(\frac{a \cos \theta_s}{\cos\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \sqrt{a^2 - \xi^2 - \eta}} \right), K_\theta \right] - \right. \right. \quad (4)$$

$$\left. \left. - F \left[\arccos \left(\frac{a \cos \theta_o}{\cos\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \sqrt{a^2 - \xi^2 - \eta}} \right), K_\theta \right], K_u \right\}.$$

Здесь $\{r_s, \theta_s, \varphi_s\}$ и $\{r_o, \theta_o, \varphi_o\}$ – пространственные координаты источника и наблюдателя соответственно. Кроме того, здесь введены следующие обозначения:

$$A_u = -\frac{1}{6} \frac{a^2 - \xi^2 - \eta}{\eta + (\xi - a)^2}, \quad \varepsilon = \pi - \arcsin[2a\sqrt{-\eta} / (a^2 - \xi^2 - \eta)],$$

$$\varepsilon_u = \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arcsin \left[1 + \frac{54(\eta + (\xi - a)^2)^2}{(a^2 - \xi^2 - \eta)^3} \right], \quad \text{при } \frac{54(\eta + (\xi - a)^2)^2}{(a^2 - \xi^2 - \eta)^3} > -2,$$

$$\varepsilon_u = -\frac{2\pi}{3} - \frac{1}{3} \arcsin \left(1 + \frac{54(\eta + (\xi - a)^2)^2}{(a^2 - \xi^2 - \eta)^3} \right), \quad \text{при } \frac{54(\eta + (\xi - a)^2)^2}{(a^2 - \xi^2 - \eta)^3} < -2.$$

Аналогичные формулы без труда могут быть получены и для $\eta < 0$, и для траекторий, не имеющих перигентра. Погрешность вычисления обратного радиуса Δu_s по формуле (4) для случая $\xi^2 + \eta \gg a^2$ удовлетворяет условию $|\Delta u_s| < \frac{4\eta a^2}{\xi^2 + \eta - a^2} \frac{1}{r_p^3}$. Тогда из (2):

$$\frac{1}{E} \frac{d\varphi}{d\tau_M} = \frac{\xi}{1 - \cos^2 \theta} + \frac{2ra}{r^2 - 2r} - \frac{\xi a^2}{r^2 - 2r} - \frac{2ra^3}{(r^2 - 2r)^2} + O\left(\frac{a^4}{r^4}\right). \quad (5)$$

Нам достаточно сохранить в правой части (5) первые два слагаемых. Получим решение

$$\varphi_s = \frac{a\sqrt{2\sqrt{3}}}{\sqrt{\cos\left(\varepsilon_u - \frac{\pi}{3}\right)(\xi^2 + \eta - a^2)}} \times$$

$$\times \left(\frac{1}{1 - A_u \left(2 + 4 \sin\left(\varepsilon_u - \frac{2\pi}{3}\right) \right)} \pi \left[\Xi(\theta_s), \frac{4\sqrt{3} \cos \varepsilon_u}{\frac{1}{A_u} - 2 - 4 \sin\left(\varepsilon_u - \frac{2\pi}{3}\right)}, K_u \right] - F[\Xi(\theta_s), K_u] \right) + \quad (16)$$

$$+ \frac{a^2 \xi}{\left(a^2 - \cos^2\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \right) \sqrt{\cos \varepsilon (a^2 - \xi^2 - \eta)}} \pi \left[\arccos \left(\frac{a \cos \theta_s}{\cos\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \sqrt{a^2 - \xi^2 - \eta}} \right), \frac{\xi^2 + \eta - a^2}{\xi^2 + \eta + a^2 \operatorname{tg}^2\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}, K_\theta \right].$$

Здесь использовано следующее обозначение $\Xi(\theta_s) = \arcsin \sqrt{\frac{u(\theta_s) / A_u - 1 - 2 \sin(\varepsilon_u - 2\pi/3)}{2\sqrt{3} \cos \varepsilon_u}}$.

Погрешность в данном выражении можно оценить как $\Delta \varphi_s / \varphi_s < a^2 / r_p^2$. Из оценок следует, что приближение может оказаться неверным лишь для траекторий луча, очень близко подходящих к черной дыре, а также для значений $\xi \approx a$.

Описанная ранее граничная задача сводится к решению следующей системы уравнений относительно прицельных параметров луча ξ и η :

$$\frac{1}{r_s(\tilde{\theta}, \xi, \eta)} = \frac{1}{\tilde{r}}, \quad \varphi_s(\tilde{\theta}, \xi, \eta) = \tilde{\varphi}.$$

Здесь $\{\tilde{r}, \tilde{\theta}, \tilde{\varphi}\}$ – пространственные координаты источника в рассматриваемый момент времени. Используя полученные значения прицельных параметров, найдем компоненты волнового вектора, необходимые для вычисления красного смещения.

До сих пор данная задача решалась [4; 5] посредством составления таблиц соответствия прицельных параметров и положения источника. В нашей работе использованы аналитические выражения (4) и (6), благодаря чему решение граничной задачи свелось не к поиску значения в таблице, что может привести к большой погрешности, а к решению системы уравнений. Чтобы оценить то, каким образом выполненные приближения в функциях φ_s и r_s скажутся на конечном результате (т. е. вычисленной величине красного смещения), поступим следующим образом.

Проинтегрируем численно точные уравнения для изотропной геодезической в метрике Керра (1), (2), в обратном направлении (т. е. от наблюдателя к источнику), используя заданные величины прицельных параметров $\xi = L/E$ и $\eta = Q/E^2$, где L, E – интегралы движения вдоль изотропной геодезической, связанные с аксиальной симметрией и стационарностью метрики Керра соответственно, а интеграл движения Q (постоянная Картера) связан с существованием тензора Киллинга в метрике Керра [8]. Для произвольного значения τ_M получим значения координат источника $\{r_s, \theta_s, \varphi_s\}$. Результаты численного решения граничной задачи представлены в таблице.

Результы сравнения вычисленных прицельных параметров и их точных значений для некоторых траекторий ($a = 0,9$)

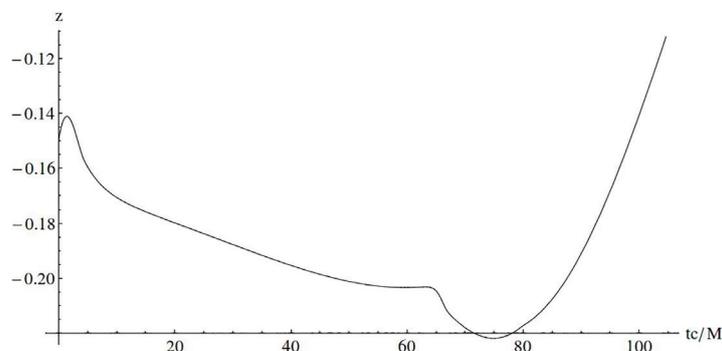
The results of the comparison of calculated impact parameters and the exact values of it for the certain trajectory ($a = 0,9$)

Координаты источника Source coordinates $\{r_s, \theta_s, \varphi_s\}$	Вычисленные прицельные параметры Calculated impact parameters	
	ξ	η
Траектория луча света не проходит перигентр. $\theta_0 = 1,45$, точные значения прицельных параметров: $\xi = 5, \eta = 2$ The trajectory of light does not pass the pericenter. $\theta_0 = 1.45$, the exact values of impact parameters: $\xi = 5, \eta = 2$		
{10,4, 0,59, 1,51}	4,986	2,0003
{25,2, 1,50, 1,20}	4,998	1,9998
{125, 1,46, 0,04}	4,9999	1,99999
$\theta_0 = 1,55$, точные значения прицельных параметров: $\xi = 6, \eta = 3$ $\theta_0 = 1.55$, the exact values of impact parameters: $\xi = 6, \eta = 3$		
{20,3, 1,64, 0,30}	5,996	3,0001
{33,5, 1,60, 1,81}	5,999	3,00001
{50,1, 1,58, 0,12}	5,999	3,00000
Траектория луча света проходит перигентр. $\theta_0 = 1,45$, точные значения прицельных параметров: $\xi = 5, \eta = 2$ The trajectory of light pass the pericenter. $\theta_0 = 1.45$, the exact values of impact parameters: $\xi = 5, \eta = 2$		
{14,5, 1,50, 4,07}	5,3	3,05
{49,5, 1,44, 4,33}	5,35	2,82
{3846, 1,41, 4,43}	5,4	2,73
$\theta_0 = 1,55$, точные значения прицельных параметров: $\xi = 6, \eta = 3$ $\theta_0 = 1.55$, the exact values of impact parameters: $\xi = 6, \eta = 3$		
{24,8, 1,44, 3,85}	6,28	4,07
{1250, 1,38, 4,09}	6,36	3,81

Зная погрешность в вычислении прицельных параметров $\Delta\xi$ и $\Delta\eta$, погрешность вычисленного красного смещения Δz можно оценить по формуле

$$\Delta z \approx (\Delta\xi + \Delta\eta / \sqrt{\xi^2 + \eta})z. \tag{7}$$

Из численных примеров (таблица) и (7) следует, что предложенный в данной работе метод позволяет вычислять красное смещение с хорошей точностью при рассмотрении траекторий света 0-го порядка (им соответствуют примеры, когда $\varphi_s < \pi$), определяющих излучение с наибольшей интенсивностью [10]. Результаты вычислений красного смещения для рассмотренной модели приведены на рисунке.



Красное смещение как функция времени наблюдения. Параметры модельной двойной системы в единицах ее полной массы ($c = 1$): энергия $E = 0,984$, момент импульса $L = 4,9M$, постоянная Картера $Q = 3,0M^2$. Параметр Керра $a = 0,1M$
 Redshift as a function of time of observation. Parameters of the model binary system per unit mass are ($c = 1$): energy $E = 0.984$, angular momentum $L = 4.9M$, Carter constant $Q = 3.0M^2$. Kerr parameter $a = 0.1M$

Заключение. Предложенный в работе метод позволяет вычислить красное смещение излучения звезды, движущейся в гравитационном поле вращающейся черной дыры. Из рассмотренных примеров (таблица, рисунок) следует, что на величину красного смещения влияют как параметры черной дыры, так и траектория источника. В отличие от случая статической (не вращающейся) черной дыры [11], функция красного смещения для вращающейся черной дыры имеет более сложный характерный вид.

Список использованных источников

1. Genzel, R. The Galactic Center massive black hole and nuclear star cluster / R. Genzel, F. Eisenhauer, S. Gillessen // *Rev. Mod. Phys.* – 2010. – Vol. 82, N 4. – P. 3121–3195. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.82.3121>
2. Morris, M. R. The environment of the Galaxy's central black hole / M. R. Morris. – 2003. – P. 95–122. <https://doi.org/10.1887/0750308370/b1153c4>
3. An Update on Monitoring Stellar Orbits in the Galactic Center / S. Gillessen [et al.] // *Astrophys. J.* – 2017. – Vol. 837, N 1. – 19 p. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa5c41>
4. Zhang, F. On testing the Kerr metric of the massive black hole in the Galactic Center via stellar orbital motion: full general relativistic treatment / F. Zhang, Y. Lu, Q. Yu // *Astrophys. J.* – 2015. – Vol. 809, N 2. – 27 p. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/809/2/127>
5. General relativistic effects on the orbit of the S2 star with GRAVITY / M. Grould [et al.] // *Astronomy and Astrophysics.* – 2017. – Vol. 608. – A60 (22 p.). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731148>
6. Stephani, H. *Relativity. An introduction to Spetial and General Relativity* / H. Stephani. – Cambridge University Press, 2004. – 3 ed. – 396 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511616532>
7. Zhang, F. Probing the Spinning of the Massive Black Hole in the Galactic Center via Pulsar Timing: A Full Relativistic Treatment / F. Zhang, P. Saha // *Astrophys. J.* – 2017. – Vol. 849, N 1. – 15 p. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8f47>
8. Чандрасекар, С. Математическая теория черных дыр: в 2 ч. / С. Чандрасекар; пер. с англ. В. А. Березкиной. – М.: Мир, 1986. – Ч. 2. – 355 с.
9. Dexter, J. A fast new public code for computing photon orbits in a Kerr spacetime / J. Dexter, E. Agol // *Astrophys. J.* – 2009. – Vol. 696, N 2. – P. 1616–1629. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/696/2/1616>
10. Bisnovatyi-Kogan, G. S. Strong gravitational lensing by schwarzschild black holes / G. S. Binovatyi-Kogan, Yu. O. Tsupko // *Astrophysics.* – 2008. – Vol. 51, N 1. – P. 99–111. <https://doi.org/10.1007/s10511-008-0011-8>
11. Komarov, S. Redshift of a compact binary star in the neighbourhood of a supermassive black hole / S. Komarov, A. Gorbatsievich, A. Tarasenko // *General Relativity and Gravitation.* – 2018. – Vol. 50. – P. 132. <https://doi.org/10.1007/s10714-018-2461-6>

References

1. Genzel R., Eisenhauer F., Gillessen S. The Galactic Center massive black hole and nuclear star cluster. *Reviews of Modern Physics*, 2010, vol. 82, no. 4, pp. 3121–3195. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.82.3121>

2. Morris, M. R. The environment of the Galaxy's central black hole. 2003, pp. 95–122. <https://doi.org/10.1887/0750308370/b1153c4>
3. Gillessen S., Plewa P. M., Eisenhauer F., Sari R., Waisberg I., Habibi M., Pfuhl O., George E., Dexter J., Fellenberg S. von, Ott T., Genzel R. An Update on Monitoring Stellar Orbits in the Galactic Center. *Astrophysical Journal*, 2017, vol. 837, no. 1. 19 p. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa5c41>
4. Zhang F., Lu Y., Yu Q. On testing the Kerr metric of the massive black hole in the Galactic Center via stellar orbital motion: full general relativistic treatment. *Astrophysical Journal*, 2015, vol. 809, no. 2. 27 p. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/809/2/127>
5. Grould M., Vincent F. H., Paumard T., Perrin G. General relativistic effects on the orbit of the S2 star with GRAVITY. *Astronomy and Astrophysics*, 2017, vol. 608, A60 (22 p.). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731148>
6. Stephani H. *Relativity. An introduction to Spetial and General Relativity*, 3d ed. Cambridge University Press, 2004. 396 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511616532>
7. Zhang F., Saha P. Probing the Spinning of the Massive Black Hole in the Galactic Center via Pulsar Timing: A Full Relativistic Treatment. *Astrophysical Journal*, 2017, vol. 849, no. 1. 15 p. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8f47>
8. Chandrasekhar S. *The mathematical theory of black holes*. New York, Oxford University Press, 1983. 355 p.
9. Dexter J., Agol E. A fast new public code for computing photon orbits in a Kerr spacetime. *Astrophysical Journal*, 2009, vol. 696, no. 2, pp. 1616–1629. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/696/2/1616>
10. Bisnovatyi-Kogan G. S., Tsupko Yu. O. Strong gravitational lensing by schwarzschild black holes. *Astrophysics*, 2008, vol. 51, no. 1, pp. 99–111. <https://doi.org/10.1007/s10511-008-0011-8>
11. Komarov S., Gorbatsievich A., Tarasenko A. Redshift of a compact binary star in the neighbourhood of a supermassive black hole. *General Relativity and Gravitation*, 2018, vol. 50, pp. 132. <https://doi.org/10.1007/s10714-018-2461-6>

Информация об авторах

Комаров Станислав Олегович – ассистент. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: staskomarov@tut.by.

Горбачевич Александр Константинович – д-р физ.-мат. наук, профессор. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gorbatsievich@bsu.by.

Тарасенко Александр Николаевич. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tarasenk@tut.by.

Information about the authors

Komarov Stanislav Olegovich – Assistant. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: staskomarov@tut.by.

Gorbatsievich Alexander Konstantinovich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gorbatsievich@bsu.by.

Tarasenko Alexander Nikolaevich. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tarasenk@tut.by.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 536.46:534.29

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-674-684>

Поступило в редакцию 27.08.2018

Received 27.08.2018

Академик В. В. Клубович¹, М. М. Кулак², Б. Б. Хина³¹*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*²*Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск, Республика Беларусь*³*Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

ВЛИЯНИЕ МОЩНОГО УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ТУГОПЛАВКИХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНА ПРИ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕМСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ СИНТЕЗЕ

Аннотация. На разработанной экспериментальной установке исследовано влияние ультразвуковых колебаний (УЗК) на условия теплообмена между образцом и окружающей средой. Определено влияние амплитуды УЗК на скорость и температуру горения, фазовый состав и параметры кристаллических решеток синтезированных соединений при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС) в системах Ti–C(Si,B). Выполнена оценка коэффициента теплообмена на поверхности образца при его колебаниях с ультразвуковой частотой. Рассмотрены возможные механизмы влияния УЗК на СВС-процесс. Показано, что уменьшение температуры СВС обусловлено охлаждением образца из-за вынужденной конвекции окружающего газа, а изменение фазового состава синтезируемого материала и кристаллографических параметров фаз связано с изменением условий высокотемпературного гетерогенного взаимодействия в волне СВС.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, ультразвуковые колебания, скорость и максимальная температура горения, карбид (силицид, борид) титана, фазовый состав

Для цитирования. Клубович, В. В. Влияние мощного ультразвука на процессы горения и фазовый состав тугоплавких соединений титана при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе / В. В. Клубович, М. М. Кулак, Б. Б. Хина // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 674–684. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-674-684>

Academician Vladimir V. Klubovich¹, Mikhail M. Kulak², Boris B. Khina³¹*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*²*Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus, Vitebsk, Republic of Belarus*³*Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

EFFECT OF POWERFUL ULTRASOUND ON THE COMBUSTION PROCESSES AND PHASE COMPOSITION OF REFRACTORY COMPOUNDS OF TITANIUM AT THE SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

Abstract. The effect of ultrasound oscillations (USO) on the heat transfer conditions between a specimen and environment is examined using a specially developed experimental facility. The influence of the USO amplitude on the combustion temperature and velocity as well as on the phase composition and crystal lattice parameters of the synthesized compounds is studied for the self-propagating high-temperature synthesis (SHS) in Ti–C(Si,B) systems. The heat transfer coefficient on the surface of a specimen during its oscillations with an ultrasound frequency is assessed. Possible mechanisms of the effect of USO on the SHS process are considered. It is demonstrated that a decrease in the SHS temperature is connected with cooling the specimen due to forced convection of a surrounding gas, while a change in a phase composition of the synthesized material and the crystallographic parameters of the phases occurs due to changes in the conditions of high-temperature heterogeneous interactions in the SHS wave.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, ultrasound oscillations, velocity and maximal temperature of combustion, titanium carbide (silicide, boride), phase composition

For citation: Klubovich V. V., Kulak M. M., Khina B. B. Effect of powerful ultrasound on the combustion processes and phase composition of refractory compounds of titanium at the self-propagating high-temperature synthesis. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 674–684 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-674-684>

Введение. Процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), в основе которого лежит использование энергии экзотермического взаимодействия веществ с образованием твердофазных конечных продуктов, был открыт в 1967 г. А. Г. Мержановым с соавт.¹. Синтез протекает в виде горения гетерогенной системы, а сам процесс распространения волны синтеза носит сложный характер ввиду многостадийности превращения исходных компонентов в конечные продукты, связанной с изменением агрегатного состояния веществ в волне горения, торможением химических реакций образующимися продуктами синтеза, процессами дореагирования и структурообразования конечных продуктов. Отличительной чертой процесса СВС является то, что синтез конечных продуктов происходит по необычным (с точки зрения физического материаловедения), неравновесным механизмам [1]. Этот факт выделяет процесс СВС в ряд перспективных технологий получения материалов в неравновесных условиях. Такие технологии открывают широкие возможности для создания различных материалов с заданной структурой и физико-механическими свойствами.

Несмотря на кажущуюся простоту, получить принципиальный результат, т. е. синтезировать с помощью СВС новый продукт, изготовить материал с заданными составом и свойствами – не просто. Общих представлений о процессе оказывается недостаточно, требуется глубокое понимание закономерностей горения.

Создание научных принципов управления процессами СВС и свойствами продуктов синтеза является важной задачей, стоящей перед любой новой проблемой и новым явлением. Макрокинетические характеристики процессов СВС, структура и свойства продуктов синтеза определяются множеством физических, технологических и химических свойств порошков исходных реагентов и их экзотермических смесей. Однако использование традиционных методик, предусматривающих регулирование процессов СВС путем изменения внешнего давления, начальной температуры, параметров смеси, нередко бывает ограничено. Согласно положениям синергетики [2], для неравновесной системы даже слабое воздействие может существенно изменить состояние такой системы. Поэтому для регулирования процессов горения и структурообразования конечных продуктов (даже *in situ*) необходимо использовать внешние физические воздействия. Одним из методов внешнего воздействия на процесс СВС является мощный ультразвук. Вследствие нелинейных эффектов, возникающих в веществах под воздействием ультразвуковых колебаний (УЗК), изменяются их физико-механические свойства. В литературе имеется ряд работ по влиянию УЗК на процесс СВС [3–5], но в них исследовано в основном изменение характеристик горения и его концентрационных пределов. В этих работах отсутствуют данные о влиянии ультразвука на параметры кристаллических решеток синтезированных фаз и изменение фазового состава конечного продукта в гетерогенных системах с различным количеством фаз на равновесной диаграмме состояния.

В данной работе приведены полученные авторами данные о влиянии УЗК на СВС в классических СВС-системах Ti–C, Ti–C–Ni–Mo, Ti–Si и Ti–B. Выбор исследуемых систем мотивирован тем, что конечные продукты синтеза имеют различное количество равновесных соединений согласно диаграммам состояния. В системе Ti–C имеется только одно соединение – карбид титана [6], тогда как системы Ti–Si и Ti–B многофазные, основные фазы в них Ti_3Si , Ti_3Si_3 , Ti_3Si_4 , $TiSi$, $TiSi_2$ [7] и TiB , Ti_3B_4 , TiB_2 [8] соответственно. Поэтому представляет научный и практический интерес выяснить, как воздействие ультразвука на процесс СВС, приводящее к изменениям тепловой структуры волны горения, скажется на процессах структурообразования продуктов синтеза.

С целью установления закономерностей процесса синтеза тугоплавких неорганических соединений при воздействии ультразвуковых колебаний была создана лабораторная установка². На ней можно изучать влияние УЗК на параметры волны горения: скорость, максимальную темпе-

¹ Явление волновой локализации авто-тормозящихся твердофазных реакций: диплом СССР на открытие № 287 / А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская, В. М. Шкиро // Бюл. изобретений. – 1984. – № 32. – С. 3.

² Установка для синтеза тугоплавких соединений: пат. 4319 У Респ. Беларусь, МПК (2006) В 22F 3/00 / В. В. Клубович, М. М. Кулак, Л. Л. Платонов; заяв. ИТА НАН Беларуси, г. Витебск – u20070417, заявл. 06.08.2007, опубл. 30.04.2008 // Официальный бюллетень. – 2008. – № 2(61). – С. 139.

ратуру горения при изменении интенсивности подводимых УЗ-колебаний и варьировании соотношения компонентов в исходной смеси.

Методика подготовки и синтеза исследуемых образцов описана в [9]. В данной части работы решали следующие задачи:

1. Исследовать влияние УЗК на условия теплообмена между образцом и окружающей средой.
2. Экспериментально исследовать изменения скорости и максимальной температуры горения при синтезе соединений титана методом СВС при наложении УЗК.
3. Изучить влияние УЗК на кристаллическую структуру синтезированных фаз, фазовый состав и теплоемкость продуктов синтеза.

Материалы и методы исследования. Для приготовления исходной шихты использовали порошки, характеристики которых приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Характеристики исходных порошков

Table 1. Characteristics of original powders

Исходный компонент Original component	Марка Mark	Размер частиц порошка, мкм Size of powder particles, μm
Титан	ПТМ	<100
Титан	ПТОМ	<50
Ламповая сажа	ПМ-16Э	0,1
Бор аморфный		удельная поверхность 16,5 м ² /г
Кремний полупроводниковый	КПС-3	<63
Никель	ПНК-2	<10
Молибден	МПЧ	<10

Экспериментальное исследование взаимодействия УЗК с негорящими исходными образцами исследуемых систем проводили методом термографического анализа [10] исходных смесей при варьировании соотношения компонентов, амплитуды УЗК и степени теплоизоляции образцов от окружающей газовой среды (аргона) при рабочем давлении 10 атм. Температуру разогрева образцов определяли медь-константановой термопарой диаметром 50 мкм, которую вводили внутрь образца. В ряде экспериментов боковую поверхность теплоизолировали от окружающей среды асбестовой рубашкой для создания условий, приближенных к адиабатическим.

Состав синтезированных образцов исследовали методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker с использованием медного K_{α} излучения. Массовое содержание фаз оценивали путем сравнения интенсивности их основных характеристических линий с эталоном.

Результаты и их обсуждение. *Тепловое влияние ультразвука на исходную шихту и СВС-процесс.* Такие характеристики волны СВС, как скорость и температура горения зависят от начальной температуры шихты и условий теплообмена с окружающей средой. Поэтому тепловое влияние УЗК на СВС-процесс проявляется двояко: разогрев шихты из-за поглощения энергии колебаний в порошковой среде, т. е. повышение начальной температуры T_0 до поджига, и более интенсивное охлаждение во время горения из-за вынужденной конвекции газовой среды вокруг осциллирующего образца.

Разогрев шихты в зависимости от амплитуды УЗК изучали на модельной бинарной системе Ti– β C с различным мольным соотношением компонентов (параметр β). Влияние УЗК на температуру образцов T_0 показано на рис. 1, а для $\beta = 0,6$ и 1,0 при амплитуде колебаний $\xi = 3$ и 21 мкм. После ультразвукового воздействия в течение 5 мин различие в T_0 для термически изолированных и неизолированных образцов не превышает 40 °С, и максимальное повышение температуры при $\xi = 21$ мкм составляет 210 °С. Средняя скорость разогрева составляет 50 К/мин, что мало по сравнению с условиями нагрева в волне СВС. Эти параметры зависят от состава образца, который определяет его теплоемкость и механические свойства, т. е. условия диссипации энергии колебаний, и от амплитуды УЗК. Для сильно экзотермической системы Ti–C, которая во всей области исходных составов демонстрирует стационарный режим горения с высокой температурой (более 2000 °С), влияние предварительного разогрева образца на характеристики горения

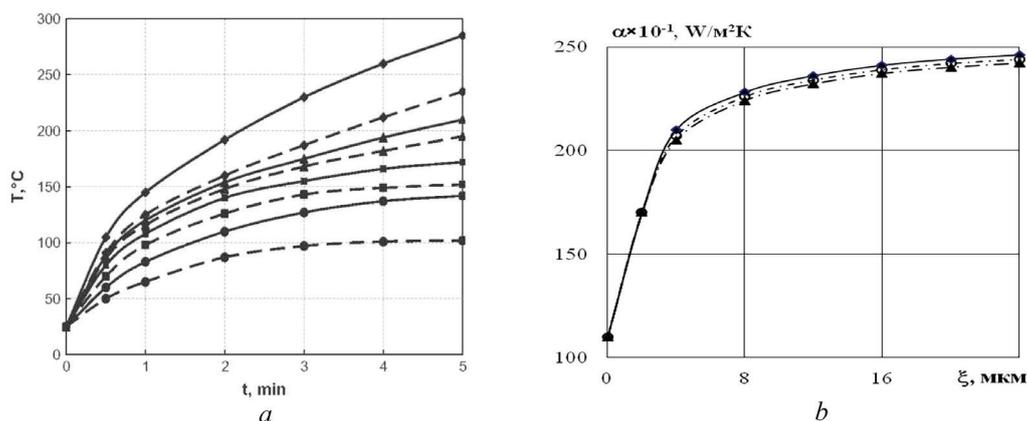


Рис. 1. Смесь Ti-βC: *a* – температура разогрева образцов с различным соотношением компонентов β при разных амплитудах УЗК ξ: ♦, ▲ – β = 1,0, ξ = 21 мкм; ■, ● – β = 0,6, ξ = 3 мкм; пунктирная линия – без теплоизоляции, сплошная линия – с теплоизоляцией; *b* – зависимость коэффициента теплоотдачи α от амплитуды УЗК ξ: ▲ – β = 0,6; ○ – β = 1,0; ■ – β = 1,2

Fig. 1. Ti-βC mixtures: *a* – temperature of self-heating of specimens with different component ratios β for different USO amplitudes ξ: ♦, ▲ – β = 1.0, ξ = 21 μm; ■, ● – β = 0.6, ξ = 3 μm; dashed line – without thermal insulation, solid line – with thermal insulation; *b* – heat transfer coefficient α vs. the USO amplitude ξ: ▲ – β = 0.6; ○ – β = 1.0; ■ – β = 1.2

незначительно. Поскольку при проведении СВС время горения образца значительно меньше длительности модельных экспериментов по определению T_0 (5 мин), можно считать, что СВС при наличии УЗК протекает при постоянной начальной температуре, и ее влияние на процесс горения мало.

Из сравнения времени разогрева со временем протекания синтеза можно сделать вывод, что при проведении синтеза с наложением УЗК СВС-процесс происходит при постоянной начальной температуре. Зависимость температуры разогрева образцов исследуемых смесей от амплитуды УЗК (рис. 1, *a*) указывает на то, что при воздействии УЗ-колебаний меняются условия теплообмена между боковой поверхностью образца и окружающей газовой средой, т. е. изменяется величина коэффициента теплоотдачи α.

Коэффициент теплообмена α на боковой поверхности цилиндрического образца можно оценить, сравнивая скорость разогрева исходного образца, $\partial T_0 / \partial t$, под воздействием УЗК в условиях свободной конвекции (без теплоизоляции) и в квазиadiaбатических условиях (когда образец теплоизолирован от окружающей среды). Условие баланса теплоты для теплоизолированного образца имеет вид

$$\rho V c_p \frac{\partial T_0^{(i)}}{\partial t} = q,$$

а для неизолированного

$$\rho V c_p \frac{\partial T_0^{(ni)}}{\partial t} = q - \alpha A (T_0^{(ni)} - T^0),$$

где q – мощность тепловыделения из-за диссипации энергии УЗК; A – площадь боковой поверхности; V – объем; c_p – теплоемкость; T^0 – температура окружающего газа; ρ – плотность.

Тогда α определится из соотношения

$$\rho V c_p \left(\frac{\partial T_0^{(i)}}{\partial t} - \frac{\partial T_0^{(ni)}}{\partial t} \right) = \alpha A (T_0^{(i)} - T^0).$$

На основании экспериментальных данных, известных геометрических размеров и теплофизических характеристик образцов были рассчитаны коэффициенты теплоотдачи для исследуемых систем. Результаты приведены на рис. 1, *b*. Видно, что наложение УЗК приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи α. При этом его величина слабо зависит от состава исходной

шихты. Это связано, по-видимому, с ростом интенсивности конвективных потоков под действием УЗК вблизи поверхности горящего образца. Кроме того, изменение условий теплообмена из-за воздействия УЗК может привести к изменению условий образования конечного продукта в волне СВС.

Согласно классической тепловой теории горения [11], теплоперенос для одномерного случая описывается в виде

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q\varphi(T, \eta) - \alpha(T - T^0),$$

где λ – коэффициент теплопроводности; $Q = -\Delta H_{pr}$ – тепловыделение экзотермической реакции; $\varphi(T, \eta)$ – функция, описывающая кинетику взаимодействия; η – степень химического превращения ($0 \leq \eta \leq 1$) и T^0 – температура окружающей среды.

Следовательно, влияние более интенсивного теплообмена на поверхности из-за осцилляции образца будет более выражено при высоких температурах, что неизбежно приведет к уменьшению температуры горения и обеспечит изменение скорости волны СВС, а также, возможно, фазового состава и структуры продукта.

Аналогичные эксперименты были проведены и для систем Ti–Si и Ti–B. Из полученных данных следует, что в исследованных системах Ti + β C(Si, B) температура нагрева и скорость ее нарастания существенно зависят как от амплитуды подводимых колебаний, так и от состава исходной смеси. А поскольку при проведении СВС время горения образца значительно меньше длительности описанных выше экспериментов по определению T_0 (5 мин), можно считать, что СВС при наличии УЗК протекает при постоянной начальной температуре, и ее влияние на процесс горения мало.

Характеристики процесса горения. Изучение влияния УЗК на скорость и максимальную температуру горения проводили для смесей Ti + β C(Si, B) при варьировании исходного состава шихты (параметр β) и амплитуды УЗК.

Наблюдаемое уменьшение этих параметров с увеличением амплитуды УЗК может быть объяснено тепловым эффектом УЗК, т. е. охлаждением образца из-за вынужденной конвекции окружающего газа (аргона).

На рис. 2 приведены полученные зависимости скоростей (*a*) и максимальных температур горения (*b*) систем Ti–Si (зеленые) и Ti–B (красные).

Из кривых изменения скорости и температуры горения для исследуемых систем следует, что независимо от соотношения компонентов в исходной смеси, воздействие ультразвука приводит к изменению как скорости, так и максимальной температуры горения. При этом характер изме-

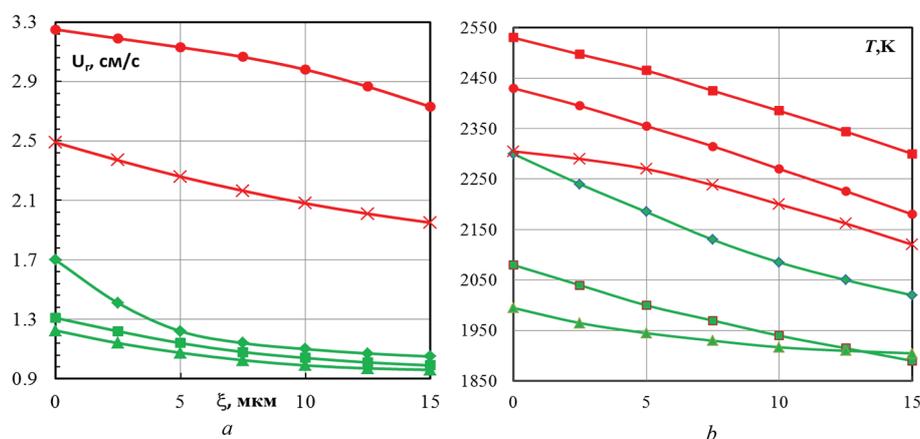


Рис. 2. Зависимости скорости горения (*a*) и максимальной температуры горения (*b*) смесей Ti– β Si(B) от амплитуды УЗК. Ti–Si: ■ – 0,5; ◆ – 0,6; ▲ – 0,8; Ti–B: × – 0,75; ● – 1,0; ■ – 1,5

Fig. 2. Combustion velocity (*a*) and maximal combustion temperature (*b*) of the Ti– β Si mixtures vs. the USO amplitude. Ti–Si: ■ – 0.5; ◆ – 0.6; ▲ – 0.8; Ti–B: × – 0.75; ● – 1.0; ■ – 1.5

нения скорости и максимальной температуры горения одинаков: при снижении скорости горения одновременно снижается максимальная температура горения.

С целью выявления зоны, в которой ультразвук оказывает наибольшее влияние на формирование продукта на составе $Ti + 0,6Si$, выполнен эксперимент по наложению УЗК на различные зоны волны СВС (рис. 3).

УЗК подвели к образцам на разных стадиях процесса синтеза: только во время прохождения фронта горения по образцу, т. е. УЗК воздействуют на зоны прогрева и быстрого тепловыделения; после прохождения волны синтеза, т. е. УЗК влияют только на зону дореагирования; в течение всего процесса, включая остывание, т. е. ультразвук, влияет на все зоны волны горения. Для СВС-продукта по данным РФА рассчитывали объем элементарной ячейки (ОЭЯ) фазы-продукта Ti_5Si_3 . В случае 1 (подвод УЗК во время прохождения волны СВС) наблюдали уменьшение скорости и температуры горения (рис. 2) и снижение относительной величины ОЭЯ V_x / V_0 , где V_x – ОЭЯ при наложении УЗК, а V_0 – в отсутствии УЗК (рис. 3).

В первой ситуации наблюдаемые эффекты могут быть связаны с ускоренной диффузией в местах контакта частиц Ti/Si под действием УЗК и формированием промежуточных фаз в зоне прогрева, что приводит к снижению тепловыделения в зоне реакции. Кроме того, при наложении УЗК увеличивается теплоотдача с поверхности образца и интенсифицируется выделение адсорбированных и растворенных в исходном титане газов, что приводит к уменьшению плотности образцов и ухудшению контакта реагентов. В результате происходит уменьшение ОЭЯ фазы Ti_5Si_3 . Во втором случае (воздействие УЗК только на зону догорания) наблюдается увеличение ОЭЯ фазы Ti_5Si_3 , что может быть связано с ускорением массопереноса в расплаве $Ti-Si$, присутствующем в зоне догорания, и воздействием УЗК на окончательное структурообразование продукта (коалесценция зерен и завершение кристаллизации). В третьем случае (воздействие УЗК на все зоны волны СВС) эффекты, имеющие место в 1-м и 2-м случаях, суммируются, и ОЭЯ увеличивается в меньшей степени, чем в случае 2; при этом доминирует влияние УЗК на процессы в зоне догорания (рис. 3). Наибольшее влияние на ОЭЯ фазы Ti_5Si_3 ультразвук оказывает при его наложении на зону догорания волны СВС.

Как отмечено выше, уменьшение скорости и температуры горения при наложении УЗК на СВС-процесс связано с тепловым фактором – вынужденной конвекцией окружающего инертного газа в результате колебаний образца. Однако может также иметь место физическое, т. е. нетепловое влияние ультразвука на механизм гетерогенного взаимодействия, которое должно проявляться в изменении состава продукта взаимодействия в волне СВС и за счет этого опосредованно влиять на скорость и температуру горения. Поэтому следует ожидать существенного влияния наложения ультразвуковых колебаний при проведении синтеза на фазовый состав и параметры тонкой структуры кристаллических решеток синтезированных фаз. Для этого были рассчитаны параметры кристаллических решеток синтезированных фаз на основе данных РФА.

Фазовый состав продукта СВС. Система титан–углерод–связка. При проведении рентгенофазового анализа образцов $Ti-C$ было установлено, что наложение УЗК на процесс синтеза приводит к изменению периода кристаллической решетки карбида титана. Наблюдается его увеличение, что указывает на возрастание степени насыщенности карбида углеродом, т. е. растет полнота реагирования титана с углеродом (рис. 4): доля связанного углерода в карбиде титана увеличилась до 19,28 мас. %, что близко к стехиометрии $TiC_{1,0}$ [12].

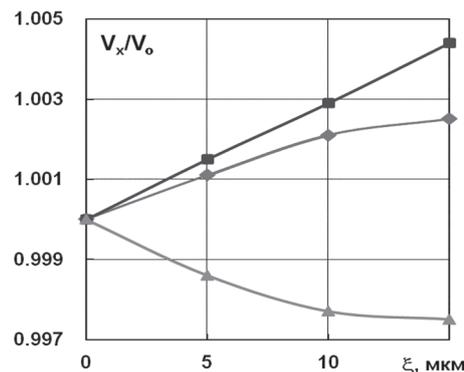


Рис. 3. Относительное изменение объема элементарной ячейки (ОЭЯ) фазы-продукта Ti_5Si_3 при воздействии УЗК на разные зоны волны горения для состава $Ti + 0,6Si$:
 ▲ – на волну горения (случай 1);
 ■ – на зону догорания (случай 2);
 ◆ – на весь процесс СВС (случай 3)

Fig. 3. Relative changes in the unit cell volume (UCV) of the product phase Ti_5Si_3 when the USO is imposed on different zones of the SHS wave for charge composition $Ti + 0.6Si$:
 ▲ – on the combustion wave (case 1);
 ■ – on the after-burn zone (case 2);
 ◆ – on the whole SHS process (case 3)

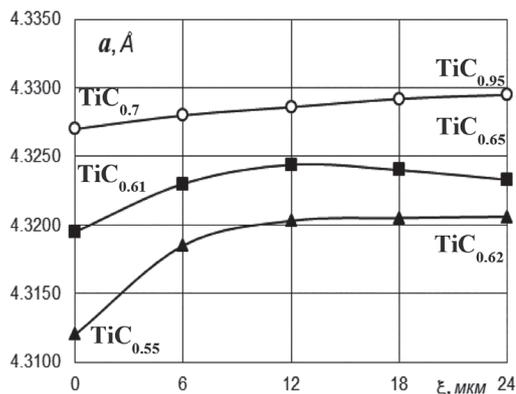


Рис. 4. Зависимость периода решетки карбида титана от амплитуды УЗК ξ : ■ – $\beta = -1,2$; ○ – $\beta = 1,0$; ▲ – $\beta = 0,6$

Fig. 4. The lattice period of titanium carbide vs. the amplitude of ultrasound oscillations ξ : ■ – $\beta = -1.2$; ○ – $\beta = 1.0$; ▲ – $\beta = 0.6$

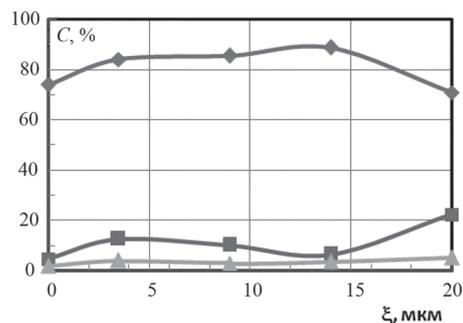


Рис. 5. Относительное содержание фаз C в СВС-продукте системы Ti–C–Ni–Mo в зависимости от амплитуды УЗК: ◆ – TiC, ■ – $\text{Ni}_6\text{Mo}_6\text{C}_{1,06}$, ▲ – Ni

Fig. 5. Relative content of phases C in the SHS product in the Ti–C–Ni–Mo system vs. the USO amplitude: ◆ – TiC, ■ – $\text{Ni}_6\text{Mo}_6\text{C}_{1,06}$, ▲ – Ni

Количественный РФА показал, что при СВС в системе Ti–C–металлическая связка (Ni + Mo) с увеличением амплитуды УЗК содержание карбидов TiC и $\text{Mo}_6\text{Ni}_6\text{C}$ изменяется немонотонно, а количество никеля и интерметаллида MoNi_4 почти не меняется (рис. 5) [13]. При этом наибольшие изменения наблюдаются при $\xi > 14$ мкм: доля TiC снижается, а $\text{Mo}_6\text{Ni}_6\text{C}$ – увеличивается. В этой области амплитуд УЗК температура горения практически не изменяется, т. е. изменение содержания фаз может быть связано с физическим влиянием УЗК на взаимодействие в волне СВС, а не с тепловым фактором.

Система титан–кремний. Результаты фазового анализа продуктов СВС в системе Ti + βSi для различных значений коэффициента β приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Качественный фазовый состав продуктов СВС в системе Ti + βSi

Table 2. Qualitative phase composition of USO products in the Ti + βSi system

$\beta = 0,4$	$\beta = 0,6$	$\beta = 1,0$
$\text{Ti}_5\text{Si}_3 + \alpha\text{-Ti}$	$\text{Ti}_5\text{Si}_3 + \text{следы TiSi}_2$	$\text{Ti}_5\text{Si}_3 + \text{TiSi}_2 + \text{следы TiSi}$

В составе с $\beta = 0,4$ (71,5 ат. % Ti), находящемся на равновесной диаграмме Ti–Si между фазами Ti_5Si_3 и Ti_3Si , в продуктах СВС отсутствует фаза Ti_3Si , которая должна была бы образоваться по перитектической реакции при 1170 °C. Состав с $\beta = 0,6$ (62,5 ат. % Ti) соответствует стехиометрии конгруэнтно плавящейся фазы Ti_5Si_3 . Но в СВС-продуктах имеются следы TiSi_2 , хотя на диаграмме Ti–Si между фазами Ti_5Si_3 и TiSi_2 расположены фазы Ti_5Si_4 и TiSi , которые могут образоваться по перитектическим реакциям при 1920 и 1480 °C соответственно. Состав с $\beta = 1,0$ (50 ат. % Ti) соответствует стехиометрии TiSi , но в СВС-продуктах имеются только конгруэнтно плавящиеся фазы Ti_5Si_3 и TiSi_2 . Следовательно, даже без внешнего воздействия СВС в системе Ti–Si протекает в неравновесных условиях: перитектические реакции, которые должны протекать в зоне догорания при остывании, подавлены.

РФА показал, что наложение УЗК на процесс синтеза силицидов титана во всей области составов приводит к изменению профилей дифракционных спектров и смещению центров тяжести пиков, причем этот эффект становится более выраженным с увеличением амплитуды ультразвуковых колебаний ξ и проявляется по-разному в шихте различного исходного состава. Также обнаружено существенное изменение интенсивности характеристических линий фаз Ti_5Si_3 и TiSi_2 . Это свидетельствует об изменении соотношений указанных фаз в СВС-продукте, а также об искажении их кристаллических решеток. Для оценки относительного содержания фаз для составов Ti + βSi ($\beta = 0,8$ и $1,0$) при разных амплитудах УЗК использовано отношение интегральных

интенсивностей (I_ξ / I_0) характеристических 100 %-ных линий фаз Ti_5Si_3 (линия $\langle 211 \rangle$) и $TiSi_2$ (линия $\langle 311 \rangle$), где I_0 – интенсивность для СВС без ультразвука, т. е. при $\xi = 0$ (табл. 3). Видно, что в образце состава $Ti + 1,0Si$ увеличение амплитуды ультразвуковых колебаний, приложенных во время СВС-процесса, приводит к уменьшению количества фазы Ti_5Si_3 по отношению к фазе $TiSi_2$. Наблюдаемые эффекты нельзя объяснить только изменением температуры горения.

Т а б л и ц а 3. Зависимости отношений интегральных интенсивностей I 100 % линий $\langle 211 \rangle$ и $\langle 311 \rangle$ фаз Ti_5Si_3 и $TiSi_2$ соответственно и электросопротивления R от амплитуды УЗК для составов $Ti + 0,8Si$ и $Ti + 1,0Si$ до и после отжига

Table 3. Dependence of the integral intensity ratio I 100 % of lines $\langle 211 \rangle$ and $\langle 311 \rangle$ of phases Ti_5Si_3 and $TiSi_2$ respectively and electric resistance R on the USO amplitude on the compositions $Ti + 0.8Si$ and $Ti + 1.0Si$ before and after annealing

До отжига Before annealing					После отжига After annealing			
Ti + 0,8Si			Ti + 1,0Si		Ti + 0,8Si		Ti + 1,0Si	
ξ , мкм	I_ξ / I_0	R_ξ / R_0	I_ξ / I_0	R_ξ / R_0	I_ξ / I_0	R_ξ / R_0	I_ξ / I_0	R_ξ / R_0
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,64	1,33	0,87	0,89	1,22	1,71	0,82	0,84
10	2,00	1,54	0,81	0,85	1,34	2,15	0,64	0,67
15	3,10	1,87	0,79	0,77	1,54	2,37	0,41	0,47
20	–	–	0,76	0,70	–	–	0,23	0,17

Для независимого анализа изменения соотношения фаз при СВС с наложением УЗК использован также другой физический принцип: измерение электросопротивления (R) синтезированных образцов, так как электропроводности фаз Ti_5Si_3 и $TiSi_2$ различаются более чем в 5 раз [7] (табл. 3, до отжига). Как и для данных РФА, сопротивление при синтезе без УЗК принято за единицу. Как видно из табл. 3 (до отжига) характер изменения электросопротивления при наложении ультразвуковых колебаний на процесс СВС совпадает с характером изменения интегральных интенсивностей вышеуказанных рентгеновских линий. Это подтверждает обнаруженное изменение количественного фазового состава продуктов синтеза при СВС в ультразвуковом поле. Наблюдаемые эффекты могут быть связаны только с физическим (нетепловым) влиянием УЗК на фазообразование в СВС-процессе.

Для проверки стабильности фазового состава, полученного после СВС с УЗК, был проведен низкотемпературный отжиг синтезированных образцов при 600, 700 и 1000 °C в течение 6 ч в среде аргона с последующим РФА и измерением электросопротивления. Установлено, что изменение фазового состава при синтезе с ультразвуком сохраняется и после отжига (табл. 3, после отжига). В табл. 3 (после отжига) также приведены результаты измерений электросопротивления образцов R_ξ / R_0 состава $Ti + 0,8Si$ и $Ti + 1,0Si$ в зависимости от амплитуды УЗК. Как видно из анализа данных табл. 3, характер изменения электросопротивления при наложении ультразвуковых колебаний на процесс СВС совпадает с характером изменения интегральных интенсивностей, т. е. наложение ультразвуковых колебаний во время синтеза приводит к увеличению количества фазы Ti_5Si_3 в образце состава $Ti + 0,8Si$ по отношению к фазе $TiSi_2$. Для образцов исходного состава $Ti + 1,0Si$ наложение ультразвуковых колебаний на процесс СВС приводит к увеличению количества фазы $TiSi_2$ по отношению к фазе Ti_5Si_3 .

Вышеизложенные результаты показывают, что наложение УЗК на процесс СВС изменяет протекание реакций образования конечного продукта. Температура горения образцов составляла 1900–2300 К, что выше точек плавления исходных компонентов. При этом продукт синтеза формируется в результате кристаллизации бинарного расплава. УЗК изменяют массоперенос в расплаве и условия зародышеобразования, что приводит к обнаруженному смещению соотношений фаз в продукте.

Для системы титан–кремний применение ультразвуковых колебаний в процессе СВС приводит к изменению соотношения фаз в продукте и к получению более гомогенной структуры: однородному распределению фазовых составляющих и пор по объему образца. Так, для состава

Ti–0,8Si увеличивается количество фазы Ti_3Si_3 и уменьшается содержание фазы $TiSi_2$, а для состава Ti–1,0Si увеличивается количество фазы $TiSi_2$ и уменьшается содержание фазы Ti_3Si_3 .

Система титан–бор. Под влиянием ультразвуковых колебаний при СВС в системе титан–бор происходит снижение как температуры, так и скорости горения (рис. 2, а). Были проведены исследования фазового состава СВС-продуктов в системе Ti + βВ для различных значений коэффициента β и амплитуды УЗК ξ.

Результаты полуколичественного фазового анализа продуктов СВС в системе Ti + βВ приведены в табл. 4. Массовые доли фаз определяли пропорционально интенсивности их характеристических линий.

Таблица 4. Полуколичественный фазовый анализ продуктов горения в системе Ti + βВ
Table 4. Semi-quantitative phase analysis of combustion products in the Ti + βВ system

β	ξ, мкм	TiB (орторомб.), %	TiB (куб.), %	TiB ₂ , %	Ti, %	Ti ₃ B ₄ , %
0,75	0	73,4	4,6	3,1	18,9	0
	5	69,2	9,4	3,5	17,9	0
	10	68,3	9,1	6,6	16	0
1	0	78,2	9,2	5,4	0,9	6,3
	5	80,3	8,3	5,8	0,5	5,1
	10	82,9	6,8	6,1	0,2	4
1,5	0	22,8	7,6	58,8	0,8	10
	5	20,6	7,2	61,9	0,6	9,7
	10	19,8	5,3	66,9	0,5	7,5
2	0	–	–	100,0	–	–
	5	–	–	100,0	–	–
	10	–	–	100,0	–	–
2,25	0	–	–	100,0	–	–
	5	–	–	100,0	–	–
	10	–	–	100,0	–	–

Как видно из табл. 4, наложение УЗК на СВС-процесс в системе Ti–В при одном и том же соотношении компонентов β приводит к изменению соотношения фаз в продукте синтеза, при этом также изменяются доли кубической и орторомбической модификаций фазы TiB. Для β = 0,75 и 1,0 влияние УЗК на СВС менее выражено, чем для состава с β = 1,5, что может быть связано с относительно невысокой температурой СВС при наложении УЗК. С увеличением амплитуды УЗК ξ его влияние усиливается.

В составе с β = 0,75 с увеличением амплитуды УЗК содержание TiB почти не меняется, изменяется соотношение между орторомбической и кубической модификациями этой фазы (доля последней увеличивается почти в 2 раза), несколько снижается количество остаточного титана при почти двукратном возрастании доли высокобористой фазы TiB₂.

Для шихты состава β = 1,0 зависимость несколько иная: количество TiB изменяется мало. Имеет место обратное (по сравнению со случаем β = 0,75) соотношение орторомбической и кубической модификаций фазы TiB: доля первой увеличивается, а второй уменьшается (почти в 1,3 раза). Также возрастает доля TiB₂ и снижается содержание фазы Ti₃B₄. В этом составе при амплитуде УЗК ξ = 5 и 10 мкм температура СВС становится ниже точки плавления бора.

Наиболее сильно влияние УЗК на СВС проявляется в составе с β = 1,5, где в исследованном интервале ξ = 0–10 мкм температура горения выше точки плавления бора. Видно, что наложение УЗК на СВС (ξ = 10 мкм) приводит к увеличению содержания фазы TiB₂ в 1,14 раза, снижению доли фазы TiB на 20 % и уменьшению количества фазы Ti₃B₄ на 25 %. При этом отношение доли орторомбической модификации фазы TiB к кубической изменяется от 3 в отсутствии УЗК до 3,7 при ξ = 10 мкм. Для шихты состава β = 2,0 и 2,25 во всех случаях наблюдается только фаза TiB₂.

Это свидетельствует о физическом (т. е. нетепловом) влиянии УЗК на СВС, т. е. происходит изменение условий перемешивания расплава и кристаллизации зерен продукта. Можно заключить, что такое влияние связано как с составом шихты, так и с температурой горения. При этом

имеет место положительная обратная связь: снижение температуры СВС из-за вынужденной конвекции окружающего газа вокруг осциллирующего образца сопровождается изменением фазового состава продукта из-за физического воздействия УЗК на гетерогенное взаимодействие и, как следствие, изменяется тепловыделение в волне СВС.

Следовательно, существуют условия СВС (состав шихты и температура горения), при которых влияние УЗК на фазообразование при гетерогенном горении будет наиболее эффективным.

Таким образом, на основании проведенных исследований влияния УЗК на фазовый состав СВС-продуктов следует, что наложение УЗК на СВС-процесс является физическим методом целенаправленного воздействия как на параметры волны горения (скорость и температуру), так и на состав и структуру конечных продуктов синтеза.

Заключение. Показано, что наложение УЗК на СВС-процесс позволяет *in situ* изменять фазовый состав и микроструктуру продукта, что открывает перспективу создания контролируемых СВС-технологий получения новых керметов и других материалов различного назначения.

Влияние мощного ультразвука на СВС во всех исследованных системах Ti–C(Si, V) связано, во-первых, с тепловым фактором – повышением интенсивности теплоотвода от поверхности горящего образца в окружающую среду из-за вынужденной конвекции; во-вторых, с физическим воздействием УЗК, которое, по-видимому, связано с изменением условий растекания расплава в высокотемпературной зоне волны СВС, изменением скорости диффузии и кристаллизации различных фаз в волне СВС.

Для однофазной системы Ti–C под действием УЗК происходит повышение степени насыщенности карбида титана углеродом. Для многофазной системы титан–кремний применение ультразвуковых колебаний в процессе СВС приводит к изменению соотношения фаз в продукте. Так, для состава Ti–0,8Si увеличивается количество фазы Ti_5Si_3 и уменьшается содержание фазы $TiSi_2$, а для состава Ti–1,0Si увеличивается количество фазы $TiSi_2$ и уменьшается содержание фазы Ti_5Si_3 .

Закономерности воздействия УЗК на неравновесное фазообразование при СВС в системе Ti–V следующие: для составов с $\beta = 0,75$ и $1,0$ ультразвук изменяет в основном соотношение орторомбической и кубической модификаций фазы TiV, а при $\beta = 1,5$ – существенно увеличивает долю тугоплавкой фазы TiV_2 и везде увеличивается содержание фазы TiV_2 .

Установлено, что наложение ультразвуковых колебаний на СВС-процесс является эффективным физическим методом целенаправленного регулирования состава и структуры конечных продуктов и может быть использовано в качестве средства управления процессом синтеза.

Список использованных источников

1. К вопросу о равновесности продуктов СВС / А. Г. Мержанов [и др.] // Докл. Акад. наук (России). – 2004. – Т. 394, № 4. – С. 498–502.
2. Николис, Г. Самоорганизация в неравновесных системах: от диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации / Г. Николис, И. Пригожин. – М., 1979. – 512 с.
3. Кирдяшкин, А. И. О влиянии капиллярного растекания на процесс горения безгазовых систем / А. И. Кирдяшкин, Ю. М. Максимов, А. Г. Мержанов // Физика горения и взрыва. – 1981. – Т. 17, № 6. – С. 10–15.
4. Горение многокомпонентных систем в ультразвуковом поле / В. А. Андреев [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1987. – Т. 23, № 6. – С. 65–69.
5. Левашов, Е. А. Перспективы применения акустических полей в технологиях СВС / Е. А. Левашов, А. Г. Мержанов, Н. Н. Хавский // Инженерно-физический журнал. – 1993. – Т. 65, № 4. – С. 503–506.
6. Кипарисов, С. С. Карбид титана. Получение, свойства, применение / С. С. Кипарисов, Ю. В. Левинский, А. П. Петров. – М., 1987. – 213 с.
7. Самсонов, Г. В. Силициды / Г. В. Самсонов, Л. А. Дворина, Б. М. Рудь. – М., 1979. – 272 с.
8. Murray, J. L. The B–Ti (boron–titanium) system / J. L. Murray, P. K. Liao, K. E. Spear // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. – 1986. – Vol. 7, N 6. – P. 550–555, 587–588. <https://doi.org/10.1007/bf02869864>
9. Клубович, В. В. Ультразвук в процессах СВС / В. В. Клубович, М. М. Кулак, Б. Б. Хина. – Минск, 2006. – 279 с.
10. Кулемин, А. В. Исследование тепловых процессов в ультразвуковых волноводах, работающих при больших интенсивностях звука / А. В. Кулемин // Новые разработки в ультразвуковой технике. – Л., 1972. – С. 3–12.
11. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович [и др.]. – М., 1980. – 478 с.
12. Pierson, H. Handbook of Refractory Carbides and Nitrides / H. Pierson. – Noyes Publ., 1996. – 340 p.
13. Khina, B. B. Effect of ultrasound on combustion synthesis of composite material “TiC–metal binder” / B. B. Khina, M. M. Kulak // J. Alloys and Compounds. – 2013. – Vol. 578. – P. 595–601. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.07.030>

References

1. Merzhanov A. G., Kovalev D. Yu., Shkiro V. M., Ponomarev V. I. Equilibrium of products of self-propagating high-temperature synthesis. *Doklady Physical Chemistry*, 2004, vol. 394, no. 4–6, pp. 34–38. <https://doi.org/10.1023/b:dopc.0000017998.96972.70>
2. Nicolis G., Prigogine I. *Self-organization in nonequilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations*. John Wiley & Sons, 1977. 491 p.
3. Kirdyashkin A. I., Maksimov Yu. M., Merzhanov A. G. Effects of capillary flow on combustion in a gas-free system. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1981, vol. 17, no. 6, pp. 591–595. <https://doi.org/10.1007/bf00784246>
4. Andreev V. A., Levashov E. A., Mal'tsev V. M., Khavskii N. N. Combustion of multicomponent systems in an ultrasonic field. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1987, vol. 23, no. 6, pp. 725–729. <https://doi.org/10.1007/bf00742528>
5. Levashov E. A., Merzhanov A. G., Khavskii N. N. Prospects for the use of acoustic fields in SHS technologies. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1993, vol. 65, no. 4, pp. 1036–1039. <https://doi.org/10.1007/bf00862784>
6. Kiparisov S. S., Levinskiy Yu. V., Petrov A. P. *Titanium carbide. Production, properties, applications*. Moscow, 1987. 213 p. (in Russian).
7. Samsonov G. V., Dvorina L. A., Rud' B. M. *Silicides*. Moscow, 1979. 272 p. (in Russian).
8. Murray J. L., Liao P. K., Spear K. E. The B–Ti (boron–titanium) system. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1986, vol. 7, no. 6, pp. 550–555, 587–588. <https://doi.org/10.1007/bf02869864>
9. Klubovich V. V., Kulak M. M., Khina B. B. *Ultrasound in SHS processes*. Minsk, 2006. 279 p. (in Russian).
10. Kulemin A. V. Study of thermal processes in ultrasound waveguides working at high sound intensities. *Novie razrabotki v ul'trazvukovoi tekhnike [New developments in ultrasound engineering]*. Leningrad, 1972, pp. 3–12 (in Russian).
11. Zeldovich Ya. B., Barenblatt G. I., Librovich V. B., Makhviladze G. M. *The mathematical theory of combustion and explosions*. New York, NY, Consultants Bureau, 1985. 597 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2349-5>
12. Pierson H. *Handbook of refractory carbides and nitrides*. Noyes Publ., 1996. 340 p.
13. Khina B. B., Kulak M. M. Effect of ultrasound on combustion synthesis of composite material “TiC–metal binder”. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 578, pp. 595–601. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.07.030>

Информация об авторах

Клубович Владимир Владимирович – академик, д-р техн. наук, профессор. Белорусский национальный технический университет (пр-т Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v_klubovich@tut.by.

Кулак Михаил Михайлович – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник. Институт технической акустики НАН Беларуси (пр. генерала Людникова, 13, 210023, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: mmmk_vit@tut.by.

Хина Борис Борисович – д-р физ.-мат. наук, доцент, гл. науч. сотрудник. Физико-технический институт НАН Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: khina@tut.by.

Information about the authors

Klubovich Vladimir Vladimirovich – Academician, D. Sc. (Engineering), Professor. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v_klubovich@tut.by.

Kulak Mikhail Mikhaylovich – Ph. D. (Engineering), Senior researcher. Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus (13, General Liudnikov Ave., 210023, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: mmmk_vit@tut.by.

Khina Boris Borisovich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Associate professor, Chief researcher. Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: khina@tut.by.

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ХИМИЯ
CHEMISTRY

УДК 543.544.45
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-685-693>

Поступило в редакцию 11.06.2018
Received 11.06.2018

**Т. Н. Генарова¹, В. В. Грушевский¹, П. Н. Кривошеев¹, академик О. Г. Пенязков¹,
И. Ф. Буяков², Ю. М. Дмитренко², академик С. А. Жданок³, А. П. Чернухо²**

¹*Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*Передовые исследования и технологии, Минск, Республика Беларусь*

³*Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**СОСТАВ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ПРИ КАТАЛИТИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ
УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ
ПРИ ПИРОЛИТИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ ПРОПАН-БУТАНОВОЙ СМЕСИ**

Аннотация. Анализ отходящих газов установки пиролиза легких углеводородов в процессе синтеза углеродных наноматериалов является актуальной задачей не только для оценки количества образующихся вредных веществ, но и для обеспечения наибольшей производительности реактора и максимальной степени конверсии исходного сырья. Методом газовой хроматографии проведен качественный и количественный анализ отходящих газов: неконденсируемых газообразных фракций и адсорбируемых ароматических углеводородов. В результате экспериментов было установлено, что основными компонентами отходящих газов являются водород и метан. В соответствии с утвержденной в Республике Беларусь методикой измерены значения 16 полициклических ароматических углеводородов, обнаруженных в отходящих газах. Проведено сравнение полученных значений с нормативными предельно допустимыми концентрациями канцерогенов в воздухе. Установлено, что концентрации пирена, фенантрена, аценафтилена, аценафтена превышают норму в 1,5–6 раз, а содержание таких токсикантов, как бенз(а)антрацен, антрацен, бенз(а)пирен и дибенз(а, h)антрацен значительно превышают норму. Полученная информация позволяет оценить степень опасности для экологии и возможный вклад таких установок в загрязнение окружающей среды, а также прогнозировать защитные меры по снижению вредного воздействия.

Ключевые слова: углеродные наноматериалы, пиролиз пропан-бутановой смеси, хроматографический анализ отходящих газов

Для цитирования. Состав отходящих газов при каталитическом синтезе углеродных наноматериалов при пиролизическом разложении пропан-бутановой смеси / Т. Н. Генарова [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 685–693. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-685-693>

**Tatiana M. Henarava¹, Uladzimir U. Hrusheuski¹, Pavel M. Krivosheev¹, Academician Oleg G. Penyazkov¹,
Igar F. Buiakov², Yuriy M. Dmitrenko², Academician Siarhei A. Zhdanok³, Andrey P. Chernukho²**

¹*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Advanced Research and Technologies, Minsk, Republic of Belarus*

³*National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**WASTE GASES IN THE CATALYTIC SYNTHESIS OF CARBON NANOMATERIALS BY PYROLYTIC
DECOMPOSITION OF A PROPANE-BUTANE MIXTURE**

Abstract. It is known that during the process of carbon nanomaterials synthesis, gaseous products and various unknown hydrocarbons are formed. Thus, the production of carbon nanomaterials could damage the environment. A detailed analysis of all gaseous products during the pyrolysis process is needed in order to clarify the nature of the formed substances and to control the technological characteristics of the catalyst. The chemical composition study of exhaust gases was made on the facility of propane-butane mixture pyrolysis for the carbon nanomaterial synthesis. The analysis of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) of the extracts is made using a gas chromatography-mass spectrometry method. A quantitative analysis

of gases was made by gas chromatography coupled with a heat conduction detector and a flame ionization detector. It was established that the concentrations of some PAHs exceed 14, 20, 90 and 100 times much as a maximum permissible concentration in the air. It was found that the appropriate devices of carbon nanomaterial production should be used in order to eliminate the PAHs that are formed.

Keywords: carbon nanomaterials, pyrolysis of propane-butane mixture, analysis of exhaust gases, gas chromatography

For citation: Henarava T. M., Hrusheuski U. U., Krivosheev P. M., Penyazkov O. G., Buiakov I. F., Dmitrenko Yu. M., Zhdanok S. A., Chernuho A. P. Waste gases in the catalytic synthesis of carbon nanomaterials by pyrolytic decomposition of a propane-butane mixture. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 685–693 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-685-693>

Введение. Углеродные наноматериалы (УНМ) в настоящее время широко используются во многих областях науки и промышленности благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам. Область применения этих материалов постоянно расширяется, включая новые сегменты (нано- и микроэлектроника, альтернативная энергетика, нанокompозиты, сорбенты, строительные материалы, жидкие теплоносители и др.) [1–4].

В зависимости от параметров и качества применяемых углеродных наноматериалов (одно- или многослойные углеродные нанотрубки, степень упорядоченности и однородности, размеры и морфология) используют различные способы их получения, например, каталитический пиролиз легких углеводородов [5], плазменно-каталитический метод [6; 7], пиролиз в псевдооживленном слое [8] и мн. др. Одним из перспективных методов промышленного получения больших объемов УНМ является низкотемпературный пиролиз пропан-бутановой смеси. Данный метод имеет такие преимущества, как низкая стоимость используемых углеводородов, возможность реализовывать процесс синтеза наноматериала в относительно несложных по конструкции установках. Вместе с тем наряду с получением целевого продукта при синтезе образуется смесь газообразных веществ, химический состав и количество которых следует контролировать, особенно в условиях постоянного увеличения промышленного производства углеродных наноматериалов.

Мониторинг загрязняющих веществ в объектах окружающей среды давно уже стал насущной необходимостью. При этом постоянно меняется не только качественный и количественный состав загрязнителей, но и неуклонно растет их число. Степень опасности загрязнения атмосферного воздуха оценивается по двум основным классам веществ – канцерогенным веществам, которые способны вызывать злокачественные новообразования [9], и неканцерогенным веществам. Канцерогенные вещества влияют также на наследственность, индуцируя генетические нарушения. В настоящее время установлено, что более 1500 химических соединений, являющихся потенциальными загрязнителями атмосферы, обладают выраженными канцерогенными свойствами. Это полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) [10], нитрозоамины, галогенуглеводороды и др. Содержание ПАУ и других канцерогенных веществ, попадающих в атмосферу с выбросами промышленных предприятий, составляет в крупных индустриальных центрах около 80 % от общего загрязнения окружающей среды.

Из анализа литературы известно, что при синтезе УНМ образуются водород, смесь предельных и непредельных легких углеводородов (метан, этилен и др.). Вместе с тем в научной литературе практически не изучен вопрос образования в таких процессах различных токсичных органических соединений и, в частности, ПАУ, которые синтезируются в результате пиролиза или неполного сгорания углеводородного сырья. При высоких температурах в результате пиролиза органических соединений образуются фрагменты молекул и радикалы, которые соединяются и образуют ПАУ. Состав конечных продуктов процесса зависит от углеводородного состава, температуры и от времени температурного воздействия на смесь веществ, подвергаемых пиролизу. ПАУ выделяются из зоны реакции в виде паров. Из-за низкого давления пара большинство ПАУ мгновенно концентрируются на частичках сажи, либо сами образуют мельчайшие частички. ПАУ, поступающие в атмосферу в газообразном виде, адсорбируются содержащимися в воздухе частицами.

Целью настоящей работы является исследование качественного и количественного состава отходящих газов в процессе синтеза углеродного наноматериала при каталитическом низкотемпературном пиролизе пропан-бутановой смеси на лабораторных установках для оценки количе-

ства образующихся токсичных веществ. Актуальность работы обусловлена, с одной стороны, тем, что полученные данные позволят оптимизировать работу установок с точки зрения параметров, обеспечивающих наибольшую производительность реакторов при максимальной степени конверсии исходного сырья, с другой стороны – необходимостью прогнозирования и постоянного контроля за эмиссией вредных веществ, которые при промышленных масштабах производства могут значительно ухудшать экологическую обстановку и наносить вред окружающей среде [11].

Материалы и методы исследования. *Условия пиролиза.* В работе исследовался процесс, реализованный на установке «Термо 10», которая предназначена для синтеза углеродных наноматериалов со средней производительностью 12–15 г/ч. Установка размещена на рамной конструкции, установленной в металлический электротехнический шкаф. Она состоит из реактора синтеза УНМ, систем электроснабжения (нагрев реактора), систем газоснабжения (пропан-бутан, воздух, азот), привода устройства удаления материала из реактора. Контроль предустановленных температурных и временных параметров процесса синтеза УНМ, а также его удаления из реактора в приемный контейнер осуществляется посредством автоматизированной системы управления.

Реактор синтеза представляет собой трубу из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с внутренним диаметром 44 мм и толщиной стенки 4 мм, длиной 460 мм. На его наружной поверхности расположены электронагреватели, обеспечивающие равномерный нагрев стенок реактора на разных стадиях процесса. Перед проведением процесса синтеза внутренняя поверхность реактора обрабатывается особым образом для придания ей каталитических свойств. При этом на ней создаются активные центры роста – мельчайшие частицы металла, так называемые наноклапты, с характерными размерами 10–50 нм.

Устройство для удаления наработанного материала с поверхности реактора представляет собой вертикально расположенный цилиндрический патрубок с отфрезерованными на внешней поверхности крестообразными насечками и присоединенной сверху штангой, которая управляется линейным электроприводом «Festo». В нижней части реактора осаждения приварен цилиндр-переходник с уплотнительным кольцом для герметичного присоединения двухстенного металлического контейнера-накопителя УНМ.

Установка имеет три канала газоснабжения: воздух, пропан-бутан и азот. Первый канал используется на стадии окисления поверхности реактора (в течение 50 мин при температуре 800 °С) для ее очистки от остатков углерода и подготовки к очередной фазе синтеза. После этой фазы реактор продувается азотом в течение 2 мин. На следующей стадии для восстановления окисленной поверхности реактора и создания зародышей роста структурированного углерода в реактор в течение 20 мин подается пропан-бутановая смесь (расход – 0,2 л/мин). По завершении этой стадии выполняется основной рабочий режим процесса – синтез УНМ при расходе углеводородной смеси 0,8 л/мин в течение 50 мин при 750 °С. По его завершении производится повторная продувка реактора азотом.

Образованный на стенках реактора наноструктурированный углерод возвратно-поступательными ходами устройства для удаления наработанного материала перемещается со стенок реактора в контейнер-накопитель.

Для работы установки использовалась пропан-бутановая смесь производства белорусского газоперерабатывающего завода ПО «Белоруснефть», СТБ 2262–2012 «Газы углеводородные сжиженные топливные. Технические условия».

Условия анализа неконденсируемых газов. Отбор отходящих газов осуществлялся из выхлопного патрубка с помощью газонепроницаемых шприцов объемом 150 мл с предварительным их вакуумированием.

Для выполнения хроматографических измерений использовали газовый хроматограф Agilent 7890А, оборудованный двумя калиброванными дозирочными петлями для ввода образца, которые подключаются к системе с помощью десятипортового газового крана. Для заполнения дозирочных петель используется пневматический модуль, позволяющий контролировать и задавать давление на входе петли.

Хроматографирование пробы происходит одновременно на двух капиллярных колонках. Колонка (Part No. CP7538) со стационарной фазой Molsieve 5A PLOT (25 м × 0,53 мм × 50 мкм) соединялась с детектором по теплопроводности для определения неорганических составляющих. Для определения органических составляющих пробы колонка (Part No. CP7355) со стационарной фазой PLOT PoraBOND Q (50 м × 0,53 мм × 10 мкм) через метанализер соединялась с пламенно-ионизационным детектором.

Условия хроматографирования: начальная температура колонки составляла 40 °С; после ввода пробы выдержка в течение 7 мин, затем температура термостата повышалась до 290 °С со скоростью 80 °С/мин, потом выдержка в течение 15 мин. Расход гелия – 90 мл/мин; температура модуля газового крана и дозирующих петель – 185 °С; объем дозирующей петли для пламенно-ионизационного детектора – 250 мкл; объем дозирующей петли для детектора по теплопроводности – 500 мкл; температура пламенно-ионизационного детектора – 300 °С; расход водорода – 40 мл/мин; расход воздуха – 450 мл/мин; температура детектора по теплопроводности – 300 °С.

Качественную идентификацию и количественное определение веществ, входящих в состав анализируемых образцов, осуществляли основываясь на времени удерживания и величинах отклика относительно калибровки по государственным стандартным образцам газовой смеси, аттестованным в соответствии с методикой СТБ ИСО 6142–2003.

Условия анализа ПАУ. Отбор проб проводили в соответствии со стандартной методикой СТБ 17.13.05-03–2008 с использованием ловушки на выхлопной системе установки для адсорбции образующихся соединений. Ловушка представляет собой разъемный картридж Supelco Filter Cartridge (Part No. 21031) с двумя стекловолоконными фильтрами Pall Corporation (Part No. T30269) диаметром 32 мм, с размером пор 0,2–5,0 мкм и адсорбентом Supelpak-2 (Part No. 20279) между фильтрами. Масса используемого адсорбента – 0,75 г. Объем отходящих газов, прошедших через ловушку, составил 40 л. Полученные фильтры и адсорбент помещали в вialу объемом 10 мл и экстрагировали дихлорметаном марки Fluka (Part No. 66740) объемом 7 мл.

Для анализа ПАУ использовали газовый хроматограф Agilent 7890А с капиллярной колонкой Agilent J&W DB-5MS-UI (30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм) (Part No. 122-5522UI). Газ-носитель: гелий (скорость потока – 1 мл/мин). Объем вводимой пробы – 1 мкл. Условия хроматографирования: температура термостата с момента ввода пробы повышалась от 80 до 300 °С со скоростью 10 °С/мин, затем выдержка в течение 20 мин. Для детектирования компонентов применялся масс-спектрометрический детектор Agilent 5975С с ионизацией электронным ударом, энергия ионизации – 70 эВ, температура ионного источника – 230 °С; температура квадруполя – 150 °С. В случае качественного анализа экстрактов идентификацию соединений проводили по времени удерживания с помощью библиотеки масс-спектров NIST 98 в режиме полного набора ионов масс-детектора. С целью повышения избирательности и чувствительности метода количественный анализ экстрактов проводили при работе масс-спектрометрического детектора в режиме мониторинга выбранных ионов. Основные параметры хроматографического метода идентичны при проведении качественного и количественного анализов.

Количественный анализ проводили в соответствии со стандартной методикой, согласно которой определяли 16 индивидуальных полициклических углеводородов (нафталин, аценафтен, аценафтилен, антрацен, бенз(а)антрацен, бенз(г,һ,і)перилен, бензо(а)пирен, бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен, дибенз(а,һ)антрацен, индено(1,2,3-с,д)пирен, пирен, фенантрен, флуорантен, флуорен, хризен). Для калибровки был использован стандартный раствор ПАУ концентрацией 2000 мг/мл Supelco (Part No. 48905-U), который был разбавлен до необходимых концентраций.

Результаты и их обсуждение. *Анализ неконденсируемых газов.* Анализ исходной пропан-бутановой смеси показал, что в ее составе присутствуют аргон, метан, этилен, этан, пропилен, пропан, бутан и изо-бутан. Состав баллона непостоянен и изменяется по мере расхода газовой смеси. Результаты измерений представлены в табл. 1. «Образец 1» – полный баллон, «Образец 2» – баллон израсходован на 80 %. Видно, что в полном баллоне наряду с пропаном, пропаном, бутаном и изо-бутаном, суммарно ~80 %, содержатся такие газы, как аргон, метан и этан, суммарно ~20 %. По мере расходования сжиженного газа в результате снижения в баллоне давления насыщенных паров в поступающей в установку газовой смеси преобладают бутан и изо-бутан ~70 %, аргон, метан и этан ~20 %.

Таблица 1. Результаты определения количественного состава исходной смеси пропан–бутан

Table 1. Results of the quantitative composition of the initial propane-butane mixture

Образец Sample	Компонент (об. %) Component (w. %)							
	Ar	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₁₀
1	1,53	3,66	0,025	11,8	10,1	48,98	8,46	8,42
2	1,85	0	0	0	0,49	12,39	36,32	33,69

присутствует пропан ~12 %, незначительное количество пропилена и полностью отсутствуют метан, этен, этан и ацетилен.

Измерения состава отходящих газов установки проводились в основном с периодичностью 5 мин. Результаты анализов представлены в табл. 2. Из представленных данных видно, что наибольшее значение водорода наблюдается на начальном этапе синтеза – 72 %, затем происходит постепенное снижение содержания до 51 %. Содержание метана, напротив, возрастает с 20 % в начале цикла до 35 % при окончании синтеза. В отходящих газах практически не содержится ацетилен: если вначале наблюдается наличие следовых количеств 0,001–0,003 %, то во второй половине процесса его концентрация равна 0. Концентрации этилена и этана, напротив, возрастают в процессе синтеза с 0,1 и 0,44 % до 4 и 2,6 % соответственно. Для пропилена, как и в случае этилена и этана, также можно отметить увеличение значения концентрации с 0,02 % в начале цикла до 0,25 % на 45-й минуте. Если в начале (0 минут) образования УНМ содержание пропана, изо-бутана и бутана составляет 0,44, 2,78 и 3,81 %, то по окончании процесса количество этих соединений снижается до значений 0,25, 0,04 и 0,04 % соответственно.

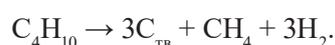
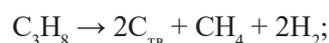
Таблица 2. Результаты определения количественного состава газовой среды в процессе пиролиза смеси пропан–бутан

Table 2. Results of the quantitative composition of the gaseous products during the pyrolysis of the propane-butane mixture

Образец Sample	Компонент (об. %) Component (w. %)								
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₁₀
0 мин	72,77	21,62	0,003	0,10	0,44	0,02	0,44	2,78	3,81
10 мин	74,55	28,79	0,001	0,35	1,38	0,027	0,04	1,38	0
15 мин	70,11	28,55	0,001	0,5	1,73	0,006	0,055	0,005	0
20 мин	67,99	31,84	0,002	0,88	2,31	0,034	0,14	0,01	0,07
25 мин	66,83	33,23	0,001	1,28	2,62	0,095	0,195	0,026	0,03
30 мин	64,64	35,02	0,003	1,85	2,79	0,14	0,24	0,035	0,04
35 мин	60,39	34,185	0,002	2,44	2,72	0,19	0,26	0,02	0,04
40 мин	58,66	37,41	0,003	3,56	2,91	0,25	0,28	0,049	0,05
45 мин	51,46	34,76	0,003	3,96	2,59	0,25	0,25	0,04	0,04

По мере протекания процесса синтеза каталитическая активность поверхности, на которой происходит образование УНМ, снижается, что приводит к уменьшению скорости осаждения углерода на поверхности и к соответствующим изменениям состава отходящих газов.

На основе анализа состава отходящих газов можно предположить брутто-реакцию процесса синтеза углеродных наноматериалов:



Анализ ПАУ. Исследование экстрагированных компонентов отходящих газов проходило в два этапа – качественный и количественный анализ полученных образцов.

При качественном анализе химического состава экстрактов было обнаружено, что в отходящих газах присутствуют органические соединения, в том числе и полициклические ароматиче-

ские углеводороды (табл. 3). Значения в таблице представляют собой отношение (в %) площади пика вещества к общей площади интегрированных компонентов хроматограммы. Как видно, основную долю в отходящих газах составляют нафталин, стирол, инден и 2-метилнафталин. Следует отметить, что относительное количество опасных полициклических ароматических углеводородов, таких как антрацен и пирен, составляет в сумме примерно 2,21 %.

Т а б л и ц а 3. Компонентный состав экстрактов

T a b l e 3. Composition of extracts

Вещество Substance	Относительное содержание, % Relative content, %
Нафталин	31,60
Стирол	23,72
Инден	20,06
2-Метилнафталин	11,29
1,3-Диметилбензол	3,32
Этилбензол	2,77
3-Метил-1-этилбензол	2,69
Аценафтен	2,61
Бифенилен	2,52
Индан	2,35
Антрацен	1,18
Пирен	1,03

При количественном анализе экстрактов проводилось определение содержания 16 ПАУ. В табл. 4 представлены результаты определения содержания полициклических ароматических углеводородов в отходящих газах по сравнению с имеющимися литературными данными о допустимых пределах содержания ПАУ в воздухе и почве.

Т а б л и ц а 4. Допустимые пределы содержания ПАУ в соответствии с нормативными документами и измеренные концентрации ПАУ в экстрактах

T a b l e 4. Permissible limits of PAN content in accordance with regulatory documents and measured PAN concentrations in extracts

Соединение Compound	ОДК в почве, мг/кг APS in soil, mg/kg	ПДК в воздухе мг/м ³ MPS in air, mg/m ³	Концентрация в отходящих газах, мг/м ³ Concentration in exhaust gases, mg/m ³	Кратность превышения ПДК в воздухе Excess rate of MPS in air
Аценафтен	н. д.	0,5	2,94329	5,89
Аценафтилен	н. д.	1,5	3,13896	2,09
Антрацен	0,05	0,1	2,19508	21,95
Бенз(а)антрацен	0,02	0,005	0,07174	14,35
Бенз(а)пирен	н. д.	<0,00015	0,01362	90,80
Бенз(g,h,i)перилен	0,02	н. д.	0,00094	–
Бенз(b)флуорантен	0,025	н. д.	0,00397	–
Бенз(k)флуорантен	н. д.	н. д.	0,00314	–
Дибенз(a,h)антрацен	н. д.	0,000005	0,00051	102,00
Индено(1,2,3-c,d)пирен	0,025	н. д.	0,00394	–
Нафталин	0,015	20	10,55326	0,53
Пирен	н. д.	0,03	0,04693	1,56
Фенантрен	н. д.	0,8	2,13008	2,66
Флуорантен	0,015	н. д.	0,00618	–
Флуорен	н. д.	н. д.	1,91762	–
Хризен	0,02	н. д.	0,05146	–

П р и м е ч а н и я: ПДК – предельно допустимая концентрация данного вещества; ОДК – ориентировочно допустимая концентрация данного вещества; н. д. – нет данных.

N o t e s: MPS – maximum permissible concentration of a given substance; APC – approximate permissible concentration of the substance; n. etc. – no data available.

В отходящих газах установки получения УНМ наибольшее значение концентраций имеют следующие ПАУ: нафталин, аценафтилен, аценафтен, антрацен, фенантрен и флуорен. Концентрации пересчитаны по отношению к объему экстрагента и объему отходящих газов, прошедших через ловушку (в табл. 4 указаны приведенные значения концентраций). Стандартное отклонение измерений не превышало $\pm 20\%$. При сравнении измеренных величин содержания веществ нормируемых по предельно допустимым концентрациям (ПДК) в воздухе видно, что количество ПАУ значительно превышает разрешенную величину.

Полициклические ароматические углеводороды относятся к токсичным и канцерогенным химическим соединениям, степень токсичности которых зависит от структуры вещества. Наиболее опасными из этих веществ являются бенз(а)пирен и бенз(а)антрацен, вследствие чего концентрацию этих соединений контролируют в окружающем воздухе вблизи ТЭЦ и других производственных предприятий. Канцерогенной активностью обладают и многие производные ПАУ с различными функциональными группами. Поэтому несмотря на отсутствие данных о воздействии некоторых полициклических ароматических углеводородов (например, флуорен или бенз(к)флуорантен) на здоровье человека, или их недостаточность, следует измерять и оценивать содержание этих веществ. В настоящее время в Российской Федерации существуют методики, в которых определяется только бенз(а)пирен или нафталин, антрацен, флуорантен, фенантрен, пирен и хризен, в отличие от зарубежных методик (США, ЕС) определения полиароматических углеводородов в воде, воздухе или почве, в которых определяют 16 или 24 приоритетных ПАУ. Этим методикам аналогичен и соответствует Государственный стандарт Республики Беларусь СТБ 17.13.05-03-2008/ISO 11338-1:2003 «Охрана окружающей среды и природопользование. Мониторинг окружающей среды. Выбросы от стационарных источников. Определение полициклических ароматических углеводородов в газах и на частицах», часть 1 – «Отбор проб» и часть 2 – «Подготовка проб, очистка и определение». Количественный анализ экстрактов на содержания 16 ПАУ проводился в соответствии с указанным нормативным документом.

Заключение. Измерения состава отходящих газов работающей установки показали, что основными компонентами являются водород и метан. Из представленных данных видно, что наибольшее значение водорода наблюдается на начальном этапе синтеза $\sim 75\%$, а затем происходит постепенное снижение содержания до $\sim 51\%$. Содержание метана, напротив, возрастает к окончанию синтеза почти в 2 раза. В отходящих газах практически не содержится ацетилен, а содержание этилена и этана к моменту окончания синтеза увеличивается примерно в 40 и 6 раз по сравнению с начальными значениями соответственно. Содержание пропилена в процессе работы установки увеличивается более чем в 10 раз, а величины значений содержания пропана, изо-бутана и бутана по окончании процесса синтеза наноматериала снижаются практически до нулевого значения. Такие изменения состава отходящих газов в процессе пиролиза исходных углеводородов обусловлены процессом дезактивации каталитической поверхности осаждения углеродных наноматериалов.

Установлено, что изменение состава исходной пропан-бутановой смеси в результате расходования баллона не оказывает существенного влияния на качественный и количественный состав отходящих газов установки синтеза УНМ.

В работе проведено комплексное определение и измерение концентраций веществ, содержащихся в отходящих газах установки каталитического синтеза углеродных наноматериалов, а также динамика изменений значений этих составляющих в процессе работы установки. Для этого в процессе мониторинга отходящие газы разделялись на поглощаемую и непоглощаемую ловушкой части, качественный и количественный состав которых затем был исследован. Проведенные эксперименты показали, что при пиролизе пропан-бутановой смеси в описанных выше условиях помимо углеродного наноматериала и неконденсируемых газообразных продуктов образуются полициклические ароматические углеводороды. В соответствии с утвержденной в Республике Беларусь методикой измерены значения 16 ПАУ, обнаруженных в отходящих газах. Проведено сравнение полученных значений с нормативными предельно допустимыми концентрациями канцерогенов в воздухе. Установлено, что концентрации пирена, фенантрена, аценафтилена, аценафтена превышают норму в 1,5–6 раз, а содержание таких токсикантов, как бенз(а)-

антрацен, антрацен, бенз(а)пирен и дибенз(а,һ)антрацен превышают норму более чем в 14, 20, 90 и 100 раз соответственно. Полученная информация позволяет оценить степень опасности для экологии и возможный вклад таких установок в загрязнение окружающей среды, а также прогнозировать защитные меры по снижению вредного воздействия.

Список использованных источников

1. Улучшение эксплуатационных свойств эластомерных композиций введением углеродных наноматериалов / К. В. Вишнеvский [и др.] // ИФЖ. – 2012. – Т. 85, № 5. – С. 1000–1005.
2. Влияние углеродных наноматериалов на свойства лакокрасочных покрытий / С. А. Жданок [и др.] // ИФЖ. – 2011. – Т. 84, № 6. – С. 1158–1161.
3. Влияние многостенных нанотрубок на прививку транс-этилен-1,2-дикарбоновой кислоты к макромолекулам полиолефинов / Ю. М. Кривогуз [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 4. – С. 47–54.
4. Плиско, Т. В. Структура и свойства дисперсий многостенных углеродных нанотрубок в N,N-диметиламиде / Т. В. Плиско, А. В. Бильдюкевич // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 3. – С. 67–70.
5. Исследование процесса синтеза углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза пропан-бутановой смеси, на NiMgY катализаторах / Д. А. Турлаков [и др.] // Фундаментальные и прикладные исследования, инновационные технологии, профессиональное образование: сб. тр. – Тамбов, 2006. – С. 51–52.
6. Об условиях формирования углеродных наноструктур на стальной поверхности реактора из продуктов разложения углеводородов в низкотемпературной плазме. Анализ материала по глубине, гипотеза механизма роста / С. А. Жданок [и др.] // ИФЖ. – 2011. – Т. 84, № 3. – С. 491–497.
7. Разложение летучих органических соединений в плазменно-каталитическом реакторе / С. А. Жданок [и др.] // ИФЖ. – 2009. – Т. 82, № 2. – С. 358–363.
8. Моделирование нестационарных процессов каталитического синтеза углеродных нанотрубок в псевдооживленном слое / О. С. Рабинович [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – № 1(48). – С. 3–14.
9. Комплексный характер влияния полициклических ароматических углеводородов на метаболические процессы как важный фактор, определяющий особенности их канцерогенной активации / А. Г. Сыса [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 1. – С. 53–56.
10. Грушевский, В. В. Мониторинг полициклических ароматических углеводородов в объектах окружающей среды / В. В. Грушевский // Біялогія і хімія. – 2013. – № 12. – С. 61–68.
11. Quantification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) found in gas and particle phases from pyrolytic processes using gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS) / Nazly E. Sánchez [et al.] // Fuel. – 2013. – Vol. 107. – P. 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.065>

References

1. Vishnevskii K. V., Shashok Z. S., Prokopchuk N. R., Krauklis A. V., Zhdanok S. A. Improvement of the service properties of elastomer compositions by introduction of carbon nanomaterials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 5, pp. 1086–1091. <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0750-6>
2. Zhdanok S. A., Krauklis A. V., Borisevich K. O., Prokopchuk N. P., Nikolaichik A. V., Stanovoi P. G. Influence of carbon nanomaterials on the properties of paint coatings. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2011, vol. 84, no. 6, pp. 1242–1246. <https://doi.org/10.1007/s10891-011-0590-9>
3. Krivoguz Yu. M., Krauklis A. V., Pesetskii S. S., Zhdanok S. A., Borisevich K. O. Effect of multiwalled nanotubes on grafting of trans-ethylene-1,2-dicarboxylic acid onto polyolefin macromolecules. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2014, vol. 58, no. 4, pp. 47–54 (in Russian).
4. Plisko T. V., Bilydukevich A. V. Structure and properties of the dispersions of multi-walled carbon nanotubes in N,N-dimethylacetamide. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2014, vol. 58, no. 3, pp. 67–70 (in Russian).
5. Turlakov D. A., Tkachev A. G., Negrov V. L. Investigation of the synthesis of carbon nanotubes by catalytic pyrolysis of propane-butane mixture on NiMgY catalysts. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya, innovacionnye tekhnologii, professional'noe obrazovanie: sbornik trudov [Fundamental and applied studies, innovation technologies, professional education: collection of works]*. Tambov, 2006, pp. 51–52 (in Russian).
6. Zhdanok S. A., Buyakov I. F., Krauklis A. V., Borisevich K. O., Kiyashko M. V. On the conditions of formation of carbon nanostructures on the steel reactor surface from the products of hydrocarbon decomposition in a low-temperature plasma. Depth analysis of the material, hypothesis of the growth mechanism. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2011, vol. 84, no. 3, pp. 533–539. <https://doi.org/10.1007/s10891-011-0501-0>
7. Zhdanok S. A., Gorbатов S. V., Mikhailov A. A., Plevako K. F., Plevako F. V., Prikhod'ko E. N., Shushkov S. V. Decomposition of volatile organic compounds in a plasma-catalytic reactor. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2009, vol. 82, no. 2, pp. 355–360. <https://doi.org/10.1007/s10891-009-0186-9>
8. Rabinovich O. S., Borodulya V. A., Blinova A. N., Kuznetsov V. L., Delidovich A. I., Krasnikov D. V. Modeling of nonstationary processes of catalytic synthesis of carbon nanotubes in a fluidized bed. *Theoretical Foundation of Chemical*, 2014, vol. 48, no. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1134/s0040579514010114>

9. Sysa A. G., Panibrat O. V., Babenko A. S., Shabunya P. S., Fatykhova S. A., Kiselev P. A. Complex nature of the influence of polycyclic aromatic hydrocarbons on the metabolic processes as an important determinant of their carcinogenic activation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2014, vol. 58, no. 1, pp. 53–56 (in Russian).

10. Grushevskiy V. V. Monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons in environmental objects. *Biyalogiya i khimiya [Biology and Chemistry]*, 2013, no. 12, pp. 61–68 (in Russian).

11. Sánchez N. E., Salafranca J., Callejas A., Millera Á., Bilbao R., Alzueta M. U. Quantification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) found in gas and particle phases from pyrolytic processes using gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS). *Fuel*, 2013, vol. 107, pp. 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.065>

Информация об авторах

Генарова Татьяна Николаевна – науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tatiana-susliako@mail.ru.

Грушевский Владимир Владиславович – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: grushevskiy_v@mail.ru.

Кривошеев Павел Николаевич – канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pavlik@dnpr.itmo.by.

Пенязьков Олег Глебович – академик, д-р физ.-мат. наук, директор. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: penyaz@dnpr.itmo.by.

Буяков Игорь Федорович – канд. техн. наук, заведующий лабораторией. Передовые исследования и технологии (ул. Совхозная, 1, 223058, Лесковка, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: buyakov@artech.by.

Дмитренко Юрий Михайлович – канд. техн. наук, заведующий лабораторией. Передовые исследования и технологии (ул. Совхозная, 1, 223058, Лесковка, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: dmitrenko@artech.by.

Жданок Сергей Александрович – академик, д-р физ.-мат. наук. Национальная академия наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ceo@art-pte.com.

Чернухо Андрей Павлович – заместитель директора. Передовые исследования и технологии (ул. Совхозная, 1, 223058, Лесковка, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: chern@artech.by.

Information about the authors

Henarava Tatiana Mikalaeuna – Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tatiana-susliako@mail.ru.

Hrushevskiy Uladzimir Uladzislavovich – Ph. D. (Chemistry), Leading researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: grushevskiy_v@mail.ru.

Krivosheev Pavel Nikolaevich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pavlik@dnpr.itmo.by.

Penyazkov Oleg Glebovich – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Director. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: penyaz@dnpr.itmo.by.

Buiakov Igar Fedaravich – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory. Advanced Research and Technologies (1, Sovkhoznaya Str., 223058, Leskovka, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: buyakov@artech.by.

Dmitrenko Yuriy Mihaylavich – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory. Advanced Research and Technologies (1, Sovkhoznaya Str., 223058, Leskovka, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: dmitrenko@artech.by.

Zhdanok Siarhei Alaksandravich – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics). National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ceo@art-pte.com.

Chernukho Andrey Paulavich – Deputy director. Advanced Research and Technologies (1, Sovkhoznaya Str., 223058, Leskovka, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: chern@artech.by.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 541.18.04; 544.023.2

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-694-702>

Поступило в редакцию 13.06.2018

Received 13.06.2018

Академик А. В. Бильдюкевич, Т. А. Глевицкая, А. А. Шустиков*Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь***ВЛИЯНИЕ «ЖЕСТКОСТИ» ОСАДИТЕЛЯ В ФОРМОВОЧНОМ РАСТВОРЕ
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОЛИЭФИРСУЛЬФОНОВЫХ МЕМБРАН**

Аннотация. Изучено влияние чисел осаждения (ЧО) смесей жесткого и мягкого осадителей на фазовое состояние и вязкость растворов полиэфирсульфон(ПЭС)/диметилацетамид(ДМАА)/осадитель, структуру и свойства мембран, получаемых на их основе. В качестве добавок осадителей в растворы ПЭС в ДМАА использовали ПЭГ-400 (ЧО > 1000), воду (ЧО = 10,6), 85 %-ную фосфорную кислоту (ЧО = 13,0), глицерин (ЧО = 27,8) и их смеси. На примере смеси Гл/ПЭГ-400 установлено, что с увеличением ЧО добавки область существования стабильных гомогенных растворов расширяется, а при постоянной концентрации смеси Гл/ПЭГ-400 вязкость растворов уменьшается. Показано, что с увеличением ЧО добавки Гл/ПЭГ-400 при постоянной степени насыщения формовочного раствора (0,94–0,95) происходит возрастание удельной производительности мембран по воде с 13 до 150 л/м²ч. Наиболее резко возрастание потока происходит в интервале ЧО 39,7–125 г/дл. Электронно-микроскопическое исследование показало, что структура мембран в поперечном сечении не претерпевает существенных изменений при варьировании ЧО добавки, однако с увеличением ЧО наблюдается возрастание толщины селективного слоя мембран: при переходе от ЧО = 39,7 г/дл к ЧО = 750 г/дл толщина селективного слоя возрастает с 1 до 4,5 мкм. Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что структура и свойства ультрафильтрационных мембран определяются не только степенью насыщения формовочного раствора, но и жесткостью осадителя, введенного в состав формовочного раствора.

Ключевые слова: полиэфирсульфон, мембрана, инверсия фаз, число осаждения, морфология мембран, транспортные характеристики

Для цитирования. Бильдюкевич, А. В. Влияние «жесткости» осадителя в формовочном растворе на структуру и свойства полиэфирсульфоновых мембран / А. В. Бильдюкевич, Т. А. Глевицкая, А. А. Шустиков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 694–702. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-694-702>

Aleksandr V. Bilyukevich, Tatsiana A. Hliavitskaya, Anton A. Shustikov*Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***INFLUENCE OF DIFFERENT NON-SOLVENT ADDITIVES TO THE CASTING SOLUTION
ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF PES MEMBRANES**

Abstract. The effect of the precipitation value (PV) of mixtures of strong and weak non-solvent additives (NSA) on the phase state and viscosity of polyethersulfone (PES)/dimethylacetamide (DMAc)/non-solvent solutions and on the structure and performance of PES membranes were studied. Polyethylene glycol 400 (PEG-400, PV > 1000), water (PV = 10.6), 85 % phosphoric acid (PV = 13.0), glycerol (Gly, PV = 27.8) and mixtures thereof were used as NSA for PES-DMAc solutions. Using Gly/PEG-400 mixtures it was established that the increase in PV of NSA leads to the increase of a miscibility gap on the phase diagram. At a constant concentration of Gly/PEG-400 mixture, the viscosity of the solutions decreases. For a constant ratio (0.94–0.95) of the NSA amount added to the polymer-solvent system to the NSA amount causes a phase separation of the casting solution (coagulation value) increase in PV of NSA Gly/PEG-400 leads to an increase of the membrane pure water flux (PWF) from 13 up to 150 l/m²h at 1 bar. The most dramatic increase in PWF occurs in the range of PV 39.7–125 g/dL. The results of SEM study don't show significant differences in the cross-section morphology of membranes for different PV of NSA. However, the thickness of the selective membrane layer increases from 1 up to 4.5 μm when PV increased from 39.7 up to 750 g/dL. Thus, these studies allow us to conclude that the structure and properties of ultrafiltration membranes depend not only on the coagulation value of the casting solution, but also on the precipitation value of NSA.

Keywords: polyethersulfone, membrane, phase inversion, precipitation value, morphology of membranes, transport properties

For citation: Bilyukevich A. V., Hliavitskaya T. A., Shustikov A. A. Influence of different non-solvent additives to the casting solution on the structure and properties of PES membranes. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 694–702 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-694-702>

Введение. Полиэфирсульфон (ПЭС) нашел широкое применение в качестве мембранообразующего материала благодаря исключительному набору характеристик: высокая устойчивость к химическому и термическому воздействию, механическая прочность, а также относительная простота реализации производства мембран в разнообразных конфигурациях. Основным способом получения мембран на основе ПЭС – инверсия фаз в различных вариантах, которая реализуется путем осаждения гомогенного полимерного раствора при контакте с коагулянтом. В качестве растворителей для ПЭС чаще всего используются N,N-диметилацетамид (ДМАА), N-метил-2-пирролидон (МП), N,N-диметилформамид (ДМФА), а в качестве коагулянта – вода или смесь вода–растворитель. Основным требованием, предъявляемым к исходному формовочному раствору, является его гомогенность, т. е. состав раствора на тройной фазовой диаграмме «полимер/растворитель/осадитель» должен располагаться в области между осью «полимер/растворитель» и бинадалью [1]. В ряде работ установлено, что получение высокопроизводительных структур наблюдается при использовании формовочных композиций, находящихся на фазовой диаграмме вблизи бинадали [1; 2]. Мембраны, полученные из таких растворов, обладают выраженной губчатой структурой, представляющей собой систему взаимосвязанных между собой пор, и характеризуются отсутствием макропустот в дренажном слое [2]. Наличие макропустот в субструктуре мембраны является нежелательным явлением, поскольку считается, что их присутствие может приводить к повреждению селективного слоя мембраны при наложении рабочего давления [3]. Введение добавок осадителя в формовочный раствор приближает состав к границе фазового разделения и является одним из ключевых способов как регулирования структуры и проницаемости мембран, так и борьбы с макропустотами [4]. В качестве добавок в формовочный раствор может быть использован широкий круг соединений: вода, одно- и многоатомные спирты, гликоли, органические кислоты и др., а также смеси различных осадителей [5–8]. Следует отметить, что используемые добавки являются осадителями различной жесткости для полимера, что обуславливает различные концентрационные пределы устойчивости и вязкостные свойства формовочных растворов [6].

Для количественной оценки положения состава формовочного раствора, включающего полимер, растворитель и осадитель (в англоязычной литературе – non-solvent additives (NSA)), относительно бинадали существует несколько подходов. В [1] авторы вводят понятие «степень насыщения» формовочного раствора (α), под которой понимается отношение количества осадителя, введенного в систему, к предельному – приводящему к распаду системы на фазы. Donliang Wang и соавт. [9; 10] предложил использовать для характеристики состава формовочных растворов так называемое осадительное соотношение (precipitable ratio ($R_{a/s}$)). Последнее представляет собой отношение массы осадителя к массе растворителя в формовочном растворе, хотя использование данного параметра представляется сомнительным, поскольку не дает информации о положении системы на фазовой диаграмме.

В производстве химических волокон для характеристики осаждающей способности (жесткости) конкретного коагулянта (осадителя) по отношению к данной системе полимер/растворитель, в частности для оценки жесткости осадительной ванны, используется «число осаждения» (ЧО) [9]. ЧО определяется как количество осадителя, приводящее к фазовому разделению 100 мл 1 %-ного раствора полимера и выражается в г/дл. Ряд авторов используют данный параметр для характеристики жесткости осадителя в составе формовочного раствора [11–13]. В [11] на примере растворов полифениленизофталамида в ДМАА показано, что введение в систему полимер/растворитель осадителей различной жесткости (имеющих различные значения ЧО) оказывает существенное влияние на морфологию и транспортные характеристики получаемых мембран. В [12] для системы «ПЭС/осадитель/ДМАА» установлено, что при введении в 15 %-ные растворы ПЭС осадителей с ЧО в интервале 15–50 г/дл производительность мембран в зависимости от ЧО вводимого осадителя изменяется экстремальным образом с максимумом в области 19–22 г/дл и существенно сказывается на структуре мембран. Однако в области максимума авторы [12] использовали метастабильные составы, претерпевшие фазовое разделение и характеризующиеся пониженным светопропусканием.

В англоязычной литературе в качестве критерия выбора добавки осадителя в формовочный раствор, а также для оценки влияния различных коагулянтов на структуру и свойства мембран используется параметр coagulation value (CV), или precipitation value [7–15]. Количественно CV определяется титрованием раствора полимера (иногда с добавкой осадителя) осадителем до появления видимого помутнения. Однако имеются существенные методические отличия при определении данного параметра, связанные с объемом титруемого раствора, его концентрацией и, соответственно, с размерностью получаемой величины CV. В [9] для обоснования состава формовочного раствора и выбора коагулянта для формирования полимерных мембран определение CV проводили титрованием 100 г 2 %-ного раствора ПЭС или ПСФ в различных растворителях. Juin-Yin Lai и соавт. [14] определяли CV титрованием этанолом 23,75 мл 4 %-ного раствора полимера, содержащего соответствующую добавку осадителя. В [15] для характеристики осаждающей способности коагулянта также использовали параметр CV, под которым понимали количество коагулянта, которое приводит к фазовому разделению 6,5 мл 2 %-ного раствора полимера в растворителе. Авторы данной работы выявили, что рост CV коагулянта способствует уменьшению удельного объема пор (pore specific volume).

Из всего вышеперечисленного можно сделать вывод, что фактически параметр «coagulation value» является аналогом термина «число осаждения». Следует отметить, что ЧО описывает фазовое равновесие в области низких концентраций полимера (<2 %) и не содержит информации о поведении системы в области концентрированных растворов, которые используются для формирования мембран. В [11] предпринята попытка установить взаимосвязь параметра CV с осадительным соотношением $R_{a/s}$ на примере растворов ПЭС и полисульфона в ДМАА и МП, содержащих в качестве осадителей воду и метанол. Предложено уравнение и показано удовлетворительное соответствие между рассчитанными и экспериментальными данными, что может быть использовано для прогнозирования состава формовочного раствора, содержащего осадитель. В случае концентрированных растворов Yingnan Feng и соавт. [13] используют тот же параметр CV уже для характеристики термодинамической стабильности 26 % формовочных растворов на основе сульфированного полифениленсульфона, содержащих в качестве добавки ПЭГ-400. В данном случае под CV принимается количество воды (коагулянта) в граммах, которое приводит к разделению фаз 10 г формовочного раствора. Авторы установили, что увеличение концентрации ПЭГ-400 в формовочном растворе приводит к уменьшению CV для данного раствора. Уменьшение значения CV за счет введения осадителя в формовочный раствор может привести к образованию асимметричных мембран с тонким скин-слоем и блокировать образование макроидов в субструктуре мембран из-за ускоренной кинетики фазового разделения формовочного раствора [13].

Таким образом, литературный поиск не позволил выявить четкую взаимосвязь между жесткостью (параметрами ЧО или CV) используемых добавок осадителей в формовочные растворы и свойствами и структурой мембран. Это обусловлено различиями в методических подходах, а также тем, что не учитывается положение состава формовочного раствора на фазовой диаграмме относительно бинодали, т. е. степень насыщения формовочного раствора. В то же время жесткость осадителя определяет температурно-концентрационные границы устойчивости растворов полимеров и их вязкостные свойства, что безусловно должно сказываться на кинетике фазового разделения и свойствах получаемых мембран.

Целью данной работы является выявление взаимосвязи «жесткости» осадителя при фиксированной степени насыщения формовочного раствора со структурой и свойствами ультрафильтрационных мембран из полиэфирсульфона.

Материалы и методы исследования. В качестве исходных реагентов для приготовления формовочных растворов использовали полиэфирсульфон марки Ultrason E 6020P ($M_w = 58000$ г/моль) производства BASF (Германия), диметилацетамид (BASF, Германия), в качестве добавок осадителей в формовочный раствор использовали глицерин (ГОСТ 6259–75) и полиэтиленгликоль $<M_n> = 400$ г/моль (ПЭГ-400) производства BASF (Германия).

Число осаждения определяли титрованием 100 мл 1 %-ного раствора ПЭС в ДМАА индивидуальными осадителями и их смесями с ПЭГ-400 в различных соотношениях до появления видимого помутнения и выражали в г/дл.

Приготовление формовочных растворов ПЭС в ДМАА с добавкой глицерина и ПЭГ-400 осуществляли на специально сконструированном лабораторном стенде, включающем стеклянную круглодонную колбу и верхнеприводную мешалку (ИКА RW 20 Digital, Германия). Температура приготовления растворов – 90 °С, время приготовления – 3 ч, скорость перемешивания – 400 об · мин⁻¹. Концентрация полимера в составе формовочного раствора во всех случаях оставалась постоянной и составляла 22 мас. %. Расчет степени насыщения формовочных растворов описан в [1].

Мембраны получали методом мокрого формования. Формовочный раствор наносили на стеклянную подложку с помощью щелевой фильеры, позволяющей получать полимерную пленку требуемой толщины. В качестве коагулянта использовали дистиллированную воду. Сформованную мембрану отмывали от остатков растворителя и импрегнировали 30 %-ным водным раствором глицерина для предотвращения контракции пор.

Значения удельной производительности мембран (J , л/м²ч) вычисляли по формуле

$$J = V / (St),$$

где V – объем фильтрата, л; S – площадь рабочей поверхности мембраны, м²; t – время фильтрации.

Коэффициент задерживания вычисляли по формуле

$$R = \left(1 - \frac{C_{\phi}}{C_{исх}} \right) 100 \%,$$

где C_{ϕ} – концентрация калибранта в фильтрате, г/л; $C_{исх}$ – концентрация калибранта в исходном растворе, г/л. В качестве калибранта использовали 0,3 %-ный водный раствор поливинилпирролидона (ПВП) марки К-30 (Fluka, Германия).

Изучение морфологии мембран проводили на растровом электронном микроскопе LEO 1420, осуществляя предварительную пробоподготовку методом криогенного разлома в жидком азоте с последующим нанесением слоя золота посредством катодного распыления в вакуумной установке ЕМТЕСН К 550Х (Германия).

Результаты и их обсуждение. В качестве потенциальных осадителей различной жесткости для растворов ПЭС в ДМАА использовали мягкий – ПЭГ-400 (ЧО > 1000) и более жесткие оса-

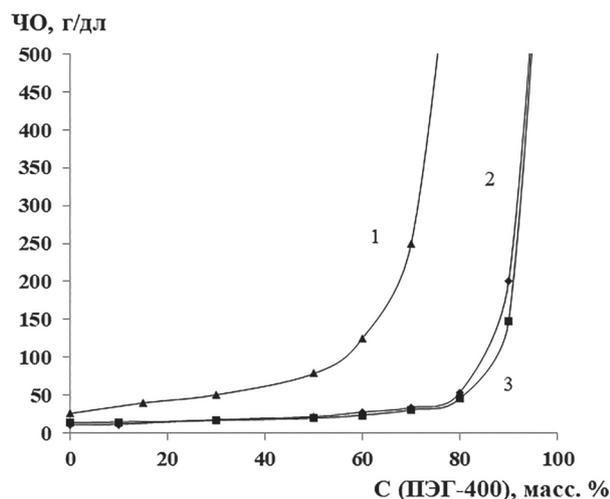


Рис. 1. Зависимость ЧО смесей Гл/ПЭГ-400 (1), Вода/ПЭГ-400 (2) и H₃PO₄/ПЭГ-400 (3) от концентрации ПЭГ-400 в смеси

Fig. 1. Effect of PEG-400 concentration on the precipitation value (PV) for mixed non-solvents PEG-400–Glycerol (1), PEG-400–Water (2) and PEG-400–H₃PO₄ (3)

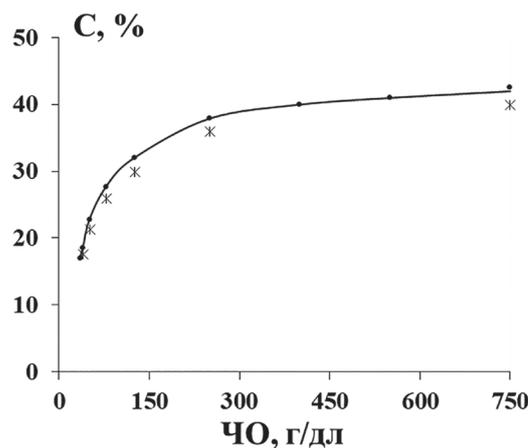


Рис. 2. Зависимость максимальной концентрации смеси Гл/ПЭГ-400 в 22 %-ных растворах ПЭС от ЧО смеси Гл/ПЭГ-400. Звездочкой отмечены составы, используемые для получения мембран

Fig. 2. Dependence of the maximum concentration of NSA PEG-400–glycerol in the casting solution from non-solvent PV. Star indicates the compositions used for membranes formation

Составы и вязкость формовочных растворов при $\alpha = 0,94–0,95$ в зависимости от ЧО осадителя
Compositions and viscosity of casting solutions at $\alpha = 0,94–0,95$ for different precipitation value (PV) of NSA

Состав формовочного раствора при $\alpha = 0,94–0,95$ Composition of casting solutions at $\alpha = 0,94–0,95$				ЧО смеси Гл/ПЭГ-400, г/дл Number of precipitations of the GLY-PEG-400, g/dL	Вязкость, Па · с Viscosity, Pa · s
ПЭС PES	Глицерин Glycerin	ПЭГ-400 PEG-400	ДМАА DMAc		
22	15,0	2,6	60,4	39,7	12,1
22	14,8	6,6	56,6	50,4	14,0
22	13,0	13,0	52,0	78,3	14,9
22	12,0	18,0	48,0	125	19,2
22	10,8	25,2	42,0	250	25,9
22	8,0	32,0	38,0	750	27,5

дители: воду (ЧО = 10,6 г/дл), 85 %-ную фосфорную кислоту (ЧО = 13,0 г/дл), глицерин (ЧО = 27,8 г/дл), а также смеси мягкого и жесткого осадителей в различных соотношениях. Результаты определения ЧО для смесей ПЭГ-400 с водой, фосфорной кислотой и глицерином представлены на рис. 1. Как видно, числа осаждения исследуемых смесей по отношению к 1 %-ному раствору ПЭС в ДМАА изменяются в широком диапазоне: от 15 до 1000 г/дл.

Зависимость ЧО от концентрации компонентов в смеси носит неаддитивный характер. Влияние более «жесткого» осадителя на изменение ЧО превалирует вплоть до концентрации ПЭГ-400 70–80 %, и только затем наблюдается резкий рост ЧО, свидетельствующий о снижении осаждающей способности смеси. Для смесей глицерин/ПЭГ-400 зависимость ЧО от концентрации глицерина имеет более пологий характер по сравнению со смесями вода/ПЭГ-400 и H_3PO_4 /ПЭГ-400. Полученные результаты свидетельствуют о возможности регулирования осаждающей способности («жесткости») смеси Гл/ПЭГ-400 в более широких пределах и подтверждают перспективность использования смеси Гл/ПЭГ-400 для изучения влияния ЧО на структуру и свойства мембран на основе полиэфирсульфона. С учетом полученных значений ЧО для дальнейшего введения в состав формовочных растворов в качестве осадителя были отобраны смеси Гл/ПЭГ-400 со следующим массовым соотношением компонентов: 85/15 (ЧО = 39,7 г/дл), 70/30 (ЧО = 50,4 г/дл), 50/50 (ЧО = 78,3 г/дл), 40/60 (ЧО = 125 г/дл), 30/70 (ЧО = 250 г/дл), 20/80 (ЧО = 750 г/дл).

На рис. 2 представлен фрагмент фазовой диаграммы для 22 %-ного раствора ПЭС с добавкой смесей Гл/ПЭГ-400, различающихся значением ЧО. Из рис. 2 следует, что увеличение ЧО осадителя приводит к возрастанию концентрации Гл/ПЭГ-400, при которой возможно образование стабильных гомогенных растворов. Так, для глицерина (ЧО = 27,8 г/дл) максимальная концентрация добавки составила 17 %, для его смесей с ПЭГ-400 с ЧО = 39,7 г/дл – 18,7 %, а в случае смеси с ЧО 750 г/дл – 42,5 %, а в случае ПЭГ-400 раствор остается гомогенным и кинетически стабильным вплоть до концентрации добавки 60 %.

Формование мембран осуществлялось из четырехкомпонентных растворов состава ПЭС/Гл/ПЭГ-400/ДМАА при постоянной концентрации ПЭС (22 %). Поскольку от состава смеси Гл/ПЭГ-400 существенным образом зависит как количество вводимого осадителя, так и положение финальной композиции относительно бинадали (см. рис. 2), для получения сопоставимых результатов состав композиций подбирали таким образом, чтобы они имели близкую степень насыщения $\alpha = 0,94–0,95$, т. е. находились вблизи бинадали. Данное значение степени насыщения выбрано специально, чтобы ис-

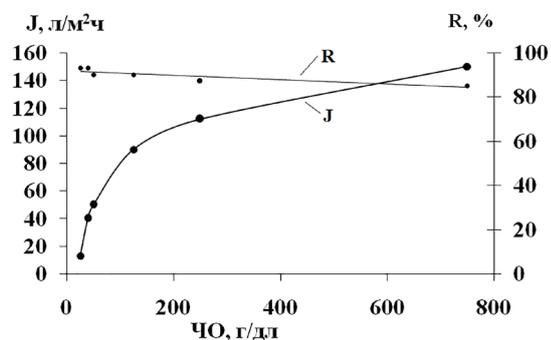


Рис. 3. Зависимость удельной производительности мембран по воде (J) и коэффициента задерживания (R) по ПВП К-30 от числа осаждения (ЧО) смесевое нерастворителя

Fig. 3. Dependence of pure water flux of membranes (J) and rejection (R) of PVP K-30 on the precipitation value (PV) of NSA PEG-400–glycerol

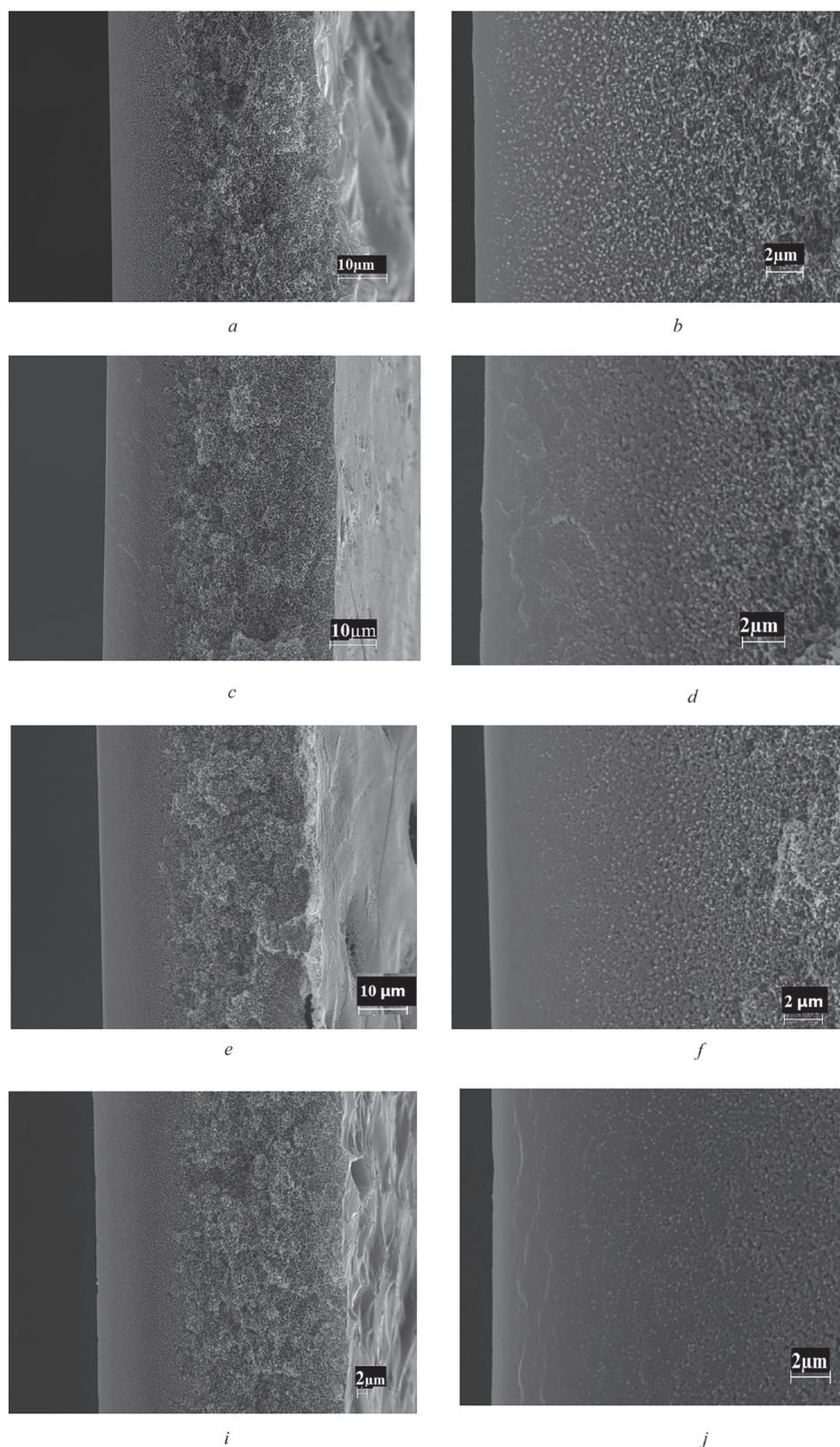


Рис. 4. Электронные микрофотографии поперечных срезов (*a, c, e, i*) и фрагменты селективного слоя при большем увеличении (*b, d, f, j*) мембран, полученных из формовочных растворов с добавлением смесового нерастворителя с различными значениями ЧО: *a, b* – 39,7; *c, d* – 78,3; *e, f* – 125; *i, j* – 750 г/дл

Fig. 4. Scanning electron micrograph of cross section structure (*a, c, e, i*) and fragment of top-layer (skin-layer) at a higher zoom (*b, d, f, j*) of PES membranes prepared from a casting solutions with NSA PEG-400 – glycerol for different PV: *a, b* – 39.7; *c, d* – 78.3; *e, f* – 125; *i, j* – 750 g/dL

ключить наличие макропустот в дренажном слое мембран. Соответствующие составы и их вязкость приведены в таблице.

При фиксированной концентрации добавки уменьшение ЧО осадителя приводит к возрастанию динамической вязкости растворов ПЭС. Так, при введении 15 %-ной добавки в состав формовочного раствора наблюдается постепенное возрастание вязкости растворов при увеличении «жесткости» осадителя: так, для смеси с ЧО = 750 вязкость составляет 3,78 Па · с, для ЧО = 78,3 г/дл – 5,15 Па · с, а для ЧО = 50,4 г/дл – 6,04 Па · с. При использовании мягких осадителей (с ЧО > 80 г/дл) максимальная концентрация добавки, при которой формовочный раствор остается однофазным, существенно выше. Данное обстоятельство позволяет в широких пределах регулировать вязкость формовочных растворов. Так, при введении 15 %-ной смеси Гл/ПЭГ-400 с ЧО = 750 вязкость составляет 3,78 Па · с, а при концентрации смеси в растворе 40 % вязкость достигает 27,5 Па · с (таблица).

На рис. 3 представлены зависимости удельной производительности мембран по воде (J) и коэффициента задерживания (R) по ПВП (К-30) от ЧО осадителя. Как видно, с увеличением ЧО осадителя происходит возрастание удельной производительности мембран по воде при незначительном снижении значений коэффициента задерживания. Наиболее резко возрастание потока происходит в интервале ЧО 39,7–125 г/дл, затем наблюдается более плавное увеличение производительности мембран по воде.

Электронно-микроскопическое изучение структуры мембран показало, что при постоянной степени насыщения формовочного раствора структура мембран в поперечном сечении не претерпевает существенных изменений при варьировании ЧО осадителя (рис. 4).

Структуру всех образцов можно охарактеризовать следующим образом: за плотным селективным слоем следует менее плотный переходной слой в структуре которого уже различимы структурные элементы (рис. 4, *b, d, f, j*), переходящий в «пенообразный» дренажный слой, который выполняет роль поддерживающей подложки. Оценка толщины селективного слоя мембран показала, что при переходе от ЧО = 39,7 г/дл к ЧО = 78,3 г/дл толщина возрастает с 1 до 2,5 мкм, а для ЧО = 750 г/дл толщина селективного слоя составила 4,5 мкм. Также с увеличением ЧО происходит постепенное снижение пористости дренажного слоя мембран – наблюдается переход от достаточно разрыхленной структуры переходного слоя для ЧО = 39,7 г/дл (рис. 4, *a, b*) к более плотной структуре, и для ЧО = 750 г/дл (рис. 4, *i, j*) структура матрицы представляет собой наиболее плотное образование. Предполагается, что подобные структурные изменения могут быть связаны с увеличением вязкости раствора формовочной композиции [6], а также с различиями в строении селективного слоя, структура которого неразрешима методом СЭМ (при использовании 20000-кратном увеличении).

Заключение. На примере формовочных растворов ПЭС/ДМАА/осадитель со степенью насыщения $\alpha = 0,94–0,95$ изучено влияние жесткости осадителя на структуру и транспортные свойства мембран. Установлено, что использование смеси Гл/ПЭГ-400 с различным значением числа осаждения в качестве добавки в раствор ПЭС позволяет в широких пределах регулировать область существования гомогенных растворов и их вязкость.

Установлено, что увеличение ЧО добавки осадителя приводит к возрастанию удельной производительности мембран по воде и незначительному снижению коэффициента задерживания. Наиболее резко возрастание потока происходит в интервале ЧО 39,7–125 г/дл. В частности, производительность мембран при введении добавки Гл/ПЭГ-400 с ЧО 39,7, 125 и 750 г/дл составляет 13, 93 и 150 л/м²ч соответственно. Продемонстрировано, что увеличение ЧО добавки осадителя приводит к возрастанию толщины селективного и уплотнению дренажного слоя мембран, при этом мембраны с более плотной структурой поперечного сечения характеризуются наиболее высокими значениями удельной производительности по воде.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что структура и свойства ультрафильтрационных мембран определяются не только степенью насыщения формовочного раствора, но и жесткостью (числом осаждения) используемого осадителя.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ в рамках научного проекта № X18M-044.

Acknowledgements. The work was sponsored by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research within the framework of the research project no. X18M-044.

Список использованных источников

1. Liu, Y. Characterization of morphology controlled polyethersulfone hollow fiber membranes by the addition of polyethylene glycol to the dope and bore liquid solution / Y. Liu, G. H. Koops, H. Strathmann // *J. Membrane Science*. – 2003. – Vol. 223, N 1–2. – P. 187–199. [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(03\)00322-3](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(03)00322-3)
2. Wang, Z. The role of nonsolvent in-diffusion velocity in determining polymeric membrane morphology / Z. Wang, J. Ma // *Desalination*. – 2012. – Vol. 286. – P. 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.11.006>
3. Holda, A. K. Understanding and guiding the phase inversion process for synthesis of solvent resistant nanofiltration membranes / A. K. Holda, I. F. J. Vankelecom // *J. Applied Polymer Sci.* – 2015. – Vol. 132, N 27. – App. 42130. <https://doi.org/10.1002/app.42130>
4. Xu, Z. L. Polyethersulfone (PES) hollow fiber ultrafiltration membranes prepared by PES/non-solvent/NMP solution / Z. L. Xu, F. A. Qusay // *J. Membrane Sci.* – 2004. – Vol. 233, N 1–2. – P. 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.01.005>
5. Idris, A. Synthesis, characterization and performance of asymmetric polyethersulfone (PES) ultrafiltration membranes with polyethylene glycol of different molecular weights as additives / A. Idris, M. J. Norashikin, M. Y. Noordin // *Desalination*. – 2007. – Vol. 207, N 1–3. – P. 324–339. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.08.008>
6. Chakrabarty, B. Effect of molecular weight of PEG on membrane morphology and transport properties / B. Chakrabarty, A. K. Glishal, M. K. Purkait // *J. Membrane Sci.* – 2008. – Vol. 309, N 1–2. – P. 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.10.027>
7. Preparation and characterization of polyethersulfone microfiltration membranes by a 2-methoxyethanol additive / S.-J. Shin [et al.] // *Desalination*. – 2005. – Vol. 186, N 1–3. – P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.03.092>
8. Torrestiana-Sanchez, B. Effect of nonsolvents on properties of spinning solutions and polyethersulfone hollow fiber ultrafiltration membranes / B. Torrestiana-Sanchez, R. I. Ortiz-Basurto, E. Brito-De La Fuente // *J. Membrane Sci.* – 1999. – Vol. 152, N 1. – P. 19–28. [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(98\)00172-0](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(98)00172-0)
9. Phase separation phenomena of polysulfone/solvent/organic nonsolvent and polyethersulfone/solvent/organic nonsolvent systems / D. Wang [et al.] // *J. Applied Polymer Sci.* – 1993. – Vol. 50, N 10. – P. 1693–1700. <https://doi.org/10.1002/app.1993.070501003>
10. Wang, D. Relationship between mass ratio of nonsolvent-additive to solvent in membrane casting solution and its coagulation value / D. Wang, K. Li, W. K. Teo // *J. Membrane Sci.* – 1995. – Vol. 98, N 3. – P. 233–240. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(94\)00191-z](https://doi.org/10.1016/0376-7388(94)00191-z)
11. Праценко, С. А. Структура формовочных растворов и ее влияние на характеристики полиамидных мембран / С. А. Праценко, А. В. Бильдюкевич // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*. – 1994. – Т. 36, № 3. – С. 457–460.
12. Бильдюкевич, А. В. Влияние порообразователей на свойства полиэфирсульфоновых мембран / А. В. Бильдюкевич, С. А. Праценко, Т. В. Плиско // *Хим. технология*. – 2012. – Т. 13, № 3. – С. 174–178.
13. Effects of polyethylene glycol on membrane formation and properties of hydrophilic sulfonated polyphenylenesulfone (sPPSU) membranes / Y. Feng [et al.] // *J. Membrane Sci.* – 2017. – Vol. 531. – P. 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.02.040>
14. Effect of nonsolvent additives on the porosity and morphology of asymmetric TPX membranes / J.-Y. Lai [et al.] // *J. Membrane Sci.* – 1996. – Vol. 118, N 1. – P. 49–61. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(96\)00084-1](https://doi.org/10.1016/0376-7388(96)00084-1)
15. Effects of solvent on the pore formation in asymmetric 6FDA–4,4'ODA polyimide membrane: terms of thermodynamics, precipitation kinetics, and physical factors / K.-Y. Chun [et al.] // *J. Membrane Sci.* – 2000. – Vol. 169, N 2. – P. 197–204. [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(99\)00336-1](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(99)00336-1)

References

1. Liu Y., Koops G. H., Strathmann H. Characterization of morphology controlled polyethersulfone hollow fiber membranes by the addition of polyethylene glycol to the dope and bore liquid solution. *Journal of Membrane Science*, 2003, vol. 223, no. 1–2, pp. 187–199. [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(03\)00322-3](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(03)00322-3)
2. Wang Z., Ma J. The role of nonsolvent in-diffusion velocity in determining polymeric membrane morphology. *Desalination*, 2012, vol. 286, pp. 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.11.006>
3. Holda A. K., Vankelecom I. F. J. Understanding and guiding the phase inversion process for synthesis of solvent resistant nanofiltration membranes. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, vol. 132, no. 27, app. 42130. <https://doi.org/10.1002/app.42130>
4. Xu Z. L., Qusay F. A. Polyethersulfone (PES) hollow fiber ultrafiltration membranes prepared by PES/non-solvent/NMP solution. *Journal of Membrane Science*, 2004, vol. 233, no. 1–2, pp. 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.01.005>
5. Idris A., Norashikin M. J., Noordin M. Y. Synthesis, characterization and performance of asymmetric polyethersulfone (PES) ultrafiltration membranes with polyethylene glycol of different molecular weights as additives. *Desalination*, 2007, vol. 207, no. 1–3, pp. 324–339. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.08.008>
6. Chakrabarty B., Ghoshal A. K., Purkait M. K. Effect of molecular weight of PEG on membrane morphology and transport properties. *Journal of Membrane Science*, 2008, vol. 309, no. 1–2, pp. 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.10.027>

7. Shin S.-J., Kim J.-P., Kim H.-J., Jeon J.-H., Min B. Preparation and characterization of polyethersulfone microfiltration membranes by a 2-methoxyethanol additive. *Desalination*, 2005, vol. 186, no. 1–3, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.03.092>
8. Torrestiana-Sanchez B., Ortiz-Basurto R. I., Brito-De La Fuente E. Effect of nonsolvents on properties of spinning solutions and polyethersulfone hollow fiber ultrafiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, 1999, vol. 152, no. 1, pp. 19–28. [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(98\)00172-0](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(98)00172-0)
9. Wang D., Li K., Sourirajan S., Teo W. K. Phase separation phenomena of polysulfone/solvent/organic nonsolvent and polyethersulfone/solvent/organic nonsolvent systems. *Journal of Applied Polymer Science*, 1993, vol. 50, no. 10, pp. 1693–1700. <https://doi.org/10.1002/app.1993.070501003>
10. Wang D., Li K., Teo W. K. Relationship between mass ratio of nonsolvent-additive to solvent in membrane casting solution and its coagulation value. *Journal of Membrane Science*, 1995, vol. 98, no. 3, pp. 233–240. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(94\)00191-z](https://doi.org/10.1016/0376-7388(94)00191-z)
11. Pratsenko S. A., Bilydukevich A. V. Structure of casting solutions and its effect on the characteristics of polyamide membranes. *Polymer science*, Ser. A, 1994, vol. 36, no. 3, pp. 457–460 (in Russian).
12. Bilydukevich A. V., Pratsenko S. A., Plisko T. V. Influence of pore-generators on properties of polyethersulfone membranes. *Khimicheskaya Tekhnologiya [Chemical Technology]*, 2012, vol. 13, no. 3, pp. 174–178 (in Russian).
13. Feng Y., Han G., Chung T.-S., Weber M., Widjojo N., Maletzko C. Effects of polyethylene glycol on membrane formation and properties of hydrophilic sulfonated polyphenylenesulfone (sPPSU) membranes. *Journal of Membrane Science*, 2017, vol. 531, pp. 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.02.040>
14. Lai J.-Y., Lin F.-C., Wang C.-C., Wang D.-M. Effect of nonsolvent additives on the porosity and morphology of asymmetric TPX membranes. *Journal of Membrane Science*, 1996, vol. 118, no. 1, pp. 49–61. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(96\)00084-1](https://doi.org/10.1016/0376-7388(96)00084-1)
15. Chun K.-Y., Jang S.-H., Kim H.-S., Kim Y.-W., Han H.-S., Joe Y. Effects of solvent on the pore formation in asymmetric 6FDA–4,4'ODA polyimide membrane: terms of thermodynamics, precipitation kinetics, and physical factors. *Journal of Membrane Science*, 2000, vol. 169, no. 2, pp. 197–204. [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(99\)00336-1](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(99)00336-1)

Информация об авторах

Бильдюкевич Александр Викторович – академик, д-р хим. наук, профессор, директор. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: uf@ifoch.bas-net.by.

Глевицкая Татьяна Александровна – мл. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: hlyavitskaya1706@gmail.com.

Шустиков Антон Александрович – мл. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.shustikov@tut.by.

Information about the authors

Bilydukevich Aleksandr Viktorovich – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Director. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: uf@ifoch.bas-net.by.

Hlyavitskaya Tatsiana Aleksandrovna – Junior researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hlyavitskaya1706@gmail.com.

Shustikov Anton Aleksandrovich – Junior researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.shustikov@tut.by.

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 616.11-089.843:543.632.542]:616.12-007-089+541.182
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-703-711>

Поступило в редакцию 04.07.2018
Received 04.07.2018

**А. А. Гайдаш¹, член-корреспондент А. И. Кулак², К. В. Дроздовский¹, В. В. Казбанов¹,
В. К. Крутько², О. Н. Мусская², Ю. И. Линник¹, К. В. Скродская³**

¹Республиканский научно-практический центр детской хирургии Министерства здравоохранения
Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

²Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

³Научно-исследовательский институт физико-химических проблем
Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

СТРУКТУРНЫЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПЕРИКАРДИАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛОЙ

Аннотация. Методами сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа, ИК-спектроскопии, дифференциально-термического анализа изучены образцы бычьих перикардов, модифицированные диглицидоловым эфиром этиленгликоля, предназначенные для хирургической коррекции врожденных пороков сердца и крупных кровеносных сосудов. В исходных образцах перикардов до имплантации обнаружены дезорганизация коллагеновой матрицы, хрупкий перелом коллагеновых фибрилл и разрушение структуры интерстициальных мембран, способствующих проникновению иммунцитов в глубокие слои перикарда. В имплантированных образцах перикардов выявлены оссифицирующий кальциноз с отложением аморфизированного гидроксиапатита и формированием костной ткани, а также множественные эрозии и гипертрофические разрастания в эндотелиальной мембране.

Ключевые слова: перикардиальный имплантат, эпоксидная смола, коллагеновые волокна, аморфизированный гидроксиапатит, костная ткань

Для цитирования: Структурные и физико-химические преобразования перикардиальных имплантатов, модифицированных эпоксидной смолой / А. А. Гайдаш [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 703–711. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-703-711>

**Alexander A. Gaidash¹, Corresponding Member Anatoly I. Kulak², Konstantin V. Drozdovski¹,
Vladimir V. Kazbanov¹, Valentina K. Krut'ko², Olga N. Musckaya², Yury I. Linnik¹, Katarina V. Skrotskaya³**

¹Republican Research and Practical Center for Pediatric Surgery, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

³Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

STRUCTURAL AND PHYSICO-CHEMICAL TRANSFORMATIONS OF MODIFIED WITH EPOXY RESIN PERICARDIA IMPLANTS

Abstract. Bovine pericardium samples modified with ethylene glycol diglycidyl ether, designed for surgical correction of congenital heart defects and large blood vessels, were studied by scanning electron microscopy, X-ray diffraction, IR spectroscopy, and differential thermal analysis. It was found that the initial samples of pericardium, before implantation, contain sites of disorganization of the collagen matrix, fragile fracture of collagen fibrils and destruction of the interstitial membranes promoting the penetration of immunocytes into the deep layers of the pericardium. Ossifying calcification with amorphized hydroxyapatite deposition and bone tissue formation as well as multiple erosions and hypertrophic proliferation in the endothelial membrane were detected in the implantation pericardium samples.

Keywords: pericardial implant, epoxy resin, collagen fibers, amorphized hydroxyapatite, bone tissue

For citation: Gaidash A. A., Kulak A. I., Drozdovski K. V., Kazbanov V. V., Krut'ko V. K., Musckaya O. N., Linnik Yu. I., Skrotskaya K. V. Structural and physico-chemical transformations of modified with epoxy resin pericardial implants. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 703–711 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-703-711>

Введение. Перикардиальные имплантаты, модифицированные эпоксидной смолой, достаточно давно используются при хирургической коррекции пороков сердца и крупных кровеносных сосудов [1–4]. Основные мотивы модификации эпоксидной смолой при длительной интер-

позиции сводятся к исключению интраоперационных кровотечений и тромбозов, предотвращению рестенозов и кальцификаций, упрочнению и снижению рисков, обусловленных механическими деформациями (усадка или растяжение) имплантатов с неизбежным обратным забросом крови (регургитации) и образованием псевдоаневризм. В странах СНГ (Беларусь, Россия) разработаны и внедрены в практику кардиохирургии имплантаты на основе телячьих перикардов, модифицированных эпоксидной смолой – диглицидоловым эфиром этиленгликоля [5; 6]. Однако до настоящего времени остаются не ясными механизмы модифицирующего воздействия эпоксидной смолы на структуру фибрилл коллагенового каркаса перикардов. Отсутствуют сведения о химическом составе и структурных формах кальцийфосфатов, осаждающихся в интерстиции перикардиальных имплантатов. Серьезной проблемой, снижающей долговечность имплантатов, является избыточное разрастание эндотелиальной выстилки перикардиальных имплантатов, природа которой остается неизвестной. Нерешенность перечисленных проблем затрудняет адаптацию имплантатов в реабилитационном периоде и приводит к различным осложнениям.

Цель данной работы – изучить структурно-функциональные преобразования перикардиальных имплантатов, модифицированных эпоксидной смолой, под воздействием физико-химических факторов кардиальной среды.

Материалы и методы исследования. Изучены операционные биоптаты перикардиальных имплантатов, модифицированных эпоксидной смолой и внедренных в выходной тракт правого желудочка, эпикардиальный листок сердечной сорочки, межпредсердный дефект. Все биоптаты получены в ходе повторных оперативных вмешательств, связанных с заменой имплантатов. Исследования проведены на основе информированного согласия родственников пациентов и утверждены этическим комитетом РНПЦ детской хирургии. Образцы были распределены в группы: исходные – коммерческие образцы перикардов крупного рогатого скота, модифицированные эпоксидной смолой (биопротез «Биокард»), интраоперационные биоптаты, извлеченные у больных в ходе кардиохирургических вмешательств (имплантационный «Биокард»). В первой группе были изучены 4 образца Биокарда, а во второй – биоптаты перикардиальных имплантатов 8 пациентов. Перед фиксацией образцы обоих типов отмывали в физиологическом растворе 0,9 % NaCl, разделяли на части, предназначенные для морфологических и физико-химических исследований. Для сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) образцы напыляли золотом и изучали на микроскопе LEO 1420, совмещенном с приставкой Rontec (Германия) микроэлементного рентгенофлуорисцентного анализа (EDAX). Фазовый состав образцов, высушенных на воздухе, определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре ADVANCE D8 (Bruker, Германия) при $\text{Cu}_{K\alpha} = 1,5405 \text{ \AA}$. ИК-спектры записывали на спектрометре Tensor-27 (Bruker, Германия) в диапазоне $400\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$ (2 мг порошка на 800 мг KBr) либо с пленочных образцов на ИК фурье-микроскопе Nupreion, Gir-objective (15×) на отражение. Дифференциально-термический анализ (ДТА) образцов проводили на совмещенном термическом анализаторе NETZSCH STA 409 PC LUXX (Германия) при скорости нагрева $10,0 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ на воздухе. В качестве эталона сравнения использовали порошок синтетического аморфизированного гидроксипатита (ГА) $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, высушенного при $60 \text{ }^\circ\text{C}$, максимально приближенного по структуре и свойствам к минеральной составляющей костной ткани [7–9].

Результаты и их обсуждение. *Микроструктура и физико-химические свойства исходных образцов перикардов, модифицированных эпоксидной смолой (Биокард).* По данным СЭМ в коллагеновом каркасе Биокарда обнаружены деформационные структуры: «склеенные» коллагеновые волокна с морфологическими признаками хрупкого разрушения, пленка, состоящая из пластических масс на поверхности коллагеновых фибрилл, деформация фибриллярной матрицы перикардов. «Склеенные» коллагеновые волокна представляют собой слипшиеся истонченные фибриллы. При этом образуется большое количество плотных, бесструктурных фибриллярных конгломератов диаметром до 30–40 мкм. «Склеенные» микроволокна сжаты и отстоят от основной массы коллагеновых фибрилл (рис. 1, *a, b*). Основная часть волокон с подобными изменениями располагается в наружной волокнистой пластинке фибриллярной части перикардов. Вследствие сжатия и деформации коллагеновых микрофибрилл в среднем слое перикардов выявлены патологически расширенные интерстициальные щели (широкопористая трансформация).

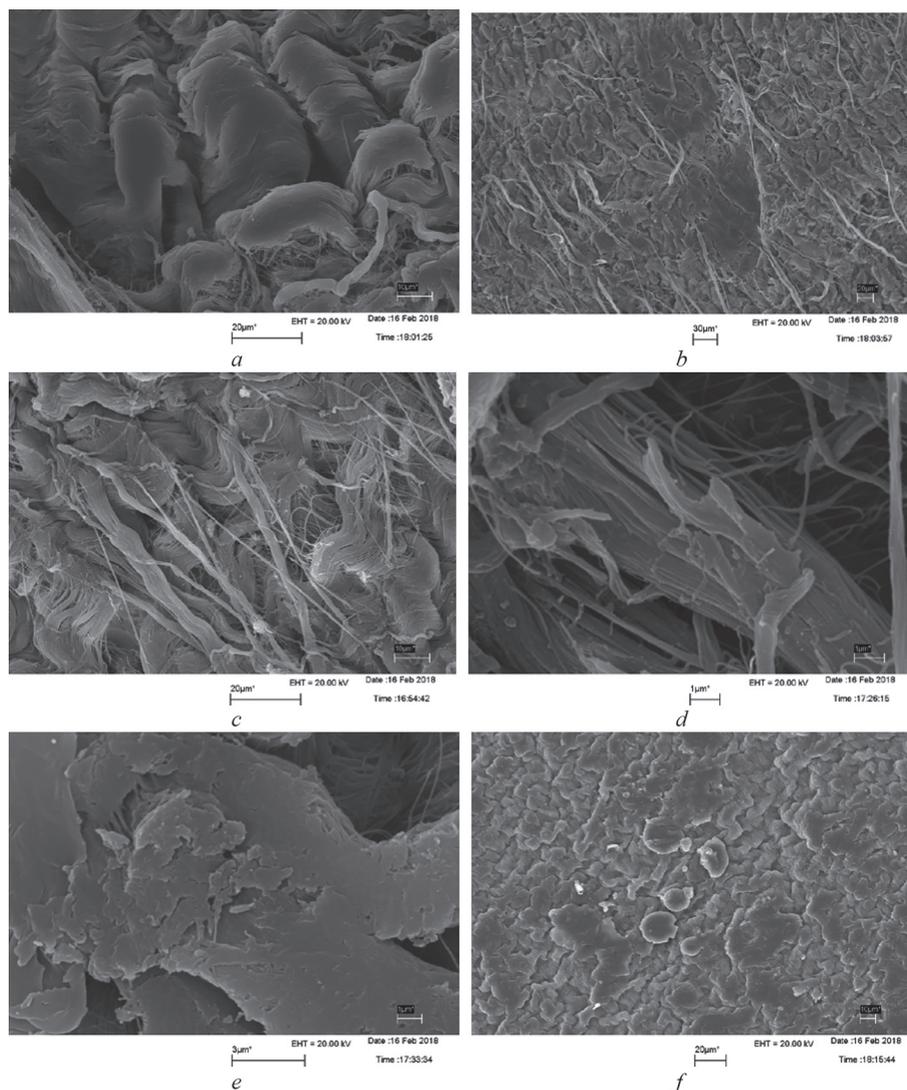


Рис. 1. СЭМ изображения исходных Биокардов: гомогенизация коллагеновых волокон (а), «склеенные» коллагеновые волокна (b), разволокнение коллагеновых фибрилл (с), хрупкий перелом коллагенового волокна (d), отложение пластических масс на поверхности коллагеновых волокон (e) и эндотелиоцитов (f)

Fig. 1. SEM images of the original Biocard: homogenization of collagen fibers (a), «glued» collagen fibers (b), collagen fibril splitting (c), brittle fracture of collagen fiber (d), deposition of plastic masses on the surface of collagen-new fibers (e) and endothelial cells (f)

Важной структурной особенностью являются разрывы интерстициальных мембран. В нативном бычьем перикарде, взятом у здоровых животных, интерстициальные мембраны располагаются преимущественно перпендикулярно по отношению к длинным осям коллагеновых нитей, упорядоченно повторяя их ход. По данным СЭМ мембраны представляют собой плотно упакованные тонкие перфорированные пластинки. Диаметр мембранных отверстий варьируется в пределах 1–2 мкм. Очевидно, что подобная организация интерстициальных каналов упорядочивает циркуляцию тканевой жидкости и организует направления передвижения клеток. В исходном Биокарде интерстициальные мембраны представлены пластинками с дезинтегрированными коллагеновыми нитями. При этом отмечается резкое расширение мембранных отверстий, диаметр которых может достигать 5–7 мкм. Такие трансформации пористых структур интерстициальных мембран могут вызывать дезорганизацию миграции клеток по межклеточным каналам, делают хаотичным и более свободным проникновение иммунцитов в глубинные участки перикардов, чего не должно происходить в условиях физиологической нормы.

Избыточная миграция иммунных клеток в интерстиции перикардов создает структурные предпосылки для локальных иммунных конфликтов. Важным обстоятельством является разволокнение фибрилл коллагенового каркаса. Прежде всего, разволокнению подвергаются относительно толстые (диаметром 5–7 мкм) коллагеновые волокна, собранные в «шнуры», представляющие собой компактизированные коллагеновые нити толщиной до 1 мкм. «Шнуры», подвергшиеся хаотичной дезорганизации, распадаются на коллагеновые нити и их обрывки (рис. 1, *c*).

Значительная часть слипшихся коллагеновых волокон разламывается на остроконечные фрагменты, что сопровождается скручиванием и множественными микроразрывами отдельных нитей (рис. 1, *d*). Такого рода деформация свидетельствует о разрушении коллагеновых волокон преимущественно по механизму хрупкого распада, обусловленного налипанием слоев эпоксидной смолы (рис. 1, *e*).

На поверхности эндотелиальной поверхности перикардов обнаружены отложения в виде пленок, покрывающих достаточно протяженные участки (рис. 1, *f*). Кроме того, на поверхности эндотелиоцитов выявлены сетчатые наложения, предположительно состоящие из уплотненного и модифицированного эпоксидной смолой гликокаликса.

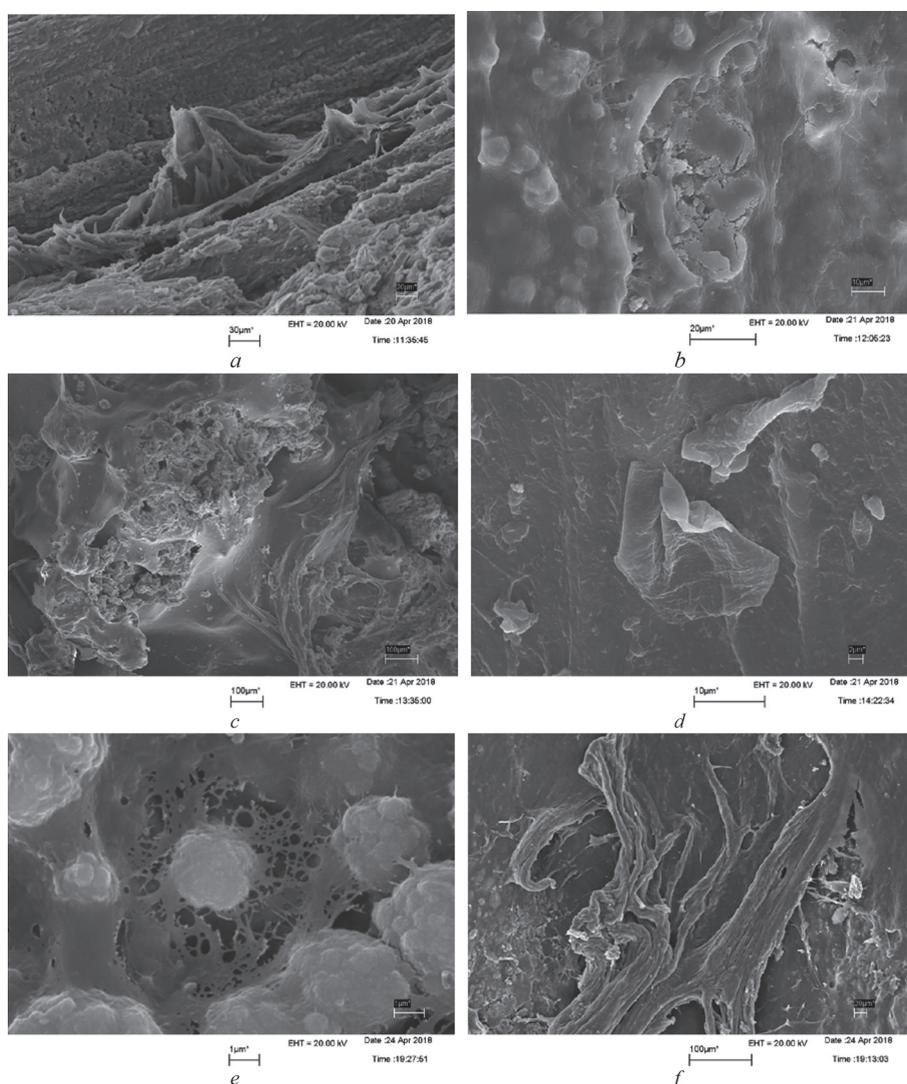


Рис. 2. СЭМ изображения имплантированных Биокардов: рост остроконечных кристаллитов на поверхности волокон коллагенового каркаса (*a*), перфорирующая эрозия (*b*), регенерация эрозии (*c*), эпителиальный вырост (*d*), хрупкое разрушение цитоплазмы эпителиоцита (*e*), остеоидные структуры в виде костных балок (*f*)

Fig. 2. SEM images of implanted Biocards: growth of pointed crystallites on the surface of collagen skeleton fibers (*a*), perforating erosion (*b*), erosion regeneration (*c*), epithelial growth (*d*), brittle fracture of epitheliocyte cytoplasm (*e*), osteoid structures in the form of bone beams (*f*)

Структурные преобразования имплантированного Биокарда. В толще перикардов выявляются кристаллоподобные частицы остроконечной формы, растущие в просвет интерстициальных щелей или в свободные пространства, располагаясь на поверхности волокон коллагенового каркаса (рис. 2, *a*). По данным EDAX соотношение Ca/P в этих частицах колеблется в пределах от 3 : 1 до 5 : 1. Вне подобных частиц обнаружены плотные кальцийфосфатные петрификаты с выраженным эндофитным ростом, направленным в сторону эндотелиальной мембраны.

Рост петрификатов осложняется эрозированием эндотелиальных мембран. Дно большей части эрозий выполнено детритом, состоящим из раздробленных кальцийфосфатных частиц (рис. 2, *b*). Более агрессивные эрозии имеют перфорированное дно, с глубоко расположенными фрагментами детрита. Эрозии регенерируют путем обрастания эндотелием вплоть до полного восстановления эндотелиальной мембраны (рис. 2, *c*).

В целом эпителий эндотелиальной мембраны находится в состоянии пролиферативного возбуждения. На это указывает увеличение численной плотности ядер эпителиоцитов, находящихся в состоянии митоза, сопровождающееся формированием множественных эпителиальных выростов. В основном эпителиальные выросты представлены пластинчатыми структурами размерами от нескольких десятков микрометров (рис. 2, *d*) до десятков миллиметров. В эпителиальных выростах концентрируются ионы Ca^{2+} , относительное содержание которых существенно выше, чем в окружающем эндотелии. На поверхности эпителия адгезируются частицы, похожие на эпоксидные массы, преимущественно над ядерной областью. При этом цитоплазма эпителиоцитов подвергается разрушению по хрупкому механизму (рис. 2, *e*), что может быть обусловлено кальцификацией и пропитыванием клеток эпоксидной смолой. Фундаментальным фактом является формирование на поверхности эндотелиальных мембран остеоидных структур в виде вытянутых костных балок с типичными гаверсоподобными отверстиями в центре (рис. 2, *f*). На поверхности данных структур присутствуют игольчатые разрастания, характерные для роста микрокристаллитов ГА.

На рентгенодифрактограммах образцов исходного Биокарда видны три выраженные рентгеноаморфные гало в области углов 2θ при $15\text{--}25^\circ$, $25\text{--}34^\circ$ и $38\text{--}46^\circ$ (рис. 3, *a*). На рентгенодифрактограмме образца имплантированного Биокарда появляется рентгеноаморфное гало, связанное с ГА, при 2θ $31,79^\circ$ (рис. 3, *a*, 2). Для подтверждения наличия кристаллов ГА в этих образцах их подвергали термообработке при 500°C в течение 5 ч, в результате которой рентгеноаморфная фаза переходила в кристаллическую фазу стехиометрического ГА (рис. 3, *a*, 3), рефлексы которого на рентгенодифрактограмме совпадают с рефлексами эталонного [01-084-1998] синтетического ГА (рис. 3, *a*, 4). Это свидетельствует о формировании в тканях имплантированного Биокарда кальцийфосфатных включений в виде стехиометрического аморфизированного ГА.

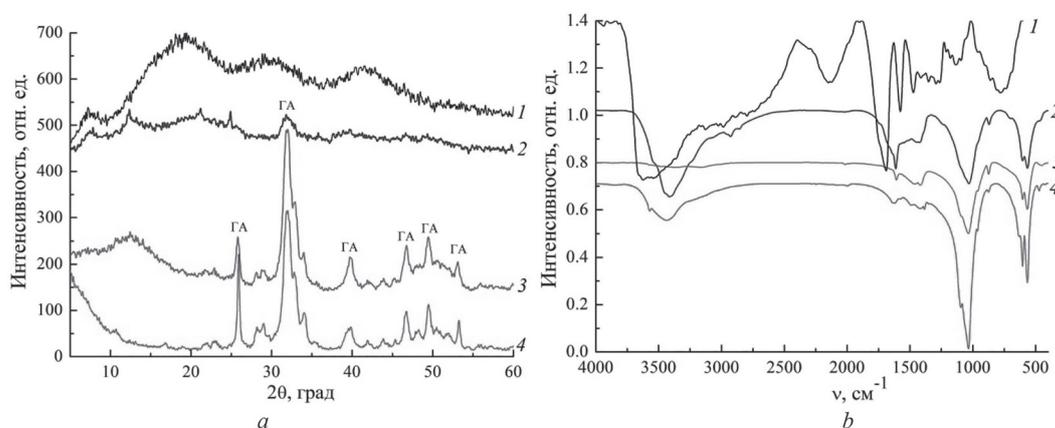


Рис. 3. Рентгенодифрактограммы (*a*) и ИК-спектры (*b*) образцов Биокарда: 1 – исходный; 2 – имплантированный; 3 – имплантированный после термообработки при 500°C ; 4 – синтетический ГА

Fig. 3. X-ray diffraction patterns (*a*) and infrared spectra (*b*) of Biocard specimens: 1 – initial; 2 – implanted; 3 – implanted by heat-treated at 500°C ; 4 – synthetic HA

На ИК-спектре исходного образца Биокарда (рис. 3, *b*, 1) присутствуют: широкая полоса поглощения при $3680\text{--}3270\text{ см}^{-1}$ валентных колебаний воды и межмолекулярной водородной связи, полоса при 2150 см^{-1} валентных колебаний связи CN белка, полоса при 1680 см^{-1} валентных колебаний связи C=O (амид I) [10; 11], характерная для белков (коллаген, эластин) и эпоксидной смолы. Кроме того, присутствует полоса при 1570 см^{-1} валентных колебаний связи CN и деформационных колебаний связи NH (амид II). Липиды представлены следующими полосами поглощения: 1740 см^{-1} колебания сложноэфирной связи в триглицеридах, 1474 см^{-1} деформационные колебания CH_2 -групп в цепочках, 1130 см^{-1} валентные колебания C–O-связи сложноэфирной группы, 776 см^{-1} колебания CH_2 -групп в цепочке длиннее трех углеродных атомов.

ИК-спектры имплантированного Биокарда существенно иные, в частности, значительно уменьшается интенсивность полос органической составляющей, некоторые моды в области $2300\text{--}1630\text{ см}^{-1}$ полностью исчезают (рис. 3, *b*, 2). Это обусловлено уменьшением объема органи-

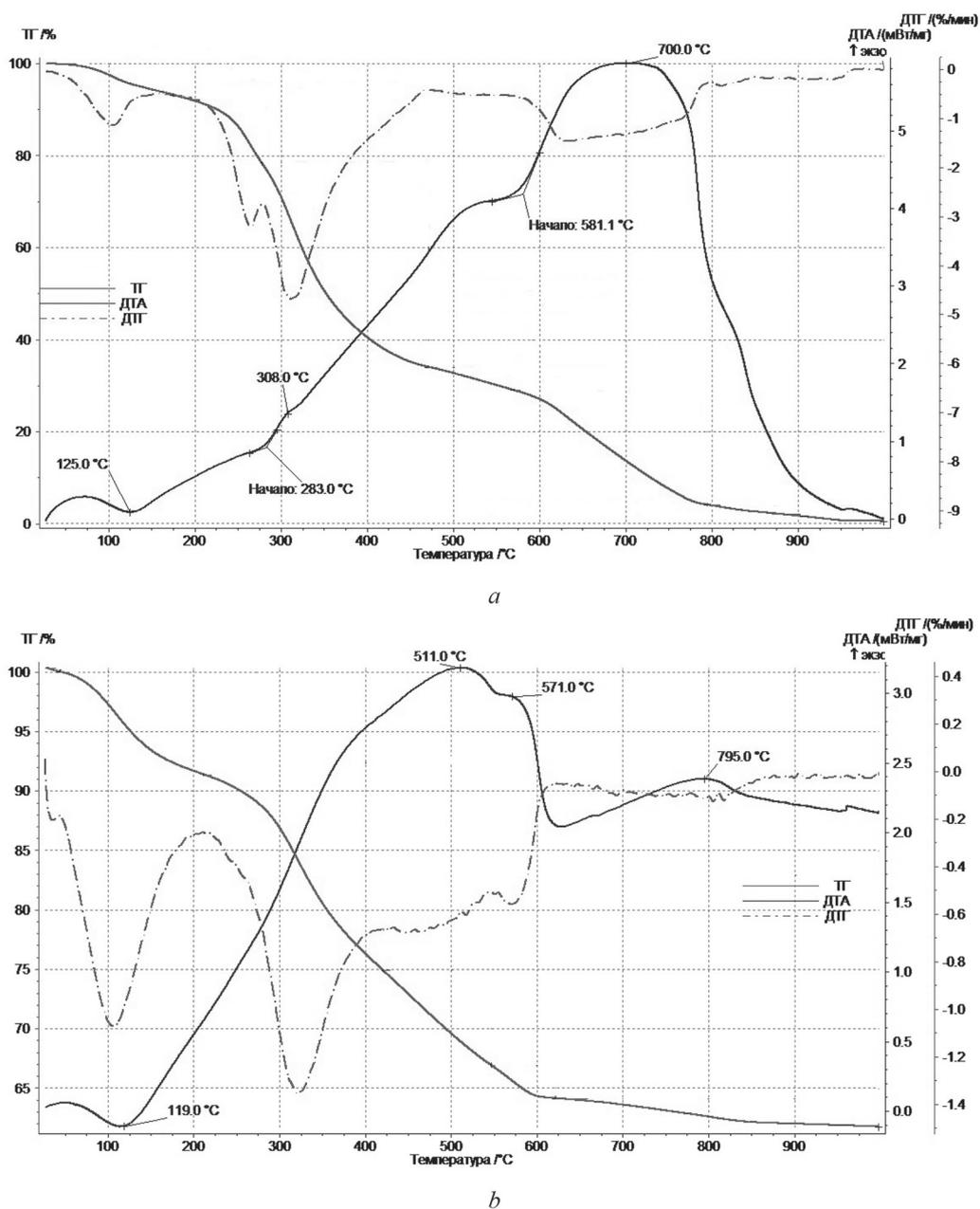


Рис. 4. Дериватограммы образцов Биокарда исходного (*a*) и имплантированного (*b*)

Fig. 4. Derivatograms of Biocard specimens: original (*a*) and implanted (*b*)

ческой фазы, возможно, в связи с активацией тканевых протеаз. На ИК-спектре имплантированного Биокарда присутствует широкая полоса поглощения при $3500\text{--}3280\text{ см}^{-1}$ валентных колебаний воды и полоса при 1613 см^{-1} деформационных колебаний воды, что обусловлено тканевым отеком в патоморфологическом понимании. Принципиально важной структурной особенностью ИК-спектра имплантированного Биокарда являются характеристичные полосы ГА при волновых числах $1025, 865, 604$ и 560 см^{-1} (валентных и деформационных колебаний тетраэдров PO_4) и при 3540 см^{-1} (структурные ОН-группы) координированные катионом и не связанные водородными связями. После термообработки такого образца при 500 °C на ИК-спектре исчезает широкая полоса валентных колебаний воды, а интенсивность полос поглощения в области деформационных колебаний тетраэдров PO_4 практически не изменяется (рис. 3, *b*, 3). Это согласуется с ИК-спектрами стандартного синтетического ГА (рис. 3, *b*, 4), особенно в области деформационных колебаний тетраэдров PO_4 и с вышеприведенными данными РФА. Принципиально важно то, что в кристаллической решетке обнаруженного ГА отсутствуют карбонатные группы, что отражает его меньшую химическую активность, по сравнению с карбонат-ГА (даллитом), являющимся естественным минеральным компонентом зрелой костной ткани [12].

По данным ДТА исходных образцов Биокарда в температурном интервале при $25\text{--}200\text{ °C}$ высвобождается адсорбированная вода и происходит денатурация коллагена [13; 14]. На присутствие эпоксидной смолы в образце указывает наличие соответствующего ДТГ пика при 260 °C . На второй стадии при $200\text{--}480\text{ °C}$ происходит термический распад молекул коллагена, а в интервале при $480\text{--}800\text{ °C}$ сжигаются остаточные компоненты органической фазы. После термообработки исходного Биокарда до 1000 °C образец полностью выгорает (рис. 4, *a*), что свидетельствует о наличии только органической фазы. В образцах имплантированного Биокарда в аналогичных условиях термообработки полной деструкции не происходит и масса сухого остатка составляет 32% (рис. 4, *b*), что указывает на присутствие неорганической фазы ГА и согласуется с результатами РФА и ИК-спектроскопии. Однако в этих образцах наблюдается незначительный температурный сдвиг распада коллагеновых фибрилл ($200\text{--}420\text{ °C}$), что свидетельствует о дезорганизации связей в интерфейсе коллаген–ГА и может быть обусловлено структурной незрелостью новообразованных коллагеновых фибрилл. Кроме того, обращает на себя внимание регрессия пика на ДТГ кривой в температурном диапазоне при $230\text{--}280\text{ °C}$ (рис. 4), что свидетельствует о разрушении эпоксидной фазы. Возможно, что в тканях имплантированного Биокарда эпоксидная фаза утилизируется за счет фагоцитоза макрофагами. Отметим, что накопление макрофагов в тканях имплантированного Биокарда, обнаруженное гистологически, подтверждает это предположение.

Заключение. Перикарды, модифицированные эпоксидной смолой и имплантированные в полость сердца, подвергаются структурным и физико-химическим преобразованиям, сопровождающимся, прежде всего, формированием оссифицирующихся кальцийфосфатов со структурой аморфизированного стехиометрического гидроксиапатита. Микрокристаллы гидроксиапатита преимущественно располагаются в срединных слоях перикардов и в ходе дальнейшей эволюции прорастают в эндотелиальную мембрану. Образующиеся при этом эрозии регенерируют по механизму «кроющего пласта». В целом эндотелию свойственно диспластическое поведение с формированием множественных эпителиальных выростов. Микрокристаллы гидроксиапатита интенсивно образуются в интерстиции, а мезотелиальные выросты являются полиморфными и имеют четко структурированную базальную мембрану. Пролиферативное возбуждение эндотелиоцитов ограничивается территориальными пределами эпителиальных дифферонов, где также выявляются клетки в состоянии деструкции. Особенностью разрушения эндотелиальных клеток является широкопористая трансформация цитоплазмы с образованием плотных, ригидных микроканалов, пропитанных эпоксидной смолой, упорядочено направленных к периферическим отделам клеток. Упорядоченная организация каналов создает структурные предпосылки для быстрого вывода вещества разрушающейся цитоплазмы, что происходит по механизму выброса, возможно, в связи со скачкообразным раскрытием мембранных пор. Природа пролиферативного возбуждения эндотелия не известна. Но локальное накопление клеток, разрушающихся

вследствие прямого действия эпоксидной смолы и прогрессирующего концентрирования ионов Ca^{2+} , может спровоцировать диспластический отклик эндотелия. В такой ситуации эндотелиальные разрастания есть проявление адаптивной реакции, направленной на удаление избытков тканевых ионов кальция.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 1.04 ГПНИ «Химические технологии и материалы».

Acknowledgements. The work was supported by the SPSI “Chemical technologies and materials” (The task 1.04).

Список использованных источников

1. Bovine jugular vein as right ventricle-to-pulmonary artery valved conduit / A. F. Corno [et al.] // *J. Heart Valve Dis.* – 2002. – Vol. 11, N 2. – P. 242–247.
2. Bovine valved venous xenografts for RVOT reconstruction: results after 71 implantations / T. Breyman [et al.] // *Eur. J. Cardiothorac Surg.* – 2002. – Vol. 21, N 4. – P. 703–710. [https://doi.org/10.1016/s1010-7940\(02\)00049-0](https://doi.org/10.1016/s1010-7940(02)00049-0)
3. Чеснов, Ю. М. Структура и биосовместимость фиксированного эпоксидными соединениями перикарда в эксперименте / Ю. М. Чеснов // *Здравоохранение.* – 2005. – № 5. – С. 5–9.
4. Отдаленные результаты протезирования трикуспидального клапана биологическими протезами: ретроспективное исследование / Д. А. Астапов [и др.] // *Тихоокеанский мед. журн.* – 2013. – № 3. – С. 41–44.
5. Разработка и клинический опыт использования биологических заплат «Биокард» в сердечно-сосудистой хирургии / Ю. М. Чеснов [и др.] // *Мед. панорама.* – 2005. – № 3. – С. 20–22.
6. Применение биологических заплат «Биокард» в сердечно-сосудистой хирургии / Ю. М. Чеснов [и др.] // *Мед. новости.* – 2006. – № 3. – С. 137–140.
7. Synthesis, identification and determination of impurities in bioactive hydroxyapatite / V. K. Tsuber [et al.] // *Pharmaceutical Chemistry J.* – 2006. – Vol. 40, N 8. – P. 455–458. <https://doi.org/10.1007/s11094-006-0151-2>
8. Krut'ko, V. K. Thermal Transformations of Composites Based on Hydroxyapatite and Zirconia / V. K. Krut'ko, A. I. Kulak, O. N. Musskaya // *Inorganic Materials.* – 2017. – Vol. 53, N 4. – P. 429–436. <https://doi.org/10.1134/s0020168517040094>
9. Preparation of Bioactive Mesoporous Calcium Phosphate Granules / O. N. Musskaya [et al.] // *Inorganic Materials.* – 2018. – Vol. 54, N 2. – P. 117–124. <https://doi.org/10.1134/s0020168518020115>
10. Лиманская, А. Ю. Исследование сосудов сердечно-сосудистой системы человека с помощью ИК-фурье-спектрометра и анализ инфракрасных спектров / А. Ю. Лиманская, И. А. Аверин // *Молодой ученый.* – 2015. – Т. 1, № 81. – С. 44–47.
11. Determination of Lipids and Their Oxidation Products by IR Spectrometry / A. A. Dzhatdueva [et al.] // *J. Analytical Chem.* – 2016. – Vol. 71, N 6. – P. 542–548. <https://doi.org/10.1134/s1061934816060058>
12. Osteoblast and osteoclast responses to A/B type carbonate-substituted hydroxyapatite ceramics for bone regeneration / M. M. Germaini [et al.] // *Biomedical Materials.* – 2017. – Vol. 12, N 3. – P. 035008. <https://doi.org/10.1088/1748-605x/aa69c3>
13. A multi-sample denaturation temperature tester for collagenous biomaterials / J. M. Lee [et al.] // *Med. Eng. Phys.* – 1995. – Vol. 17, N 2. – P. 115–121. [https://doi.org/10.1016/1350-4533\(95\)91882-h](https://doi.org/10.1016/1350-4533(95)91882-h)
14. de Batista, T. M. Thermal behavior of in vitro mineralized anionic collagen matrices / T. M. de Batista, V. C. A. Martins, A. M. de Guzzi Plepis // *J. Thermal Analysis and Calorimetry.* – 2009. – Vol. 95, N 3. – P. 945–949. <https://doi.org/10.1007/s10973-007-8897-7>

References

1. Corno A. F., Hurni M., Griffin H., Galal O. M., Payot M., Sekarski N., Tozzi P., von Segesser L. K. Bovine jugular vein as right ventricle-to-pulmonary artery valved conduit. *Journal of Heart Valve Disease*, 2002, vol. 11, no. 2. pp. 242–247.
2. Breyman T., Thies W. R., Boethig D., Goerg R., Blanz U., Koerfer R. Bovine valved venous xenografts for RVOT reconstruction: results after 71 implantations. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 2002, vol. 21, no. 4, pp. 703–710. [https://doi.org/10.1016/s1010-7940\(02\)00049-0](https://doi.org/10.1016/s1010-7940(02)00049-0)
3. Chesnov Yu. M. Structure and biocompatibility of the pericardium fixed by epoxy compounds in the experiment. *Zdravoohranenie [Health care]*, 2005, no. 5, pp. 5–9 (in Russian).
4. Astapov D. A., Karaskov A. M., Kim M. V., Semenova E. I., Demidov D. P. Long-term results of tricuspid valve replacement with biological prostheses: a retrospective study. *Tihookeanskiy meditsinskiy zhurnal [Pacific Medical Journal]*, 2013, no. 3, pp. 41–44 (in Russian).
5. Chesnov Yu. M., Ostrovsky Yu. P., Skornyakov V. I., Dergachev A. V., Shved M. M. Development and clinical experience of the use of biological patches «Biocard» in cardiovascular surgery. *Meditsinskaya panorama [Medical panorama]*, 2005, no. 3, pp. 20–22 (in Russian).
6. Chesnov Yu. M., Ostrovsky Yu. P., Skornyakov V. I., Dergachev A. V., Shved M. M. Application of biological patches «Biocard» in cardiovascular surgery. *Meditsinskie novosti [Medical news]*, 2006, no. 3, pp. 137–140 (in Russian).
7. Tsuber V. K., Lesnikovich L. A., Kulak A. I., Trofimova I. V., Petrov P. T., Trukhacheva T. V., Kovalenko Yu. D., Krasil'nikova V. L. Synthesis, identification and determination of impurities in bioactive hydroxyapatite. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 2006, vol. 40, no. 8, pp. 455–458. <https://doi.org/10.1007/s11094-006-0151-2>
8. Krut'ko V. K., Kulak A. I., Musskaya O. N. Thermal Transformations of Composites Based on Hydroxyapatite and Zirconia. *Inorganic Materials*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 429–436. <https://doi.org/10.1134/s0020168517040094>

9. Musskaya O. N., Kulak A. I., Krut'ko V. K., Lesnikovich Yu. A., Kazbanov V. V., Zhitkova N. S. Preparation of Bioactive Mesoporous Calcium Phosphate Granules. *Inorganic Materials*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 117–124. <https://doi.org/10.1134/s0020168518020115>

10. Limanskaya A. Yu., Averin I. A. Study of blood vessels of the human cardiovascular system using an IR-Fourier spectrometer and analysis of infrared spectra. *Molodoy ucheniy [Young Scientist]*, 2015, vol. 1, no. 81, pp. 44–47 (in Russian).

11. Dzhatdoeva A. A., Polimova A. M., Proskurnina E. V., Proskurnin M. A., Vladimirov Yu. A. Determination of Lipids and Their Oxidation Products by IR Spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry*, 2016, vol. 71, no. 6, pp. 542–548. <https://doi.org/10.1134/s1061934816060058>

12. Germaini M. M., Detsch R., Grünwald A., Magnaudeix A., Lalloue F., Boccaccini A. R., Champion E. Osteoblast and osteoclast responses to A/B type carbonate-substituted hydroxyapatite ceramics for bone regeneration. *Biomedical Materials*, 2017, vol. 12, no. 3, pp. 035008. <https://doi.org/10.1088/1748-605x/aa69c3>

13. Lee J. M., Pereira C. A., Abdulla D., Naimark W. A., Crawford I. A multi-sample denaturation temperature tester for collagenous biomaterials. *Medical Engineering & Physics*, 1995, vol. 17, no. 2, pp. 115–121. [https://doi.org/10.1016/1350-4533\(95\)91882-h](https://doi.org/10.1016/1350-4533(95)91882-h)

14. de Batista T. M., Martins V. C. A., de Guzzi Plepis A. M. Thermal behavior of in vitro mineralized anionic collagen matrices. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2009, vol. 95, no. 3, pp. 945–949. <https://doi.org/10.1007/s10973-007-8897-7>

Информация об авторах

Гайдаш Александр Александрович – д-р мед. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Республиканский научно-практический центр детской хирургии (пр. Независимости, 64, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: jack200@ngs.ru.

Кулак Анатолий Иосифович – член-корреспондент, д-р хим. наук, профессор, директор. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kulak@igic.bas-net.by.

Дроздовский Константин Викентьевич – канд. мед. наук, директор. Республиканский научно-практический центр детской хирургии (пр. Независимости, 64, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kdrozдовski@gmail.com.

Казбанов Владимир Владимирович – уч. секретарь. Республиканский научно-практический центр детской хирургии (пр. Независимости, 64, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vladimir_by@mail.ru.

Крутько Валентина Константиновна – канд. хим. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tsuber@igic.bas-net.by.

Мусская Ольга Николаевна – канд. хим. наук, доцент, ст. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: musskaja@igic.bas-net.by.

Линник Юрий Иванович – врач-кардиохирург. Республиканский научно-практический центр детской хирургии (пр. Независимости, 64, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dr.linnikiy@gmail.com.

Скромная Катарина Владимировна – инженер. НИИ физико-химических проблем БГУ (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Katarinaskr@gmail.com.

Information about the authors

Gaidash Alexander Alexandrovich – D. Sc. (Medicine), Professor, Chief research. Republican Research and Practical Center for Pediatric Surgery (64, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: jack200@ngs.ru.

Kulak Anatoly Iosifovich – Corresponding Member, D. Sc. (Chemistry), Professor, Director. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kulak@igic.bas-net.by.

Drozдовski Konstantin Vikentievich – Ph. D. (Medicine), Director. Republican Research and Practical Center for Pediatric Surgery (64, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kdrozдовski@gmail.com.

Kazbanov Vladimir Vladimirovich – Scientific secretary. Republican Research and Practical Center for Pediatric Surgery (64, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vladimir_by@mail.ru.

Krut'ko Valentina Konstantinovna – Ph. D. (Chemistry), Assistant professor, Leading researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tsuber@igic.bas-net.by.

Musskaya Olga Nikolaevna – Ph. D. (Chemistry), Assistant professor, Senior researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: musskaja@igic.bas-net.by.

Linnik Yury Ivanovich – cardiac surgeon. Republican Research and Practical Center for Pediatric Surgery (64, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dr.linnikiy@gmail.com.

Skrotskaya Katarina Vladimirovna – engineer. Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Katarinaskr@gmail.com.

БИОЛОГИЯ**BIOLOGY**

УДК 575.73:633.11

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-712-718>

Поступило в редакцию 22.10.2018

Received 22.10.2018

О. А. Орловская, С. И. Вакула, академик Л. В. Хотылева, академик А. В. Кильчевский*Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***КАЧЕСТВО ЗЕРНА У ЛИНИЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ *T. AESTIVUM*
С ИНТРОГРЕССИЕЙ ГЕНЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА
T. DICOCCOIDES И *T. DICOCCUM***

Аннотация. Дикорастущие и культурные сородичи *T. aestivum*, которые являются источниками многих хозяйственно ценных генов, часто привлекаются для расширения генофонда пшеницы. Оценено влияние генетического материала тетраплоидных видов рода *Triticum* (*T. dicoccum* и *T. dicoccoides*) на качество зерна интрогрессивных линий яровой мягкой пшеницы. У линий с генетическим материалом *T. dicoccum* и *T. dicoccoides* в сравнении с родительскими формами проведена идентификация состава высокомолекулярных субъединиц глютеина, связанных с хлебопекарными свойствами зерна, с одновременной оценкой качества зерна по показателям: стекловидность, содержание белка, массовая доля и качество клейковины. Выделены линии с аллелями локусов *Glu-1* от тетраплоидных сородичей пшеницы *T. dicoccoides* и *T. dicoccum*. Установлено, что интрогрессия чужеродного генетического материала в геном мягкой пшеницы оказала положительный эффект на такие признаки качества зерна, как стекловидность, содержание белка и клейковины. Линии с аллелями локусов *Glu-A1* от *T. dicoccoides* и *Glu-B1* от *T. dicoccum* были на уровне исходного сорта пшеницы или превосходили его по качеству клейковины. В результате проведенных исследований выделены новые линии яровой мягкой пшеницы с высоким качеством зерна, которые могут использоваться для селекции данной культуры.

Ключевые слова: мягкая пшеница, *T. dicoccum*, *T. dicoccoides*, высокомолекулярные субъединицы глютеина, SDS-электрофорез, качество зерна

Для цитирования: Качество зерна у линий мягкой пшеницы *T. aestivum* с интрогрессией генетического материала *T. dicoccoides* и *T. dicoccum* / О. А. Орловская [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 712–718. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-712-718>

Olga A. Orlovskaya, Svetlana I. Vakula, Academician Lubov V. Khotyleva, Academician Alexander V. Kilchevsky*Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***GRAIN QUALITY IN BREAD WHEAT LINES *T. AESTIVUM* WITH INTROGRESSION
OF GENETIC MATERIAL *T. DICOCCOIDES* AND *T. DICOCCUM***

Abstract. Related wild and cultural wheat species are regularly involved for expanding *T. aestivum* genetic diversity because they contain many valuable genes. We evaluated the effect of the genetic material of tetraploid species of the genus *Triticum* (*T. dicoccoides*, *T. dicoccum*) on the grain quality of introgression lines of spring bread wheat. The composition of the high molecular weight glutenin subunits which play an essential role in the formation of wheat baking properties was identified in the introgression lines of bread wheat and their parental forms. The traits of grain quality (hardness, protein and gluten content, gluten quality) were also evaluated. The lines with *Glu-1* loci alleles from wheat relatives *T. dicoccoides* and *T. dicoccum* were selected. It was found that the introgression of alien genetic material into the common wheat genome had a positive effect on the parameters of grain quality such as hardness, protein and gluten content. The lines with *Glu-A1* loci alleles from *T. dicoccoides* and *Glu-B1* from *T. dicoccum* were at the level of a parent wheat variety or of a higher gluten quality. As a result of the research, the new lines of bread soft wheat with high grain quality were found and can be used in the crop breeding.

Keywords: common wheat, *T. dicoccum*, *T. dicoccoides*, high molecular weight glutenin subunits, SDS-PAGE, quality of grain

For citation: Orlovskaya O. A., Vakula S. I., Khotyleva L. V., Kilchevsky A. V. Grain quality in bread wheat lines *T. aestivum* with introgression of genetic material *T. dicoccoides* and *T. dicoccum*. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 712–718 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-712-718>

Введение. Пшеница является одной из наиболее важных сельскохозяйственных культур и играет ключевую роль в обеспечении продовольствием населения во всем мире. В последнее время все чаще для расширения генофонда пшеницы привлекаются дикорастущие и культурные

сородичи *T. aestivum*, которые являются источниками многих хозяйственно ценных генов. В частности, интерес представляет возможность улучшения пшеницы по биологической ценности и хлебопекарным свойствам зерна, так как значительная часть зерна данной культуры идет на производство хлебобулочных изделий. Так, изучение технологических свойств зерна у линий мягкой пшеницы с интрогрессией от *Aegilops speltoides* Tausch. показало, что замещение 7D/7S существенно улучшает реологические показатели теста [1]. В работах российских ученых установлено, что в отличие от ржаной *IRS*-транслокации, *Lr*-транслокации от пырея, эгилопса, дикой и культурной полбы, как правило, не оказывают нежелательного эффекта на качество клейковины [2].

Известно, что запасные белки глютенины, состоящие из высоко- и низкомолекулярных субъединиц, существенно влияют на качество хлеба. Генетическое разнообразие вариантов запасных белков зерна у сородичей мягкой пшеницы несравненно богаче, чем у существующих сортов *T. aestivum* L. [3]. Большинство высокомолекулярных глютеинов, которые удалось обнаружить у отдаленных сородичей по размеру меньше, чем у самой пшеницы, и теоретически они могут оказывать не только положительное, но и отрицательное влияние на хлебопекарные качества [4; 5]. Однако изучению хлебопекарных свойств сородичей пшеницы посвящено пока немного работ.

Цель данного исследования состояла в оценке влияния генетического материала *T. dicocum* и *T. dicoccoides* на качество зерна интрогрессивных линий яровой мягкой пшеницы.

Материалы и методы исследования. В работе использовали 9 интрогрессивных линий (F_9 , $2n = 42$), полученных нами от скрещивания сортов яровой мягкой пшеницы (Рассвет, Саратовская 29, Фестивальная) с тетраплоидными видами рода *Triticum* (*T. dicoccoides*, *T. dicocum*). Проведена идентификация состава высокомолекулярных субъединиц глютеина (ВМСГ) интрогрессивных линий в сравнении с родительскими формами. Выделение глютеинов пшеницы осуществляли по методике N. K. Singh и соавт. [6]. Разделение глютеинов проводили в SDS-PAGE [7] в вертикальной электрофоретической камере Maxigel (Biometra-Biomedizinische) и идентифицировали по номенклатурной системе Рауне [8].

Для оценки качества зерна использовали следующие показатели: стекловидность (ГОСТ 10987–76), содержание белка (ГОСТ 10846–91), массовая доля и качество клейковины (ГОСТ 13586.1–68). Данные анализы проводили в Центральной республиканской лаборатории по определению качества новых сортов растений ГУ «Государственная инспекция по испытанию и охране сортов растений» (г. Минск, Беларусь).

Результаты и их обсуждение. Качество зерна – это комплексный признак, который зависит от показателей, определяющих мукомольные, хлебопекарные и технологические характеристики зерна. Для оценки мукомольных свойств зерна пшеницы большое значение имеет такой показатель, как стекловидность. Стекловидный эндосперм обладает большей механической прочностью и крупобразующей способностью, чем мучнистый и позволяет получать муку высокого качества. Родительские формы по стекловидности можно отнести к сильным пшеницам (стекловидность которых должна быть не менее 60 %). Можно отметить, что стекловидность сородичей пшеницы была на уровне 74–86 %, что несколько ниже, чем у сортов *T. aestivum* (95–97 %). У интрогрессивных линий данный показатель был на высоком уровне (76–98 %), хотя, как правило, не превышал исходный сорт пшеницы (табл. 1).

Хлебопекарные свойства мягкой пшеницы в значительной степени определяются ее белковой структурой и коррелирующим с этим показателем количеством клейковины. Содержание общего белка у сильных пшениц должно быть не менее 14,5 %, а клейковины – не менее 28 %. У изученных образцов *T. dicocum* и *T. dicoccoides* содержание белка было выше, чем у сортов (табл. 1). Наибольшие значения по данному показателю среди отдаленных гибридов выявлены для линии 10 *T. dicocum* K45926 × Рассвет (27,6 %) и линии 13-3 *T. dicoccoides* × Фестивальная (26,75 %). Большая часть интрогрессивных линий превосходила родительские сорта мягкой пшеницы или характеризовалась близкими значениями по содержанию белка в зерне. Полученные результаты подтверждаются данными литературы, согласно которым многие сородичи *T. aestivum* характеризуются более высоким количеством белка в зерне по сравнению с сортами [9]. Особый

Т а б л и ц а 1. Показатели качества зерна у интрогрессивных линий и родительских сортов пшеницы

Table 1. Grain quality parameters of introgression lines of bread wheat and their parental forms

Генотип Genotype	Линия Line	Стекловидность, % Vitreousness, %	Содержание белка, % Content protein, %	Количество клейковины Amount of gluten content		Качество клейковины, класс Quality of gluten content, class
				массовая доля, % mass fraction, %	класс class	
<i>T. dicoccum</i> K45926 × Рассвет	10	94 ± 2,0	27,60 ± 0,07	48,43 ± 0,09	высший	II
<i>T. dicoccum</i> K45926 × Фестивальная	1-3	76 ± 0,5	19,25 ± 0,07	41,48 ± 0,08	высший	III
	2-7	83 ± 2,0	19,39 ± 0,13	40,76 ± 0,04	высший	II
<i>T. dicoccoides</i> × Фестивальная	13-3	94 ± 1,5	26,75 ± 0,09	45,2 ± 0	высший	III
	15-7-1	95 ± 0,5	20,34 ± 0,05	41,04 ± 0	высший	II
	15-7-2	98 ± 1,0	17,73 ± 0,11	37,16 ± 0,04	высший	II
	16-5	92 ± 0	21,48 ± 0,01	42,4 ± 0	высший	II
Рассвет × <i>T. dicoccoides</i> K5199	29	94 ± 0,5	20,69 ± 0,02	42,74 ± 0,06	высший	I
Саратовская 29 × <i>T. dicoccoides</i>	8	97 ± 0	18,62 ± 0,29	38,68 ± 0	высший	II
Рассвет		96 ± 0,5	20,16 ± 0,02	38,94 ± 0,14	высший	II
Саратовская 29		97 ± 0	18,22 ± 0,07	35,4 ± 0,2	высший	II
Фестивальная		95 ± 1,5	21,63 ± 0,08	46,83 ± 1,39	высший	III
<i>T. dicoccum</i> K45926		74 ± 1,0	26,21 ± 0,03	–	–	–
<i>T. dicoccoides</i>		85 ± 1,0	24,49 ± 0,23	–	–	–
<i>T. dicoccoides</i> K5199		83 ± 1,0	23,53 ± 0,25	–	–	–

Примечание: «–» – параметр не определяли.

Note: «–» – parameter was not defined.

интерес представляют высокобелковые образцы *T. dicoccoides*, имеющие функциональный аллель гена *Gpc-B1* (хромосома 6BS), которые накапливают больше белка в результате ремобилизации питательных веществ из вегетативных органов растения в зерно в процессе его налива [10].

Для исследованных нами интрогрессивных линий пшеницы с высоким содержанием белка отмечено и высокое содержание клейковины, что согласуется с данными других авторов [11]. Содержание клейковины изученных генотипов превышает 36 %, что соответствует высшему классу продовольственного зерна. Наибольшее превышение над родительским сортом по этому признаку отмечено для линии 10 *T. dicoccum* K45926 × Рассвет – 9,6 %.

Для характеристики хлебопекарных свойств зерна большое значение имеет не только общее содержание белка и клейковины, но и качество клейковины, определяемое ее физико-химическими показателями (растяжимость, упругость, эластичность, вязкость). Одним из методов, позволяющих быстро и точно определять хлебопекарные достоинства пшеницы, является метод определения качества клейковины по величине деформации ее шарика под действием нагрузки сжатия с использованием прибора ИДК. Прибор фиксирует упругие свойства клейковины, по результатам которых производится классификация ее на группы качества. Для производства хлебопекарной муки подходят сорта мягкой пшеницы, содержащие 25–28 % сырой клейковины и II группы качества по прибору ИДК. Проведенный анализ показал, что сорта мягкой пшеницы Рассвет и Саратовская 29 имели клейковину II группы качества. Сорт Фестивальная относится к слабой пшенице (III группа качества). В чистом виде мука этого сорта не может использоваться в хлебопечении, а нуждается в улучшении. Из 9 изученных по данному признаку интрогрессивных линий 5 превосходили родительский сорт пшеницы. Особенно стоит выделить линию 29 Рассвет × *T. dicoccoides* K5199 с клейковиной I группы качества, характерной для сильных пшениц, добавление муки которых к слабым в количестве 20–30 % обеспечивает получение хлеба высокого качества. Три линии комбинации *T. dicoccoides* × Фестивальная и линия 2-7 *T. dicoccum* K45926 × Фестивальная относятся ко II группе качества, в то время как родительский сорт Фестивальная – только к III группе.

Известно, что качество клейковины определяется составом ее белков – глиадины и глютеина. Глютеин состоит из высокомолекулярных субъединиц (ВМС) и низкомолекулярных (НМС). Несмотря на то что ВМС глютеина составляют только 12 % от общего содержания белка в зерне, они играют ключевую роль в формировании хлебопекарных качеств пшеницы и кодируются локусами *Glu-1*, расположенными в длинных плечах хромосом 1A, 1B и 1D [12]. Каждый из этих локусов состоит из двух тесно сцепленных генов, один из которых обозначен как ген *x*-типа, другой – *y*-типа. Нами проведена идентификация состава высокомолекулярных субъединиц глютеина у интрогрессивных линий в сравнении с родительскими формами для выявления генотипов с аллелями локусов *Glu-1* от *T. dicoccoides*, *T. dicoccum* (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Аллельные варианты локусов *Glu-1* у интрогрессивных линий пшеницы и их родительских форм
T a b l e 2. *Glu-1* loci alleles of introgression lines of bread wheat and their parental forms

Генотип Genotype	Линия Line	Аллель локуса <i>Glu-A1</i> <i>Glu-A1</i> loci alleles	Аллель локуса <i>Glu-B1</i> <i>Glu-B1</i> loci alleles	Аллель локуса <i>Glu-D1</i> <i>Glu-D1</i> loci alleles
<i>Интрогрессивные линии пшеницы</i>				
<i>T. dicoccum</i> K45926 × Рассвет	10	<i>Glu-A1c</i>	<i>Glu-B1b</i>	–
<i>T. dicoccum</i> K45926 × Фестивальная	1-3	<i>Glu-A1a</i>	<i>Glu-B1c</i>	<i>Glu-Dd</i>
	2-7	<i>Glu-A1a</i>	<i>Glu-B1b</i>	<i>Glu-Dd</i>
<i>T. dicoccoides</i> × Фестивальная	13-3	<i>Glu-A1Td</i>	<i>Glu-B1c</i>	–
	15-7-1	<i>Glu-A1a</i>	<i>Glu-B1c</i>	<i>Glu-D1d</i>
	15-7-1	<i>Glu-A1a</i>	<i>Glu-B1c</i>	<i>Glu-D1d</i>
	16-5	<i>Glu-A1b</i>	<i>Glu-B1b</i>	<i>Glu-D1a</i>
Рассвет × <i>T. dicoccoides</i> K5199	29	<i>Glu-A1b</i>	<i>Glu-B1c</i>	<i>Glu-D1d</i>
Саратовская 29 × <i>T. dicoccoides</i>	8	<i>Glu-A1b</i>	<i>Glu-B1b</i>	<i>Glu-D1a</i>
<i>Родительские формы</i>				
Рассвет		<i>Glu-A1b</i>	<i>Glu-B1c</i>	<i>Glu-D1d</i>
Саратовская 29		<i>Glu-A1b</i>	<i>Glu-B1b</i>	<i>Glu-D1a</i>
Фестивальная		<i>Glu-A1b</i>	<i>Glu-B1c</i>	<i>Glu-D1d</i>
<i>T. dicoccum</i> K45926		<i>Glu-A1c</i>	<i>Glu-B1b</i>	–
<i>T. dicoccoides</i>		<i>Glu-A1Td</i>	<i>Glu-B1Td</i>	–
<i>T. dicoccoides</i> K5199		<i>Glu-A1Td</i>	<i>Glu-B1Td</i>	–

Пр и м е ч а н и я: « – » – отсутствие аллеля в локусе; *Td* – аллели *T. dicoccoides*.
N o t e s: « – » – no allele at the locus; *Td* – alleles of *T. dicoccoides*.

Полба *T. dicoccum* ($2n = 28$, AABB) обладает высокими вкусовыми и диетическими качествами, а клейковина и отдельные глиадиновые фракции запасных белков полбы содержат значительно меньше аллергенных веществ, вызывающих такое заболевание, как целиакия [13]. Образец *T. dicoccum* K45926 имеет в составе ВМГ субъединицы null, 7 + 8. Необходимо отметить, что пара субъединиц белков 7 + 8, кодируемых аллелем *Glu-B1b*, является одной из высококоранжируемых по вкладу в хлебопекарное качество пшеницы и оценивается в 3 балла по номенклатуре Payne [8]. Линии 10 *T. dicoccum* K45926 × Рассвет и 2-7 *T. dicoccum* K45926 × Фестивальная унаследовали данную пару субъединиц от полбы. Благодаря аллелю *Glu-B1b* удалось повысить качество клейковины линии 2-7. Линии 2-7 и 1-3 комбинации *T. dicoccum* K45926 × Фестивальная отличаются только по составу локуса *Glu-B1*: *Glu-B1b* и *Glu-B1c* соответственно, при этом по качеству клейковины линия 2-7 превосходит линию 1-3 и исходный сорт пшеницы (табл. 1).

Полба дикорастущая *T. dicoccoides* ($2n = 28$, AABB) наряду с нетребовательностью к условиям произрастания характеризуется высоким содержанием белка в зерне (до 24,5 %), высоким уровнем полиморфизма для локусов *Glu-A1* и *Glu-B1*, что представляет ценность для улучшения селекционных признаков пшеницы. Исследование полиморфизма высокомолекулярных глютеинов 237 образцов *T. dicoccoides* зарубежными учеными показало, что в локусе *Glu-A1* большинства образцов (93,24 %) в активном состоянии находится только ген *1Ax*, кодирующий субъединицу *x*-типа. Однако у 16 (6,75 %) образцов обнаружены высокомолекулярные субъединицы

глютеина как x -, так и y -типа, что отличает их от культурных пшениц, у которых *1Au*-ген не экспрессируется. Высокий уровень полиморфизма обнаружен для локуса *Glu-B1* *T. dicoccoides*, содержащего как аллели, встречающиеся у различных сортов мягкой пшеницы, так и новые аллели, не характерные для *T. aestivum* [14].

Проанализированные нами образцы *T. dicoccoides* имели 4 высокомолекулярные субъединицы глютеина с Mr 115, 98, 88, 81 kDa, три из которых не характерны для мягкой пшеницы. Особый интерес представляет выявленная субъединица 1Au, которая отсутствует у культурных пшениц. Линия 13-3 *T. dicoccoides* × Фестивальная унаследовала от *T. dicoccoides* аллели по локусу *Glu-A1*. Для локуса *Glu-B1* характерны аллели исходного сорта пшеницы. Однако присутствие 1Ax и 1Au субъединиц от *T. dicoccoides* у линии 13-3 не улучшило качество клейковины, оно осталось на уровне родительского сорта Фестивальная (табл. 1). В спектре линий 15-7-1, 15-7-2, 16-5 продуктов *T. dicoccoides* не обнаружено. Для данных линий выявлены аллели, не характерные для родительского сорта пшеницы – *Glu-A1a* (линии 15-7-1, 15-7-2) и *Glu-B1b* (линия 16-5), что позволило повысить их качество клейковины по сравнению с родительским сортом (табл. 1). Линия 29 комбинации Рассвет × *T. dicoccoides* K5199 сохранила состав ВМСГ исходного сорта пшеницы, но характеризовалась более высоким качеством клейковины (I группа качества), чем сорт Рассвет (II группа качества), что можно объяснить влиянием на данный признак не только генов *Glu-1*. Известно, что в контроле вязко-эластичных свойств клейковины участвуют также гены *Glu-3*, определяющие компонентный состав низкомолекулярных глютеинов, и гены *Gli*, кодирующие спирторастворимые белки глиадины [15].

Заключение. Анализ состава высокомолекулярных субъединиц глютеина у интрогрессивных линий мягкой пшеницы и их родительских форм позволил выделить линии с аллелями локусов *Glu-1* от тетраплоидных сородичей пшеницы *T. dicoccoides* и *T. dicoccum*. Оценка важнейших критериев качества зерна пшеницы показала, что интрогрессия чужеродного генетического материала в геном мягкой пшеницы оказала положительный эффект на такие признаки, как стекловидность, содержание белка и клейковины. Установлено, что линии с аллелями локусов *Glu-A1* от *T. dicoccoides* и *Glu-B1* от *T. dicoccum* были на уровне исходного сорта пшеницы или превосходили его по качеству клейковины. В результате проведенных исследований выделены новые линии яровой мягкой пшеницы с высоким качеством зерна, которые могут использоваться для селекции данной культуры.

Список использованных источников

1. Технологические свойства зерна и муки у линий мягкой пшеницы с интрогрессией от *Aegilops speltoides* Tausch / Т. А. Пшеничникова [и др.] // Сельскохозяйственная биология. – 2007. – Т. 42, № 5. – С. 86–89.
2. Effects of an Lr26 translocation on grain productivity and grain protein content in spring bread wheat / S. N. Sibikeev [et al.] // Ann. Wheat Newsletter. USA. – 2009. – Vol. 55. – P. 176.
3. Characterization of HMW glutenin subunits in *Thinopyrum intermedium*, *Th. bessarabicum*, *Lophopyrum elongatum*, *Aegilops markgrafii*, and their addition lines in wheat / Z. X. Niu [et al.] // Crop Sci. – 2011. – Vol. 51, N 2. – P. 667–677. <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.04.0235>
4. Analysis of dough rheological property and gluten quality characteristics in wild emmer wheat (*Triticum dicoccoides* (Körn. ex Asch. et Graebn.) Schweinf.) / D. Zhang [et al.] // Genet. Resour. Crop Evol. – 2016. – Vol. 63, N 4. – P. 675–683. <https://doi.org/10.1007/s10722-015-0275-x>
5. Характеристика колекційних зразків спельти (*Triticum spelta* L.) за елементами структури продуктивності та хлібопекарською якістю / В. В. Моргун [и др.] // Физиология растений и генетика. – 2016. – Т. 48, № 2. – С. 112–119.
6. Singh, N. K. A simplified SDS-PAGE procedure for separating LMW subunits of glutenin / N. K. Singh, K. W. Shepherd, G. B. Cornish // J. Cereal Sci. – 1991. – Vol. 14, N 3. – P. 203–208. [https://doi.org/10.1016/s0733-5210\(09\)80039-8](https://doi.org/10.1016/s0733-5210(09)80039-8)
7. Laemmli, U. K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4 / U. K. Laemmli // Nature. – 1970. – Vol. 227, N 5259. – P. 680–685. <https://doi.org/10.1038/227680a0>
8. Payne, P. I. Catalogue of alleles for the complex gene loci, *Glu-A1*, *Glu-B1*, and *Glu-D1* which code for high-molecular-weight subunits of glutenin in hexaploid wheat / P. I. Payne, G. J. Lawrence // Cereal Res. Com. – 1983. – Vol. 11, N 1. – P. 29–35.
9. Levy, A. A. Increase in grain protein percentage in high-yielding common wheat breeding lines by genes from wild tetraploid wheat / A. A. Levy, M. Feldman // Euphytica. – 1987. – Vol. 36, N 2. – P. 353–359. <https://doi.org/10.1007/bf00041478>
10. Nitrogen uptake and remobilization in tetraploid Langdon durum wheat and a recombinant substitution line with the high grain protein gene *Gpc-B1* / M. A. Kade [et al.] // Plant Breeding. – 2005. – Vol. 124, N 4. – P. 343–349. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2005.01110.x>

11. Картирование локусов количественных признаков (QTL), ассоциированных с показателями качества зерна мягкой пшеницы, выращенного в различных условиях среды / Т. А. Пшеничникова [и др.] // Генетика. – 2008. – Т. 44, № 1. – С. 90–101.
12. One hundred years of grain omics: identifying the glutes that feed the world / M. Ribeiro [et al.] // Proteome Res. – 2013. – Vol. 12, N 11. – P. 4702–4716. <https://doi.org/10.1021/pr400663t>
13. Environmental factors of celiac disease: cytotoxicity of hulled wheat species *T. monococcum*, *T. turgidum* L. ssp. *dicoccum* and *T. aestivum* ssp. *spelta* / O. Vincentini [et al.] // J. Gastroenterol. Hepatol. – 2007. – Vol. 22, N 11. – P. 1816–1822. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1746.2006.04680.x>
14. Margiotta, B. Polymorphism of high Mr glutenin subunits in wild emmer *Triticum turgidum* subsp. *dicoccoides*: chromatographic, electrophoretic separation and PCR analysis of their encoding genes / B. Margiotta, G. Colaprico, M. Urbano // Genet. Resour. Crop Evol. – 2014. – Vol. 61, N 2. – P. 331–343. <https://doi.org/10.1007/s10722-013-0037-6>
15. Wheat seed storage proteins: advances in molecular genetics, diversity and breeding applications / A. Rasheed [et al.] // J. Cereal Sci. – 2014. – Vol. 60, N 1. – P. 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.01.020>

References

1. Pshenichnikova T. A., Ermakova M. F., Chistyakova A. K., Shchukina L. V., Lapochkina I. O. Technological properties of grain and flour in soft wheat lines with introgression from *Aegilops speltoides* Tausch. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya = Agricultural Biology*, 2007, vol. 42, no. 5, pp. 86–89 (in Russian).
2. Sibikeev S. N., Krupnova O. V., Voronina S. A., Krupnov V. A., Druzhin A. E. Effects of an Lr26 translocation on grain productivity and grain protein content in spring bread wheat. *Annual Wheat Newsletter. USA*, 2009, vol. 55, pp. 176.
3. Niu Z. X., Klindworth R., Wang R. R.-C., Jauhar P. P., Larkin P. J., Xu S. S. Characterization of HMW glutenin subunits in *Thinopyrum intermedium*, *Th. bessarabicum*, *Lophopyrum elongatum*, *Aegilops markgrafii*, and their addition lines in wheat. *Crop Science*, 2011, vol. 51, no. 2, pp. 667–677. <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.04.0235>
4. Zhang D., Yuan Y., Su Y., Li S. Analysis of dough rheological property and gluten quality characteristics in wild emmer wheat (*Triticum dicoccoides* (Körn. ex Asch. et Graebn.) Schweinf.). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2016, vol. 63, no. 4, pp. 675–683. <https://doi.org/10.1007/s10722-015-0275-x>
5. Morgun V. V., Sichkar S. M., Pochinok V. M., Ninieva A. K., Chugunkova T. V. Characterization of spelt collection samples (*Triticum spelta* L.) by elements of plant productivity structure and baking quality. *Fiziologiya rasteniy i genetika = Plant Physiology and Genetics*, 2016, vol. 48, no 2, pp. 112–119 (in Ukrainian).
6. Singh N. K., Shepherd K. W., Cornish G. B. A simplified SDS-PAGE procedure for separating LMW subunits of glutenin. *Journal of Cereal Science*, 1991, vol. 14, no. 3, pp. 203–208. [https://doi.org/10.1016/s0733-5210\(09\)80039-8](https://doi.org/10.1016/s0733-5210(09)80039-8)
7. Laemmli U. K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature*, 1970, vol. 227, no. 5259, pp. 680–685. <https://doi.org/10.1038/227680a0>
8. Payne P. I., Lawrence G. J. Catalogue of alleles for the complex gene loci, *Glu-A1*, *Glu-B1*, and *Glu-D1* which code for high-molecular-weight subunits of glutenin in hexaploid wheat. *Cereal Research Communication*, 1983, vol. 11, no. 1, pp. 29–35.
9. Levy A. A., Feldman M. Increase in grain protein percentage in high-yielding common wheat breeding lines by genes from wild tetraploid wheat. *Euphytica*, 1987, vol. 36, no. 2, pp. 353–359. <https://doi.org/10.1007/bf00041478>
10. Kade M. A., Barneix J., Olmos S., Dubcovsky J. Nitrogen uptake and remobilization in tetraploid Langdon durum wheat and a recombinant substitution line with the high grain protein gene *Gpc-B1*. *Plant Breeding*, 2005, vol. 124, no. 4, pp. 343–349. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2005.01110.x>
11. Pshenichnikova T. A., Ermakova M. F., Chistyakova A. K., Shchukina L. V., Berezovskaya E. V., Lochwasser U., Röder M., Börner A. Mapping of the quantitative trait loci (QTL) associated with grain quality characteristics of the bread wheat grown under different environmental conditions. *Russian Journal of Genetics*, 2008, vol. 44, no. 1, pp. 74–84. <https://doi.org/10.1134/s1022795408010109>
12. Ribeiro M., Nunes-Miranda J. D., Branlard G., Carrillo J. M., Rodriguez-Quijano M., Igrejas G. One hundred years of grain omics: identifying the glutes that feed the world. *Journal of Proteome Research*, 2013, vol. 12, no. 11, pp. 4702–4716. <https://doi.org/10.1021/pr400663t>
13. Vincentini O., Maialetti F., Gazza L., Silano M., Dessì M., De Vincenzi M., Pogna N. E. Environmental factors of celiac disease: cytotoxicity of hulled wheat species *T. monococcum*, *T. turgidum* L. ssp. *dicoccum* and *T. aestivum* ssp. *spelta*. *Journal of Gastroenterology and Hepatology*, 2007, vol. 22, no. 11, pp. 1816–1822. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1746.2006.04680.x>
14. Margiotta B., Colaprico G., Urbano M. Polymorphism of high Mr glutenin subunits in wild emmer *Triticum turgidum* subsp. *dicoccoides*: chromatographic, electrophoretic separation and PCR analysis of their encoding genes. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2014, vol. 61, no. 2, pp. 331–343. <https://doi.org/10.1007/s10722-013-0037-6>
15. Rasheed A., Xia X., Yan Yu., Appels R., Mahmood T., He Z. Wheat seed storage proteins: advances in molecular genetics, diversity and breeding applications. *Journal of Cereal Science*, 2014, vol. 60, no. 1, pp. 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.01.020>

Информация об авторах

Орловская Ольга Александровна – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: O.Orlovskaya@igc.by. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1187-1317>.

Вакула Светлана Ивановна – канд. биол. наук, науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: s.vacula@igc.by. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2242-7107>.

Хотылева Любовь Владимировна – академик, д-р биол. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: L.Khotyleva@igc.by. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0295-5022>.

Кильчевский Александр Владимирович – академик, д-р биол. наук, профессор, главный ученый секретарь. Национальная академия наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Kilchev@presidium.bas-net.by. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0175-9786>.

Information about the authors

Orlovskaya Olga Alexandrovna – Ph. D. (Biology), Leading researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: O.Orlovskaya@igc.by. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1187-1317>.

Vakula Svetlana Ivanovna – Ph. D. (Biology). Researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s.vacula@igc.by. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2242-7107>.

Khotyleva Lubov Vladimirovna – Academician, D. Sc. (Biology), Professor. Chief researcher. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: L.Khotyleva@igc.by. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0295-5022>.

Kilchevsky Alexander Vladimirovich – Academician, D. Sc. (Biology), Professor, Chief scientific secretary. National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Kilchev@presidium.bas-net.by. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0175-9786>.

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

МЕДИЦИНА
MEDICINE

УДК 617.7
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-719-724>

Поступило в редакцию 10.10.2018
Received 10.10.2018

Г. Р. Семак, А. В. Людчик, И. Ю. Жерко

Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь

**НОВЫЙ ПОДХОД К ЛЕЧЕНИЮ ХРОНИЧЕСКИХ ДИСТРОФИЧЕСКИХ
ЗАБОЛЕВАНИЙ РОГОВИЦЫ**

(Представлено членом-корреспондентом Н. С. Сердюченко)

Аннотация. В группе пациентов с хроническими дистрофическими заболеваниями роговицы была исследована эффективность коррекции болезни сухого глаза методом субконъюнктивального введения 1 %-ного натрия гиалуроната. Описаны функции гиалуроновой кислоты в зависимости от ее молекулярной массы. Проведенные исследования показывают необходимость использования инъекционной формы гиалуроната натрия при лечении пациентов с заболеванием глазной поверхности.

Ключевые слова: гиалуроновая кислота, болезнь сухого глаза, регенерация, дистрофии роговицы

Для цитирования: Семак, Г. Р. Новый подход к лечению хронических дистрофических заболеваний роговицы / Г. Р. Семак, А. В. Людчик, И. Ю. Жерко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 719–724. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-719-724>

Galina R. Semak, Andrey V. Lyudchik, Irina Yu. Zherko

Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus

NEW APPROACH TO TREATING CHRONIC DYSTROPHIC CORNEA DISEASES

(Communicated by Corresponding Member Nikolai S. Serduchenko)

Abstract. The efficiency of the treatment of dry eye disease patients with keratopathy at a subconjunctival injection of 1 % sodium hyaluronate was studied. This review describes the functions of hyaluronic acid depending on its molecular weight. The performed study shows the necessity of using the injection form of sodium hyaluronate in the treatment of patients with dry eye disease.

Keywords: hyaluronic acid, dry eye disease, regeneration, corneal dystrophy

For citation: Semak G. R., Lyudchik A. V., Zherko I. Yu. New approach to treating chronic dystrophic cornea diseases. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 719–724 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-719-724>

Введение. Хронические дистрофические заболевания роговицы (ХДЗР) – группа заболеваний, характеризующихся нарушением обменных процессов в роговице, ведущих к уменьшению ее прозрачности. Первичные дистрофии встречаются довольно редко и генетически обусловлены. Вторичные возникают в исходе различных состояний: бактериальных и вирусных кератитов, ожоговой болезни, после оперативных вмешательств, на фоне применения глазных капель, содержащих консерванты.

Помутнение роговицы ведет к ухудшению зрительных функций. Другие симптомы, снижающие качество жизни пациентов с ХДЗР (светобоязнь, слезотечение, чувство инородного тела,

быстрая утомляемость зрения), являются проявлением болезни сухого глаза (БСГ). Это состояние не только усугубляет течение ХДЗР, но и может стать их причиной.

В 2017 г. Международная конференция по проблеме сухого глаза DEWS II (Dry Eye WorkShop II), прошедшая под эгидой TFOS (Tear Film and Ocular Surface Society), в своем отчете сформулировала новое определение БСГ с учетом результатов проведенных в период после предыдущей DEWS (2007 г.) в разных странах исследований, так или иначе касающихся данной проблемы.

На сегодняшний день БСГ рассматривается как мультифакторное заболевание глазной поверхности, характеризующееся нарушением гомеостаза слезной пленки и сопровождающееся окулярными симптомами, в которых этиологическую роль играют нестабильность и гиперосмолярность слезной пленки, воспаление и повреждение поверхности глаза, а также нейросенсорные нарушения [1].

В комплексном лечении БСГ давно используется гиалуроновая кислота (ГК) в каплях. Однако часто они оказываются недостаточно эффективными даже при простых состояниях, например, после кераторефракционных операций. Рандомизированное, двойное слепое, плацебо контролируемое исследование продемонстрировало, что увеличение толщины слезной пленки, вызванное применением ГК в каплях, отмечается лишь в течение 30 мин у здоровых людей [2]. В связи с этим перспективным видится субконъюнктивальное введение препарата ГК для лечения БСГ III–IV степени.

Функции фрагментов ГК в зависимости от их длины. Известно, что разные фракции ГК опосредуют разные эффекты.

ВМ-ГА – высокомолекулярный гиалуронан (>1000 кДа). Эта объемная молекула занимает значительную часть внеклеточного пространства и способна не только удерживать большое количество воды, обеспечивая механические свойства тканей, но и выполнять функцию молекулярного «сита», защищая клетки от патологических воздействий микроорганизмов, цитокинов, ионов. Протективные эффекты ВМ-ГА могут быть связаны с его способностью подавлять воспаление.

Олиго-ГА гиалуронан (<10 кДа). Большое количество эффектов Олиго-ГА опосредовано его взаимодействиями с рецепторами иммунокомпетентных клеток, реализуемыми в потенцировании воспаления. Олиго-ГА также влияет на эндотелиоциты. Олигомеры, состоящие из 6,8 и 10 дисахаридных элементов, потенцируют пролиферацию эндотелиоцитов и секрецию VEGF [3].

СМ – среднемoleкулярный гиалуронан 250–1000 кДа и НМ-ГА – низкомолекулярный гиалуронан (10–250 кДа). Фрагменты средней и низкой молекулярной массы часто выявляются в виде полидисперсной фракции молекул с перекрывающимися молекулярными массами. СМ- и НМ-ГА проявляют свойства как ВМ, так и Олиго-ГА. Сообщается, что СМ-ГА способен индуцировать дифференцировку мезенхимальных клеток (хондроцитов, кератиноцитов, фибробластов, включая индукцию экспрессии факторов роста; эндотелиоцитов), опосредуя нормальный ответ на повреждение [4]. НМ-ГА ускоряет заживление ран путем индукции экспрессии CD44, RНАММ и накопления коллагена третьего типа. Взаимодействуя с TLR4, НМ-ГА индуцирует апоптоз нейтрофилов, лимитируя реакцию воспаления [5].

Целью нашего исследования явилась разработка алгоритма лечения пациентов с хроническими дистрофическими заболеваниями роговицы на фоне болезни сухого глаза с включением в комплексное лечение инъекционной формы 1 %-ного натрия гиалуроната.

Материалы и методы исследования. В исследование вошли 40 пациентов (51 глаз) в возрасте от 21 до 82 лет. Это пациенты с заболеванием глазной поверхности в исходе воспалительных заболеваний на фоне диагностированной БСГ разной степени выраженности в течение 2–10 лет. Все они до включения в данное исследование регулярно наблюдались у офтальмолога, получали адекватную слезозамещающую терапию с применением капель, содержащих ГК.

Каждый включенный в исследование пациент заполнял разработанную анкету и информированное согласие. Всем пациентам проведен полный объем офтальмологических обследований, включающий визометрию, пневмотонометрию, биомикроскопию, кератопахиметрию, оптическую когерентную томографию (ОКТ) переднего отрезка глаза. Обязательной была диагностика БСГ, включающая тест Ширмера, время разрыва слезной пленки, анализ отделяемого мейбомие-

вых желез, тест LIPCOF, окрашивание флюоресцеином. Все перечисленные выше исследования были включены в разработанный нами протокол обследования пациента с БСГ.

При наличии показаний пациентам выполнялась кератопластика. В последующем проводилось гистологическое и иммуногистохимическое исследование фиксированных в формалине парафиновых срезов операционного материала.

Для проверки достоверности различий групп использовался критерий Манна–Уитни, для установления взаимосвязи между параметрами – однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Статистическая обработка данных проводилась в пакете прикладных программ Statistica 8.0.

Результаты и их обсуждение. Все пациенты до включения в данное исследование регулярно наблюдались у офтальмолога, получали адекватную слезозамещающую терапию с применением капель, содержащих ГК. Несмотря на локальное использование инстилляций ГК, улучшение состояния не наблюдалось, что и явилось причиной включения пациентов в данное исследование.

28 пациентам этой группы с кератопатией в исходе кератита проводилась комплексная терапия с включением инъекционной формы гиалуроновой кислоты 1 %.

20 пациентов (24 глаза) были включены в ранние сроки после купирования острого воспалительного процесса (через 1–2 месяца). В результате были получены положительные клинические результаты (повышение остроты зрения за счет увеличения прозрачности помутнений роговицы у всех пациентов, устранение роговичного синдрома, восстановление толщины роговицы в области патологического очага, улучшение состояния слезной пленки – увеличение суммарной слезопродукции на фоне улучшения качества слезной пленки).

8 пациентов (8 глаз) были включены в исследование по прошествии более длительного срока от купирования воспаления (6 и более месяцев). У этой группы пациентов клинические исходы на фоне проведенной терапии оказались не такими явными. Так, только у троих пациентов было отмечено повышение остроты зрения. Нормализация толщины роговицы, улучшение показателей слезопродукции и качества слезной пленки отмечены у всех пациентов. Отсутствие повышения остроты зрения объясняется центральной локализацией помутнений и более поздними сроками начала терапии.

Изменения объективных показателей состояния передней поверхности глаза (времени разрыва слезной пленки, пробы Ширмера, LIPCOF-теста, данных биомикроскопии) характеризовались положительной динамикой в процессе терапии (рис. 1). Наиболее быстро и значительно изменялись проба Ширмера и время разрыва слезной пленки, что свидетельствует о благоприятном влиянии терапии как на водный, так и на муциновый слой слезной пленки. У молодых пациентов с малым стажем сухого глаза положительная динамика наблюдалась и по результатам LIPCOF-теста. Стоит отметить, что у пожилых пациентов данный тест не информативен.

Динамика объективных показателей во время лечения

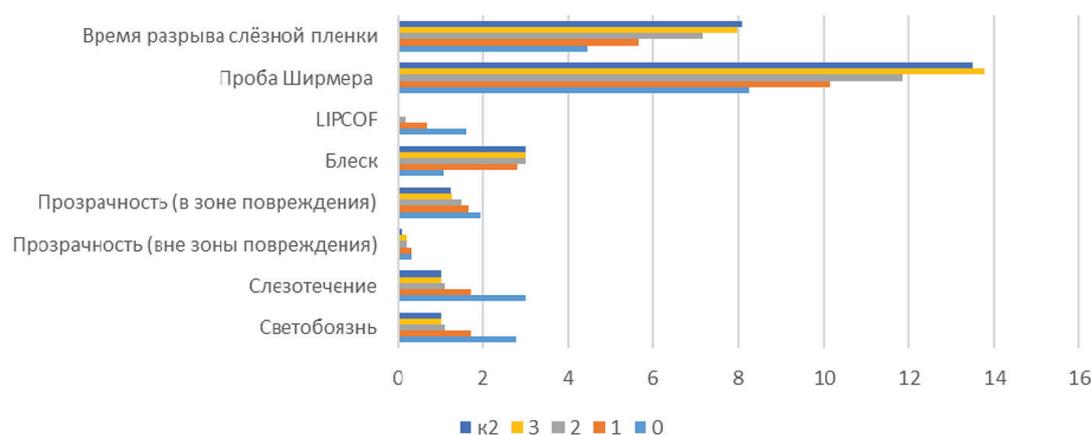


Рис. 1. Динамика объективных показателей во время лечения: 0 – состояние до начала терапии; 1 – после первой инъекции; 2 – после второй инъекции; 3 – после третьей инъекции; k2 – контроль через месяц после последней инъекции
Fig. 1. Dynamics of objective indicators during treatment: 0 – state before therapy; 1 – after the first injection; 2 – after the second injection; 3 – after the third injection; k2 – control one month after the last injection

В исходе воспалительного процесса формируется уплотнение тканей роговицы, сопровождающееся отеком. По данным пахиметрии, толщина роговицы как в зоне повреждения, так и вне ее уменьшалась после курса терапии.

Во многом оценка эффекта терапии при БСГ основывается на субъективных ощущениях пациентов. Уменьшение индекса OSDI отмечалось уже после первой инъекции и продолжало прогрессивно снижаться во время курса и после его окончания вплоть до контроля через месяц после последней инъекции (рис. 2).

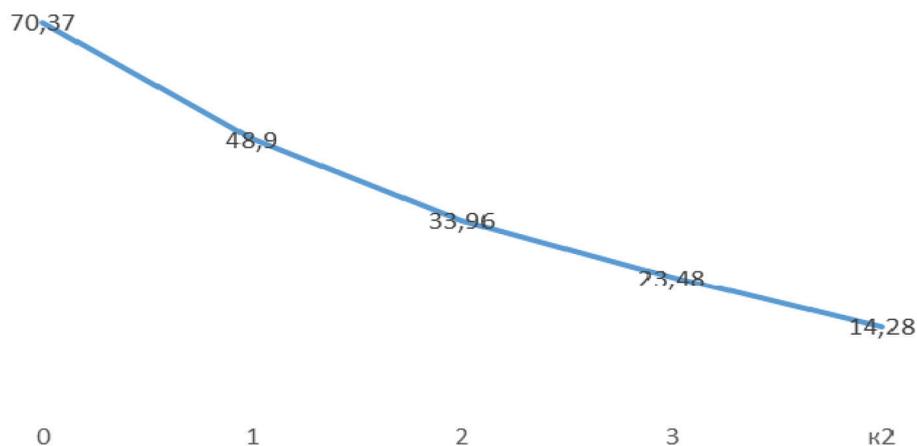


Рис. 2. Изменение индекса OSDI в процессе лечения: 0 – состояние до начала терапии; 1 – после первой инъекции; 2 – после второй инъекции; 3 – после третьей инъекции; k2 – контроль через месяц после последней инъекции

Fig. 2. Change in OSDI during treatment: 0 – state before therapy; 1 – after the first injection; 2 – after the second injection; 3 – after the third injection; k2 – control one month after the last injection

12 пациентов данной группы имели грубые васкуляризированные бельма в исходе тяжелых воспалительных процессов (язвы роговицы, перфорации роговицы на фоне тяжелого длительно леченого кератита). Всем была проведена сквозная субтотальная кератопластика донорской роговицей по стандартной методике.

8 пациентам проводилась предоперационная подготовка с введением гиалуроновой кислоты 1 раз в неделю № 3. У этих пациентов наблюдалась быстрая эпителизация уже на 3-и сутки после кератопластики (рис. 3, 4)

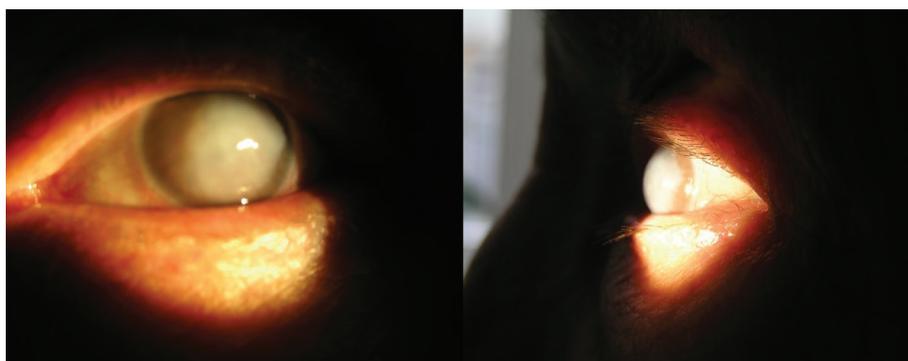


Рис. 3. Биомикроскопия переднего отрезка глазного яблока пациента Ж. до оперативного лечения

Fig. 3. Biomicroscopy of the anterior segment of patient J. before surgical treatment

Четверым пациентам предоперационная подготовка не проводилась. В послеоперационном периоде наблюдалась замедленная эпителизация (отсутствовала на 3-и сутки), что явилось показанием для введения ГК. После введения субконъюнктивально 1 %-ной гиалуроновой кислоты 1 раз в неделю № 3 эпителизация завершилась уже на 10-е сутки у одного, на 12-е сутки у другого пациента.



Рис. 4. Биомикроскопия переднего отрезка глазного яблока пациента Г. после оперативного лечения

Fig. 4. Biomicroscopy of the anterior segment of patient G. before surgical treatment

При гистологическом исследовании дисков роговиц после инъекции 1 %-ной низкомолекулярной ГК наблюдается достоверное уменьшение уровня апоптоза в роговичном эпителии и отека стромы по сравнению с контрольной группой ($p < 0,05$).

Иммуногистохимическое исследование показывает увеличение протяженности экспрессии CD44, что может свидетельствовать об увеличении синтеза эндогенной ГК и активизации процессов репарации. При этом протяженность экспрессии провоспалительной молекулы MMP9 не увеличивается. Что делает обоснованным применение данной формы ГК при кератопатии в исходе воспалительных процессов.

Алгоритм лечения пациентов с дистрофическими хроническими заболеваниями при воспалительных заболеваниях переднего отрезка глазного яблока включает субконъюнктивальное введение 1 %-ной ГК инъекционной формы 0,5 мл один раз в неделю № 3. В дальнейшем для большинства пациентов с БСГ I–II показан перевод на инстилляцию препаратов с гиалуроновой кислотой. Для пациентов с БСГ III–IV показано введение гиалуроновой кислоты 1 раз в месяц с контролем состояния переднего отрезка глазного яблока.

При наличии тяжелого ксероза на фоне синдрома Шегрена или нейротрофических нарушений в области орбиты показано назначение инъекций 1 %-ной ГК 1,0 мл под кожу век и субконъюнктивально 0,5 мл для улучшения регенеративных процессов тканей орбиты.

Заключение. Введение экзогенной ГК при кератопатиях может само по себе способствовать регенерации и активации метаболических процессов в тканях роговицы. При этом наиболее оправданным представляется использование низко- и средномолекулярной фракции ГК, сочетающей в себе защитные функции высокомолекулярного гиалурона и активирующее влияние Олиго-ГА на клетки. Дополнительным благоприятным следствием введения экзогенной ГК является активация синтеза эндогенной ГК, что в свою очередь способствует восстановлению гомеостаза переднего отрезка глаза на длительное время после курса проведенной терапии.

Проведенные исследования показывают необходимость использования при лечении хронических дистрофических заболеваний роговицы инъекционной формы низкомолекулярной гиалуроновой кислоты.

Список использованных источников

1. TFOS DEWS II Introduction // The Ocular Surface. 2017 [Electronic resource]. – Mode access: <http://www.theocularsurfacejournal.com/article/S1542>. – Date access: 20.07.2017.
2. Effect of hyaluronic acid on tear film thickness as assessed with ultra-high resolution optical coherence tomography / S. Kaya [et al.] // Acta Ophthalmol. – 2015. – Vol. 93, N 5. – P. 439–443. <https://doi.org/10.1111/aos.12647>
3. HYAL1 hyaluronidase in prostate cancer: a tumor promoter and suppressor / V. B. Lokeshwar [et al.] // Cancer Res. – 2005. – Vol. 65, N 17. – P. 7782–7789. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.can-05-1022>
4. Oligosaccharides of hyaluronan are potent activators of dendritic cells / C. C. Termeer [et al.] // J. Immunol. – 2000. – Vol. 165, N 4. – P. 1863–1870. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.165.4.1863>
5. Simpson, M. A. Hyaluronan and hyaluronidase in genitourinary tumors / M. A. Simpson, V. B. Lokeshwar // Front. Biosci. – 2008. – Vol. 13. – P. 5664–5680. <https://doi.org/10.2741/3108>

References

1. TFOS DEWS II Introduction. *The Ocular Surface*. 2017. Available at: <http://www.theocularsurfacejournal.com/article/S1542> (accessed 20 July 2018).
2. Kaya S., Schmidl D., Schmetterer L., Witkowska K. J., Unterhuber A., Aranha dos Santos V., Baar C., Garhöfer G., Werkmeister R. M. Effect of hyaluronic acid on tear film thickness as assessed with ultra-high resolution optical coherence tomography. *Acta Ophthalmologica*, 2015, vol. 93, no. 5, pp. 439–443. <https://doi.org/10.1111/aos.12647>
3. Lokeshwar V. B., Cerwinka W. H., Isoyama T., Lokeshwar B. L. HYAL1 hyaluronidase in prostate cancer: a tumor promoter and suppressor. *Cancer Research*, 2005, vol. 65, no. 17, pp. 7782–7789. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.can-05-1022>
4. Termeer C. C., Hennies J., Voith U., Ahrens T., Weiss J. M., Prehm P., Simon J. C. Oligosaccharides of hyaluronan are potent activators of dendritic cells. *Journal of Immunology*, 2000, vol. 165, no. 4, pp. 1863–1870. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.165.4.1863>
5. Simpson M. A., Lokeshwar V. B. Hyaluronan and hyaluronidase in genitourinary tumors. *Frontiers in Bioscience*, 2008, vol. 13, pp. 5664–5680. <https://doi.org/10.2741/3108>

Информация об авторах

Семак Галина Романовна – канд. мед. наук, доцент. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, Минск, Республика Беларусь). E-mail: semakgalina@mail.ru.

Людчик Андрей Владимирович. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sermaxse@gmail.com.

Жерко Ирина Юрьевна – студент. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zherko.irina@mail.ru.

Information about the authors

Semak Galina Romanovna – Ph. D. (Medicine), Associate professor. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhinsky Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: semakgalina@mail.ru.

Lyudchik Andrey Vladimirovich. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhinsky Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sermaxse@gmail.com.

Zherko Irina Yurievna – Student. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhinsky Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zherko.irina@mail.ru.

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 615.281-037.86:[616.71-033.2:678.744.355]-092.4
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-725-731>

Поступило в редакцию 04.10.2018
Received 04.10.2018

**П. А. Волотовский¹, Д. В. Тапальский², А. А. Ситник¹,
А. И. Козлова², М. А. Герасименко¹**

¹Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии, Минск, Республика Беларусь

²Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Республика Беларусь

АНТИБАКТЕРИАЛЬНОЕ ПОКРЫТИЕ ИМПЛАНТАТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТНОГО КОСТНОГО ЦЕМЕНТА *IN VITRO* И *IN VIVO*

(Представлено членом-корреспондентом Н. С. Сердюченко)

Аннотация. Частота рецидивов после костных инфекций в настоящее время высока. Создание конструкции, которая не только позволяет стабилизировать костные отломки, но и обладает антибактериальной активностью, представляется чрезвычайно актуальной и перспективной задачей. Цель исследования – оценить эффективность применения антибактериального покрытия на основе полиметилметакрилатного цемента в эксперименте и при инфицированных несращениях длинных трубчатых костей нижних конечностей. На титановых пластинах сформированы покрытия из костного цемента, импрегнированного антибиотиками. Выполнена отмывка пластин методом последовательных микроразведений в бульоне, оценена концентрация антибиотиков в отмывочных растворах. Антибактериальная активность образцов в отношении чувствительных и множественно-резистентных штаммов *S. aureus* и *P. aeruginosa* оценена двуслойным агаровым методом. В исследование включены 70 пациентов, разделенных на 2 группы: остеосинтез стержнем с блокированием и антибактериальным покрытием (40 пациентов, основная группа) и остеосинтез аппаратом внешней фиксации (30 пациентов, контрольная группа), сопоставимые по возрасту, полу и продолжительности заболевания. Эффективность антибактериального покрытия анализировали по продолжительности системного применения антибактериальных препаратов и наличию рецидивов инфекции. Концентрации меропенема и фосфомицина в отмывочных растворах, полученных при однократной и двукратной обработке образцов, были достаточными для подавления роста контрольных штаммов. Ванкомицин-содержащие образцы обладали достаточной антибактериальной активностью в отношении как метициллинчувствительного (MSSA), так и метициллинрезистентного (MRSA) штаммов *S. aureus*, двукратная отмывка образцов устраняла их бактерицидные свойства. Продолжительность системной антибактериальной терапии в основной группе была статистически значимо меньше, чем в контрольной ($U = 77,5, p < 0,001$), также в основной группе наблюдалось меньше рецидивов инфекции 32,5 % vs. 86,7 % ($\chi^2 = 20,39; p < 0,001$). Покрытия из костного цемента, импрегнированного фосфомицином, меропенемом или ванкомицином, обладают достаточной и длительной антибактериальной активностью, проявляющейся главным образом в отношении антибиотикочувствительных штаммов. Адекватное применение такого покрытия в клинической практике позволяет получить желаемый результат лечения.

Ключевые слова: инфицированные несращения, стержень с блокированием, антибактериальное покрытие, костный цемент, антибиотикорезистентность

Для цитирования: Антибактериальное покрытие имплантатов на основе полиметилметакрилатного костного цемента *in vitro* и *in vivo* / П. А. Волотовский [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 725–731. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-725-731>

Pavel A. Volotovskii¹, Dmitry V. Tapalski², Alexander A. Sitnik¹, Anna I. Kozlova², Mikhail A. Gerasimenko¹

¹Republican Scientific and Practical Centre for Traumatology and Orthopedics, Minsk, Republic of Belarus

²Gomel State Medical University, Gomel, Republic of Belarus

POLYMETHYLMETHACRYLATE-BASED ANTIBACTERIAL COATING *IN VITRO* AND *IN VIVO*

(Communicated by Corresponding Member Nikolai S. Serduchenko)

Abstract. Nowadays, the infection recurrence rate in osteomyelitis is still high. New hardware not only allowing one to stabilize bone fragments, but also having antibacterial activity seems to be an extremely useful and promising task. The goal of the study was to assess the effectiveness of use of an antibacterial coating based on polymethylmethacrylate cement in experiment and in infected nonunions of long tubular bones of the lower limbs. Bone cement-based coatings impregnated with antibiotics were formed on titanium plates. A plate rinse was carried out; antibiotic concentrations in the rinsed solutions were estimated

by a serial broth microdilution method. The antibacterial activity of control and rinsed samples against the antibiotic-sensitive and multiple-antibiotic-resistant *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* strains was estimated by a bilayer agar method. Clinical part. The study included 70 patients divided into 2 groups: osteosynthesis with antibacterial-coated interlocking nail (40 patients, main group) and osteosynthesis with an external fixation device (30 patients, control group) comparable in age, sex and disease duration. The effectiveness of the antibacterial coating was analyzed by the duration of systemic use of antibiotics and infection recurrence rate. The concentrations of meropenem and phosphomycin in the rinsed solutions obtained at one-fold and two-fold treatments were sufficient to suppress the growth of control strains. Vancomycin-containing samples possessed sufficient antibacterial activity against both methicillin-sensitive (MSSA) and methicillin-resistant (MRSA) *S. aureus* strains, double rinse of the samples eliminated their bactericidal properties. The duration of systemic antibacterial therapy in the main group was statistically significantly lower than in the control group ($U = 77.5, p < 0.001$), and in the main group the infection recurrence rate was lower than 32.5 % vs. 86.7 % ($\chi^2 = 20.39, p < 0.001$). The PMMA-based coating impregnated with phosphomycin, meropenem or vancomycin possesses sufficient and long-lasting antibacterial activity, mainly against antibiotic-sensitive strains. An adequate use of such a coating in clinical practice allows one to obtain the desired result of treatment.

Keywords: infected nonunions, interlocking nail, antibacterial coating, bone cement, antibiotic resistance

For citation: Volotovskii P. A., Tapalski D. V., Sitnik A. A., Kozlova A. I., Gerasimenko M. A. Polymethylmethacrylate-based antibacterial coating *in vitro* and *in vivo*. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 725–731 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-725-731>

Введение. При лечении инфицированных переломов и ложных суставов длинных трубчатых костей перед хирургом стоит несколько ключевых задач: контроль инфекционного процесса, восстановление мягкотканного покрова и сращение костных отломков. Подавление инфекции зависит от качества хирургической обработки очага и применения антибиотиков, действующих на микроорганизмы-возбудители.

Методы местного применения антибиотиков как средства увеличения локальной концентрации антибактериального препарата при минимальной системной токсичности основываются на новаторской работе Н. Buchholz и Н. Engelbrecht [1]. Именно они впервые сообщили, что антибиотики при смешивании с полиметилметакрилатным (ПММА) цементом после его полимеризации элюируются в окружающие ткани. В дальнейшем было описано применение местной антибактериальной терапии в виде пропитанных антибиотиком ПММА-гранул при лечении остеомиелита [2] и открытых переломов [3].

В настоящее время местное применение антибиотиков на различных носителях считается безопасным и эффективным методом, описанным в литературе. Тем не менее, имеется очень мало исследований I уровня (рандомизированные, контролируемые исследования достаточной мощности), поэтому изучение влияния покрытия имплантатов для остеосинтеза антибактериальными веществами не теряет своей актуальности – такие имплантаты одновременно позволяют стабилизировать костные отломки, заполнить так называемое мертвое пространство в очаге инфекции, а также являются источником антибактериального препарата.

Целью данного исследования стало изучение эффективности применения антибактериального покрытия на основе полиметилметакрилатного цемента в эксперименте и у пациентов с инфицированными несращениями длинных трубчатых костей нижних конечностей.

Материалы и методы исследования. В первой, экспериментальной, части исследования импрегнированный антибиотиком (ванкомицин, колистин, меропенем или фосфомицин) ПММА-цемент (Subiton Gun, Laboratorios SL S.A., Аргентина) наносили на пластины из титана марки BT-6. Дополнительно готовили титановые пластины с гентамицин-содержащим костным цементом (Subiton Gun G, Laboratorios SL S.A., Аргентина). В пересчете на 40 г порошкообразного костного цемента используемое в исследовании количество антибиотиков составляло: гентамицин – 0,5 г, ванкомицин – 2 г, колистин – 0,24 г, меропенем – 2 г, фосфомицин – 2 г.

После полимеризации титановые пластины с костным цементом разделяли на 3 группы. Образцы группы 1 не подвергались отмывкам и использовались в качестве контроля. Образцы групп 2 и 3 заливали стерильным изотоническим раствором хлорида натрия (ИХН) в объеме 100 мл и термостатировали в течение 7 суток в шейкере-инкубаторе ES-20 (BioSan, Латвия) при 100 об/мин и 35 °С. Для образцов группы 3 выполнялась повторная отмывка в новом объеме ИХН в течение 7 сут. Концентрации антибиотиков в отмывочных растворах определяли методом последовательных микроразведений в бульоне Мюллера–Хинтона по способности подавлять

видимый рост *Escherichia coli* ATCC 25922, *P. aeruginosa* ATCC 27853 и *S. aureus* ATCC 29213 с известными паспортными значениями минимальных подавляющих концентраций (МПК) указанных антибиотиков.

Оценку антибактериальной активности нанесенного на титановые пластины костного цемента (для контрольных и отмытых пластин) проводили двухслойным агаровым методом [4]. В качестве тест-культур для инокуляции чашек с пластинами использовали антибиотикочувствительные микроорганизмы из коллекции ATCC (*P. aeruginosa* ATCC 27853 и *S. aureus* ATCC 29213). Дополнительно в исследование включены антибиотикорезистентные штаммы микроорганизмов, выделенные от пациентов с посттравматическим остеомиелитом: *P. aeruginosa* БП-150 (устойчивость к большинству антибиотиков, за исключением полимиксинов, продуцент металло- β -лактамазы VIM) и *S. aureus* 43431 (метициллинрезистентный – MRSA, устойчивость к оксациллину, гентамицину, ципрофлоксацину, левофлоксацину, тетрациклину, рифампицину).

Чашки инокулировали бактериальными суспензиями (0,5 МакФарланд) с помощью хлопковых тампонов и инкубировали 18 ч при 35 °С. Оценивали наличие и характер роста микроорганизмов на поверхности Мюллер–Хинтон агара в области проекции пластин с покрытиями различного состава.

Во вторую, клиническую, часть исследования были включены 70 пациентов с переломами и ложными суставами бедренной или большеберцовой костей, осложненными остеомиелитом, которые получали лечение в РНПЦ травматологии и ортопедии с 2009 по 2017 г. Пациенты были разделены на 2 группы: 1 группа (основная) – 40 пациентов, которым проводили радикальную хирургическую обработку и фиксацию интрамедуллярным стержнем с блокированием и антибактериальным покрытием из полиметилметакрилатного костного цемента. Покрытие стержня готовили по разработанному методу [5] в стерильных условиях операционной на отдельном столе. К костному цементу добавляли термостабильный антибиотик. 2 группа (контрольная) – 30 пациентов, при лечении которых применялась внешняя фиксация по Илизарову. Группы были сопоставимы по возрасту ($U = 591$, $p = 0,92$), полу ($\chi^2 = 1,29$, $p = 0,26$) и продолжительности заболевания ($U = 523$, $p = 0,49$). По типу переломов при первичной травме группы также не различались ($\chi^2 = 1,38$, $p = 0,24$). Патологический процесс у всех пациентов можно было характеризовать как остеомиелит IV степени по классификации Cierny–Mader [6], т. е. диффузный остеомиелит с поражением всего поперечника кости.

Эффективность антибактериального покрытия анализировали по таким показателям, как продолжительность системного применения антибактериальных препаратов и наличие рецидивов инфекции. Всем пациентам антибактериальная терапия назначалась с учетом результатов микробиологического исследования интраоперационных образцов. В ходе оперативного вмешательства из раны брали 2–3 образца мягких тканей и помещали во флаконы с двухфазной средой (HiMedia Laboratories Pvt Ltd), которые затем направляли в микробиологическую лабораторию для выявления микроорганизма-возбудителя и определения чувствительности к антибактериальным препаратам.

Оценка рентгенологических и функциональных результатов не входила в план данного анализа. Для оценки причинно-следственных связей и значимости различий использованы непараметрические статистические методы (Mann–Whitney тест, тест хи-квадрат). Распределение численных величин было отличным от нормального, поэтому средние величины представлены как медиана с 25 % и 75 % квантилями. Статистический анализ выполнен с применением программного пакета Statistica 7.0.

Результаты и их обсуждения. *Экспериментальная часть.* Результаты определения концентраций антибиотиков в отмывочных растворах представлены в табл. 1. В качестве индикаторных микроорганизмов были выбраны антибиотикочувствительные штаммы ATCC с наименьшими значениями МПК, тем не менее, в ряде случаев создаваемые концентрации антибиотиков не позволяли ингибировать видимый рост тест-культур, что стало ограничением метода. Так, после второй отмывки образцов костного цемента с гентамицином и ванкомицином создаваемых в отмывочном растворе концентраций было недостаточно для подавления роста тест-культур.

Т а б л и ц а 1. Концентрации антибиотиков в отмывочных растворах

T a b l e 1. Antibiotic concentrations in the rinsed solutions

Антибиотик Antibiotic	Индикаторный микроорганизм для определения концентрации антибиотика Indicator microorganism for determination of antibiotic concentration	МПК антибиотика для индикаторного микроорганизма, мкг/мл Minimum overwhelming concentration for indicator microorganism, mkg/ml	Концентрация антибиотика, мкг/мл Antibiotic concentration, mkg/ml	
			7 суток 7 days	14 суток 14 days
Гентамицин	<i>E. coli</i> ATCC 25922	0,5	4	<1
Меропенем	<i>E. coli</i> ATCC 25922	0,016–0,03	16	2
Колистин	<i>E. coli</i> ATCC 25922	0,5–1	<1	<1
Фосфомицин	<i>P. aeruginosa</i> ATCC 27853	4	16	8
Ванкомицин	<i>S. aureus</i> ATCC 29213	1	8	<2

Создаваемых в отмывочных растворах концентраций колистина (<1 мкг/мл) было недостаточно для подавления роста *E. coli* ATCC 25922, что может быть связано главным образом с небольшим по сравнению с другими антибиотиками его количеством, которое вносится в костный цемент (0,24 г на 40 г цемента). Наиболее обнадеживающие данные получены для меропенема и фосфомицина, концентрация которых в обоих отмывочных растворах (полученных через 7 и 14 сут. от начала элюции) значительно превышала МПК для антибиотикочувствительных штаммов.

Результаты определения концентраций антибиотиков в отмывочных растворах согласуются с результатами определения антибактериальной активности контрольных и отмытых образцов. Для контрольных образцов, не подвергавшихся отмывке, в большинстве случаев выявлена антибактериальная активность, проявляющаяся отсутствием роста микроорганизмов на питательной среде, как в проекции пластин с покрытием, так и на различном удалении от них. При этом размеры зон подавления роста вокруг пластин коррелировали со значениями МПК антибиотиков исследуемых штаммов (данные не представлены). Исключением явился костный цемент с добавлением гентамицина, который обладал антибактериальной активностью только в отношении *P. aeruginosa* ATCC 27853 (МПК гентамицина 1 мкг/мл) и не подавлял рост экстремально-антибиотикорезистентного клинического изолята *P. aeruginosa* БП-150 (МПК гентамицина >64 мкг/мл).

Однократная отмывка образцов с колистином полностью устраняла их антибактериальную активность, что соответствует литературным данным [7]. Включенные в исследование штаммы *S. aureus* ATCC 29213 (MSSA) и *S. aureus* 43431 (MRSA) не обладали устойчивостью к гликопептидам (МПК ванкомицина соответственно 1,0 и 0,5 мкг/мл) и демонстрировали сходные результаты при тестировании образцов импрегнированного ванкомицином костного цемента. После однократной 7-дневной отмывки антибактериальная активность ванкомицин-содержащих образцов в отношении *S. aureus* сохранялась, но при этом значительно сокращались размеры зон подавления роста вокруг пластин по сравнению с контрольными образцами. Повторная 7-дневная отмывка полностью устраняла антибактериальную активность.

Клиническая часть. Результаты микробиологического исследования интраоперационных образцов тканей, полученных в рамках клинической части, представлены в табл. 2. Следует отметить, что в основной группе наблюдалось больше пациентов с инфекциями, вызванными грам-отрицательными бактериями, а в группе контроля у большего процента пациентов были высеяны штаммы метициллин-резистентного золотистого стафилококка. Полученные нами данные согласуются с последними сообщениями из литературы [8], которые указывают на все большую распространенность оксациллин-резистентных форм грам-положительных кокков.

Во всех 40 случаях для приготовления антибактериального покрытия использовали ПММА-цемент с фабричным добавлением гентамицина, к которому дополнительно добавляли термостабильный антибиотик (табл. 3). В большинстве случаев использовали ванкомицин.

Продолжительность системной антибактериальной терапии после операции у пациентов основной группы составила 6,0 [6,0; 8,0] недель. Пациенты контрольной группы получали антибиотики на протяжении 16 [12,0; 20,0] недель. Различия были статистически значимы ($U = 77,5$, $p < 0,001$) (рисунки).

Т а б л и ц а 2. Возбудители инфекции у пациентов в группах исследования по данным посевов интраоперационных образцов

T a b l e 2. Infectious agents in the study groups according to the cultures of intraoperative samples

Возбудитель инфекции Infectious agent	Основная группа (n = 40), n (%) Main group (n = 40), n (%)	Контрольная группа (n = 30), n (%) Control group (n = 30), n (%)
<i>Staphylococcus aureus</i> в т. ч. MRSA	17 (42,5) 3 (7,5)	16 (53,3) 7 (23,3)
<i>Staphylococcus epidermidis</i> в т. ч. MRSE	8 (20,0) 2 (5)	2 (6,66) 1 (3,33)
<i>Staphylococcus hominis</i>	1 (2,5)	–
<i>Kocuria kristinae</i>	–	1 (3,33)
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	2 (5)	–
<i>Enterobacter cloacae</i>	1 (2,5)	–
<i>Escherichia coli</i>	1 (2,5)	–
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	–	1 (3,33)
<i>Acinetobacter baumannii</i>	–	1 (3,33)
Полимикробная флора	3 (7,5)	2 (6,66)
Нет данных/нет роста	7 (17,5)	6 (20)

Т а б л и ц а 3. Антибактериальные препараты, использованные при приготовлении ПММА-покрытия стержней

T a b l e 3. Antibiotics used for preparation of PMMA-coated nails

Антибиотик Antibiotic	Количество случаев Number of cases
Ванкомицин	23
Цефалоспорины	6
Даптомицин	4
Меропенем	3

Более низкие показатели в основной группе можно связать с тем, что частота рецидивов инфекции после остеосинтеза стержнем с антибактериальным покрытием (13 случаев, или 32,5 %) была значительно ниже ($\chi^2 = 20,39$, $p < 0,001$), чем при лечении в аппарате (26 случаев, или 86,7 %). Столь большой процент инфекционных осложнений в контрольной группе, безусловно, связан с недостаточным уходом за аппаратом внешней фиксации, что нередко наблюдается при лечении пациентов из отдаленных районов [9], не имеющих непосредственного доступа к специализированной травматолого-ортопедической помощи. Кроме того, большой процент рецидивов в контрольной группе может быть связан с более консервативной хирургической обработкой, которая в большинстве случаев сводилась к секвестрэктомии. Так, А. Н. Simpson и соавт. [10] в проспективном исследовании изучали влияние объема хирургической обработки на частоту успешного лечения и обнаружили, что при широкой резекции успех наблюдается в 100 % случаев, а при экономной некрэктомии с биопсией очага в 100 % случаев наступает рецидив. При краевой резекции менее чем 5 мм рецидивы наблюдались в 28 % случаев, причем у всех пациентов былиотягощающие местные или системные факторы (тип В по Cierny–Mader).

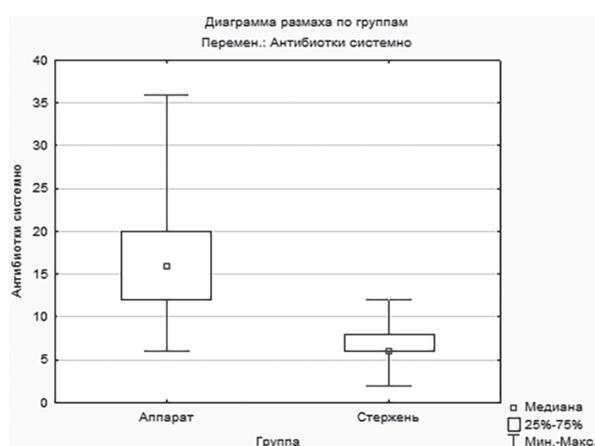


Диаграмма размаха продолжительности системной антибактериальной терапии в основной («Стержень») и контрольной («Аппарат») группах

Box plot showing the duration of systemic antibiotic therapy in the study (right side) and control (left side) groups

Box plot showing the duration of systemic antibiotic therapy in the study (right side) and control (left side) groups

Заклучение. Покрытия из костного цемента, импрегнированного фосфомицином или меропенемом, обладали наиболее выраженной и длительной антибактериальной активностью, которая проявлялась главным образом в отношении антибиотикочувствительных штаммов. Результаты клинической оценки указывают на то, что применение стержней с антибактериальным покрытием хорошо переносилось пациентами. В основной группе продолжительность системной антибактериальной терапии была статистически значимо меньше как и частота рецидивов инфекции. Тем не менее, объем хирургической обработки, несомненно, оказал влияние на полученные результаты.

Список использованных источников

1. Buchholz, H. W. Depot effects of various antibiotics mixed with Palacos resins / H. W. Buchholz, H. Engelbrecht // *Chirurg.* – 1970. – Vol. 41. – P. 511–515.
2. Klemm, K. W. Antibiotic bead chains / K. W. Klemm // *Clin. Orthop.* – 1993. – Vol. 295. – P. 63–76. <https://doi.org/10.1097/00003086-199310000-00011>
3. Henry, S. L. The prophylactic use of antibiotic impregnated beads in open fractures / S. L. Henry, P. A. Ostermann, D. Seligson // *J. Trauma.* – 1990. – Vol. 30, N 10. – P. 1231–1238. <https://doi.org/10.1097/00005373-199010000-00007>
4. Nanocomposite coatings for implants protection from microbial colonization: formation features, structure, and properties / C. Qi [et al.] // *Surf. Coat. Tech.* – 2017. – Vol. 315. – P. 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.02.066>
5. Волоотовский, П. А. Применение стержней с блокированием и антибактериальным покрытием для лечения инфицированных несращений костей голени / П. А. Волоотовский, А. А. Ситник, А. В. Белецкий // *Мед. журн.* – 2017. – № 4. – С. 38–42.
6. Cierny, G. The classic: a clinical staging system for adult osteomyelitis / G. Cierny, J. T. Mader, J. J. Penninck // *Clin. Orthop.* – 2003. – Vol. 414. – P. 7–24. <https://doi.org/10.1097/01.blo.0000088564.81746.62>
7. Drug elution from high-dose antibiotic-loaded acrylic cement: a comparative, *in vitro* study / G. Gasparini [et al.] // *Orthopedics.* – 2014. – Vol. 37, N 11. – P. e999–e1005. <https://doi.org/10.3928/01477447-20141023-57>
8. Jerzy, K. Chronic Osteomyelitis-Bacterial Flora, Antibiotic Sensitivity and Treatment Challenges / K. Jerzy, H. Francis // *Open Orthopaedics J.* – 2018. – Vol. 12, N 1. – P. 153–163. <https://doi.org/10.2174/1874325001812010153>
9. Paley, D. Problems, obstacles, and complications of limb lengthening by the Ilizarov technique / D. Paley // *Clin. Orthop. Relat. Res.* – 1990. – Vol. 250. – P. 81–104. <https://doi.org/10.1097/00003086-199001000-00011>
10. Simpson, A. H. The effect of the extent of surgical resection on infectionfree survival / A. H. Simpson, M. Deakin, J. M. Lathan // *J. Bone Joint Surg. Br.* – 2001. – Vol. 83-B, N 3. – P. 403–407. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.83b3.0830403>

References

1. Buchholz H. W., Engelbrecht H. Depot effects of various antibiotics mixed with Palacos resins. *Chirurg*, 1970, vol. 41, pp. 511–515.
2. Klemm K. W. Antibiotic bead chains. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 1993, vol. 295, pp. 63–76. <https://doi.org/10.1097/00003086-199310000-00011>
3. Henry S. L., Ostermann P. A., Seligson D. The prophylactic use of antibiotic impregnated beads in open fractures. *Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care*, 1990, vol. 30, no. 10, pp. 1231–1238. <https://doi.org/10.1097/00005373-199010000-00007>
4. Qi C., Rogachev A. V., Tapal'skii D. V., Yarmolenko M. A., Rogachev A. A., Jiang X., Koshanskaya E. V., Vorontsov A. S. Nanocomposite coatings for implants protection from microbial colonization: formation features, structure, and properties. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 315, pp. 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.02.066>
5. Volotovskii P. A., Sitnik A. A., Beletskiy A. V. Locked antibiotic-eluting nailing in patients with infected tibial non-unions. *Meditsinskii zhurnal [Medical Journal]*, 2017, no. 4, pp. 38–42 (in Russian).
6. Cierny G., Mader J. T., Penninck J. J. The classic: a clinical staging system for adult osteomyelitis. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 2003, vol. 414, pp. 7–24. <https://doi.org/10.1097/01.blo.0000088564.81746.62>
7. Gasparini G., De Gori M., Calonego G., Della Bora T., Caroleo B., Galasso O. Drug elution from high-dose antibiotic-loaded acrylic cement: a comparative, *in vitro* study. *Orthopedics*, 2014, vol. 37, no. 11, pp. e999–e1005. <https://doi.org/10.3928/01477447-20141023-57>
8. Jerzy K., Francis H. Chronic Osteomyelitis-Bacterial Flora, Antibiotic Sensitivity and Treatment Challenges. *Open Orthopaedics Journal*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 153–163. <https://doi.org/10.2174/1874325001812010153>
9. Paley D. Problems, obstacles, and complications of limb lengthening by the Ilizarov technique. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 1990, vol. 250, pp. 81–104. <https://doi.org/10.1097/00003086-199001000-00011>
10. Simpson A. H., Deakin M., Lathan J. M. The effect of the extent of surgical resection on infectionfree survival. *Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*, 2001, vol. 83-B, no. 3, pp. 403–407. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.83b3.0830403>

Информация об авторах

Волотовский Павел Алексеевич – науч. сотрудник. Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии (ул. Лейтенанта Кижеватова, 60/4, 220024, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volotovskii@gmail.com.

Топальский Дмитрий Викторович – канд. мед. наук, доцент, заведующий кафедрой. Гомельский государственный медицинский университет (ул. Ланге, 5, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: tapalskiy@yandex.by.

Ситник Александр Александрович – канд. мед. наук, доцент, заведующий лабораторией. Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии (ул. Лейтенанта Кижеватова, 60/4, 220024, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexandre_sitnik@yahoo.com.

Козлова Анна Игоревна – ст. преподаватель. Гомельский государственный медицинский университет (ул. Ланге, 5, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: annika.kozlova2014@yandex.ru.

Герасименко Михаил Александрович – д-р мед. наук, профессор, директор. Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии (ул. Лейтенанта Кижеватова, 60/4, 220024, Минск, Республика Беларусь). E-mail: niito@tut.by.

Information about the authors

Volotovskii Pavel Alexeyevich – Researcher. Republican Scientific and Practical Centre for Traumatology and Orthopedics (60/4, Lieutenant Kizhevaton Str., 220024, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volotovskii@gmail.com.

Tapalskiy Dmitry Viktorovich – Ph. D. (Medicine), Associate professor, Head of the Department. Gomel State Medical University (5, Lange Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: tapalskiy@yandex.by.

Sitnik Alexander Aleksandrovich – Ph. D. (Medicine), Associate professor, Head of the Laboratory. Republican Scientific and Practical Centre for Traumatology and Orthopedics (60/4, Lieutenant Kizhevaton Str., 220024, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexandre_sitnik@yahoo.com.

Kozlova Anna Igorevna – Senior lecturer. Gomel State Medical University (5, Lange Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: annika.kozlova2014@yandex.ru.

Gerasimenko Mikhail Aleksandrovich – D. Sc. (Medicine), Professor, Director. Republican Scientific and Practical Centre for Traumatology and Orthopedics (60/4, Lieutenant Kizhevaton Str., 220024, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: niito@tut.by.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 616.727.2-001-089

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-732-738>

Поступило в редакцию 01.08.2018

Received 01.08.2018

**О. А. Даниленко¹, Е. Р. Макаревич², член-корреспондент Н. С. Сердюченко³,
А. В. Малашко⁴**

¹*Минская городская клиническая больница № 6, Минск, Республика Беларусь*

²*Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь*

³*Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

⁴*Могилевская областная больница, Могилев, Республика Беларусь*

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ РОТАТОРНО-БИЦЕПИТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ОПЕРАТИВНОМ ЛЕЧЕНИИ ПЕРЕЛОМОВ ПРОКСИМАЛЬНОГО ОТДЕЛА ПЛЕЧА

Аннотация. Улучшение результатов оперативного лечения пациентов с переломами проксимального отдела плеча, пролеченных с применением подходов, включающих в себя репозицию костных отломков с адекватным остеосинтезом и профилактикой импинджмент синдрома, реконструкцию всех повреждённых структур ротаторно-бицепитального комплекса являлось целью работы. Произведена балльная оценка результатов лечения 512 пациентов в возрасте от 18 до 87 лет, оперированных за период с 2004 по 2018 г., при лечении которых использовались разработанные авторами тактические подходы и способы оперативного лечения, направленные на восстановление ротаторного и бицепитального элемента. Применение разработанных тактических подходов и способов позволило достичь благоприятного исхода лечения у 503 (98,2 %) пациентов. Таким образом, реконструкция повреждений ротаторно-бицепитального комплекса является перспективным путем улучшения результатов лечения у пациентов с переломами проксимального отдела плеча.

Ключевые слова: переломы плеча, повреждения вращательной манжеты, повреждения бицепса, ротаторно-бицепитальный комплекс

Для цитирования: Реконструкция повреждений ротаторно-бицепитального комплекса при оперативном лечении переломов проксимального отдела плеча / О. А. Даниленко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 732–738. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-732-738>

**Oleg A. Danilenko¹, Evgenii R. Makarevich², Corresponding Member Nikolai S. Serdyuchenko³,
Anton V. Malashko⁴**

¹*Minsk City Clinical Hospital no. 6, Minsk, Republic of Belarus*

²*Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus*

³*National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

⁴*Mogilev Regional Hospital, Mogilev, Republic of Belarus*

RECONSTRUCTION OF DAMAGES OF THE ROTARY-BICIPITALE COMPLEX AT SURGICAL TREATMENT OF FRACTURES OF THE PROXIMAL SHOULDER

Abstract. The aim of the work was to improve the results of surgical treatment of patients having fractures of the proximal shoulder with the use of the approaches, including the reposition of bone fragments with adequate osteosynthesis and prevention of impingement syndrome, the reconstruction of all damaged structures of the rotator-bicipitale complex. A score assessment of the treatment results of 512 patients aged from 18 to 87 years old was performed, operated from 2004 to 2018 for the treatment of which the tactical approaches and the methods of surgical treatment developed by the authors aimed at restoring the rotator and bicipital elements were used. The use of the developed tactical approaches and methods made it possible to achieve a favorable outcome of treatment in 503 (98.2 %) patients. Thus, the reconstruction of injuries of the rotatory-bicipital complex is a promising way to improve the results of treatment in patients with fractures of the proximal shoulder.

Keywords: fractures of the shoulder, damage to the rotational cuff, damage to the biceps, rotatory-bicipitale complex

For citation: Danilenko O. A., Makarevich E. R., Serdyuchenko N. S., Malashko A. V. Reconstruction of damages of the rotary-bicipitale complex at surgical treatment of fractures of the proximal shoulder. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 732–738 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-732-738>

Введение. Актуальность темы лечения определяется частотой травм проксимального отдела плеча, на которые приходится до 80 % всех костных повреждений пояса верхней конечности [1–3]. Отдельные исследования указывают на хорошие клинические результаты при использовании консервативных подходов к лечению данной группы пациентов [4; 5], в других указывается на безуспешность и недостатки данного варианта лечения, при этом их доля достигает 16 % [3; 6; 7]. Это служит посылком к применению различных методик оперативного лечения с целью улучшения функциональных исходов, но не всегда даже их выполнение с использованием современных имплантов позволяет восстановить нарушенную функцию конечности. Наличие отрицательных результатов после оперативного лечения переломов проксимального отдела плечевой кости, а также осложнения во время хирургического вмешательства заставляют анализировать их причины и разрабатывать новые подходы к лечению данной патологии [3; 8–10]. Большинство исследователей сходятся во мнении, что в основе неблагоприятных исходов лежит недостаточно точная репозиция костных отломков, недооценка мягкотканых повреждений, остеосинтез без профилактики импинджмента [3; 8; 9]. Данные трудности обусловлены отсутствием в литературных источниках четких ориентиров при оценке репозиции костных отломков, не проведением интраоперационного контроля импинджмент синдрома, неполноценной реконструкцией повреждений динамических стабилизаторов плечевого сустава [3; 9; 10].

Цель исследования – улучшение результатов оперативного лечения пациентов с переломами проксимального отдела плеча, пролеченных с применением подходов, подразумевающих реконструкцию поврежденных элементов ротаторно-бицепитального комплекса (РБК).

Материалы и методы исследования. Материалом работы является оценка результатов лечения 512 пациентов в возрасте от 18 до 87 лет, оперированных за период с 2004 по 2018 г. Исследование производилось сплошным методом. Большинство составили мужчины – 395 (77,1 %), женщины – 117 (22,9 %). Повреждение правой конечности встречались чаще – 325 (63,5 %). Средний возраст пациентов составил $46,9 \pm 11,5$ [M \pm SD] лет. Для предоперационной диагностики использовали рентгенологическое исследование в стандартных двух проекциях у всех 512 (100 %) пациентов, РКТ – у 253 (49,4 %), МРТ – у 84 (16,4 %). Срок наблюдения составил $34,2 \pm 14,8$ [M \pm SE] месяцев.

При планировании оперативных вмешательств выполняли РКТ исследование для уточнения степени и характера смещения костных отломков. При оперативном лечении выполнялась открытая репозиция костных отломков, накостный металлоостеосинтез перелома, ревизия и при необходимости реконструкция элементов ротаторно-бицепитального комплекса, с использованием следующих принципов:

- точная репозиция перелома с ориентацией на реконструкцию бицепитальной борозды;
- репозиция перелома при дефиците костного вещества должна производиться с восстановлением офсета и окружности головки;
- репозиция отломков и качество накостного остеосинтеза обязательно интраоперационно контролировалось рентгенологически;
- ревизия и при необходимости восстановление поврежденных элементов РБК;
- при наличии импинджмента между металлоконструкцией и акромионом, а также невозможности сместить ее из зоны конфликта выполнялась декомпрессия субакромиального пространства по разработанному способу (патент Республики Беларусь № 9733);
- выявляемая нестабильность сухожилия длинной головки бицепса (ДГБ), обусловленная нарушением костной анатомии борозды, подразумевала репозицию большого и малого бугорка до создания условий для свободных движений сухожилия без тенденции к вывиху;
- повреждение мягкотканых элементов удерживающего аппарата сухожилия ДГБ в случае невозможности осуществления его шва подразумевало пластику по разработанному способу (Евразийский патент № 201600049 (13) A1);
- при наличии разрыва подлопаточной мышцы и коротких наружных ротаторов использовали способ трансоссальной фиксации по аналогии с предложенным и запатентованным способом для лечения нестабильности плечевого сустава;

в ситуации, когда отмечали дефицит костного вещества проксимального отдела плечевой кости при наличии показаний к декомпрессии подакромиального пространства, использовали способ, предложенный нами при лечении нестабильности плечевого сустава с пластикой области дефекта за счет резецированного передненижнего края акромиона (патент Республики Беларусь № 11448), ориентируясь при этом на восстановление офсета головки плечевой кости аналогично здоровой конечности, что определяло восстановление тонуса и баланса элементов РБК;

при наличии заднего переломовывиха головки плечевой кости применяли способ, подразумевающий латеральное перемещение и фиксацию к передне-нижней полуокружности большого бугорка сухожилий надостной, подостной и малой круглой мышц, а также рефиксации в положении натяжения сухожилия подлопаточной мышцы к передне-нижней полуокружности анатомической шейки и зоне малого бугорка плеча (патент Республики Беларусь № 9763);

при несвежих задних переломовывихах плеча с наличием импрессии 2 и более типа по Rowe и выраженном частичном повреждении ротаторного элемента РБК использовали способ, подразумевающий фиксацию перелома, аналогично способу, предложенному нами при лечении задних вывихов плеча (патент Республики Беларусь № 11404);

при оскольчатых переломах головки плечевой кости использовали способ ее сшивания и одновременной репарации ротаторного элемента РБК, подразумевающий трансоссальную фиксацию в натянутом положении сухожилия подлопаточной мышцы и одновременный ремплиссаж коротких наружных ротаторов при помощи спицы с ушком в положении натяжения (патент Республики Беларусь № 20571);

при выявлении интраоперационно признаков выраженной дегенерации и/или выраженного повреждения сухожилия длинной головки бицепса применяли способ оперативного лечения, предложенный для нестабильности сухожилия длинной головки бицепса 5 типа по классификации Bennet, подразумевающий его прошивание трансоссальным швом в сухожильной борозде, при этом поверх сшивали поперечную связку (патент Республики Беларусь № 21257).

Нами использовался разработанный подход, подразумевающий дифференцированную иммобилизацию конечности в зависимости от наиболее заинтересованного сектора по классификации Habermeyer. При повреждениях 1-го сектора ротаторно-бицепсального комплекса иммобилизация верхней конечности проводилась в положении внутренней ротации с фиксацией гипсовой повязкой типа Дезо. При заинтересованности со стороны 2 сектора – конечность фиксировалась гипсовой повязкой в положении передней девиации и отведения 60 градусов. При поражении 3 сектора иммобилизовали лонгетой от здорового надплечья в нейтральном положении конечности с отведением порядка 15 градусов. При наличии повреждения со стороны нескольких секторов вид иммобилизации определялся наиболее травмированным сектором.

Курс восстановительного лечения включал в себя щадящее ЛФК, физиотерапевтическое лечение (криотерапия, лазеротерапия, ультрафонофорез НПВС, электростимуляцию дельтовидной мышцы), медикаментозную терапию (НПВС, периферические миорелаксанты, препараты коррекции Ca^{++} -обмена и т. д.). Наш опыт показал эффективность введения препаратов гиалуроновой кислоты в подакромиальное пространство при наличии выраженного болевого синдрома при проведении занятий лечебной физкультурой.

В срок 4 и 8 недель с момента травмы производили осмотр, направленный на диагностику повреждений РБК, согласно разработанной нами инструкции по диагностике травматических повреждений Министерства здравоохранения Республики Беларусь № 007-0118. При выявлении повреждений руководствовались принципами лечебной тактики, предложенными нами для репарации пострадавших отделов РБК, используя комбинацию способов, обеспечивающих восстановление ротаторного и бицепсального элементов.

Оценка результатов лечения проводилась в следующие сроки: 3, 6 месяцев и далее фиксировали в баллах оценку на момент последнего констатированного обращения пациента на прием. Срок окончательной оценки наблюдений составил $34,2 \pm 14,8$ [M \pm SD] месяцев. Оценка результатов производилась с использованием Оксфордского опросника для плеча (ООП) до и после лечения. Данные исследования подвергнуты статистической обработке с использованием программ Microsoft Office Excel 2016 (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA) и программного обеспе-

чения StatSoft Statistica 12 для Windows (Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA). В описании качественных переменных использовались абсолютные числа и проценты. Применялись общепринятые методы медико-биологической статистики. Для проверки соответствия распределения количественных параметров закону Гаусса использовался расчет критериев Колмогорова–Смирнова, а также оценка параметров описательной статистики. При соответствии распределения значений параметра закону Гаусса данные были представлены в виде $M \pm SE$, где M – среднее арифметическое значения параметра, а SE – стандартная ошибка. При несоответствии распределения значений параметра закону нормального распределения данные в таблицах представляли в виде $Me [Q_{25}–Q_{75}]$, где Me – медиана, Q_{25} – значение 25 перцентиля, Q_{75} – значение 75 перцентиля. Сравнительный анализ результатов до и после лечения производился с использованием критерия Вилкоксона.

Результаты и их обсуждение. Лечение пациентов группы требовало от врача значительного внимания к оценке нарушенной функции и своевременности принятия решения о необходимости проведения вмешательства по реконструкции поврежденных элементов РБК. Тактика лечения пациентов с переломами проксимального отдела плеча с удовлетворительным состоянием костных отломков и наличием клиничко-рентгенологических признаков повреждения ротаторно-бицепитального комплекса плечевого сустава подразумевала двухэтапность. Оперировали в сроках свыше 4 недель, дожидаясь устойчивой фиксации перелома путем иммобилизации в положении, обеспечивающем необходимую репозицию перелома. После истечения периода иммобилизации мы использовали методики, приведенные нами для реконструкции ротаторно-бицепитального комплекса. Во всех случаях использован способ накостного остеосинтеза с применением пластин LCP. Реконструкция мягкотканых повреждений выполнена с использованием разработанных способов (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Примененные способы оперативной реконструкции повреждений ротаторного элемента РБК у пациентов с переломами проксимального отдела плеча, абс. (%)

Table 1. Methods used for operative reconstruction of damage to the RBC rotator element in patients with proximal shoulder fractures, abs. (%)

Наименование способа реконструкции повреждений Name of the procedure of reconstructing damages	Количество оперированных пациентов с применением способа Number of operated patients with the use of the reconstruction procedure	Показания к применению способа Indications for use of the reconstruction procedure
Шов и реинсерция ротаторного элемента РБК	171 (33,4)	Возможность реконструкции повреждения путем ушивания разрыва после его мобилизации
Патент Республики Беларусь № 20959	148 (28,9)	Повреждение ротаторного элемента в секторе 1 при выраженном снижении тонуса сухожилия подлопаточной мышцы
Патент Республики Беларусь № 9763	14 (2,7)	Повреждение ротаторного элемента в секторе 3 при выраженном снижении тонуса сухожилия подостной и малой круглой мышц
Патент Республики Беларусь № 20571	56 (10,9)	Повреждение ротаторного элемента в секторе 1 и 3 при выраженном снижении тонуса сухожилия подлопаточной, подостной и малой круглой мышц
Патент Республики Беларусь № 9732	123 (24,0)	Повреждение ротаторного элемента в секторе 2 при выраженном снижении тонуса сухожилия надостной и подостной мышцы и необходимости дополнительной декомпрессии подакромиального пространства у лиц со сниженной плотностью костной ткани.

Реконструкция бицепитального элемента РБК потребовалась у 127 (24,8 %) пациентов (табл. 2).

При контрольных осмотрах у абсолютного большинства пациентов 1 подгруппы достигнуто улучшение субъективного самочувствия и восстановление стабильности и нормальной амплитуды движений в суставе (табл. 3).

Анализ качественного формата описания результата лечения указал нам на достижение благоприятного исхода лечения у 503 (98,2 %) пациентов.

Т а б л и ц а 2. Примененные способы оперативной реконструкции повреждений бицепитального элемента РБК у пациентов с переломами проксимального отдела плеча, абс. (%)

Table 2. Applied methods of surgical reconstruction of injuries of the RBC bicipital element in patients with proximal shoulder fractures, abs. (%)

Наименование способа реконструкции повреждений Name of the procedure of reconstructing damages	Количество оперированных пациентов с применением способа Number of operated patients with the use of the reconstruction procedure	Показания к применению способа Indications for use of the reconstruction procedure
Евразийский патент № 201600049 А1	56 (44,1)	Выраженное повреждение удерживателя бицепса при невозможности осуществления его шва
Патент Республики Беларусь № 21257	35 (27,6)	При выявлении интраоперационно признаков выраженной дегенерации и/или выраженного повреждения сухожилия длинной головки бицепса, не позволяющего его ушить, применяли способ оперативного лечения, предложенный для нестабильности сухожилия длинной головки бицепса 5 типа по классификации Bennet
Тенodes СДГБ к проксимальному отделу плечевой кости	14 (11,0)	Выраженные дегенеративные изменения бицепитального элемента на протяжении сухожилия в 1 секторе
Тенodes СДГБ к клювовидному отростку лопатки	22 (17,3)	Деформация бицепитального элемента во 2 секторе по типу песочных часов (hourglass)

Т а б л и ц а 3. Клиническая оценка результата лечения пациентов группы с переломами проксимального отдела плеча по шкале ООП, абс.

Table 3. Clinical assessment of the outcome of the treatment of patients in the group with fractures of the proximal shoulder on the scale of the OSS, abs.

Оценка Assessment	Шкала ООП OSS scale	
	%	абс.
Отлично	58,9	302
Хорошо	35,4	181
Удовлетворительно	3,9	20
Неудовлетворительно	1,8	9

Наблюдаемое различие в результатах балльной оценки пациентов подгруппы до и после примененных методов, оцененное с использованием критерия Вилкоксона, было статистически значимым (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Динамика показателей балльной оценки результатов лечения пациентов группы с переломами проксимального отдела плеча по шкале ООП

Table 4. Dynamics of indices of the ball-based assessment of the results of treatment of patients in the group with fractures of the proximal shoulder on the OSS

Оценка в баллах до оперативного лечения, Ме [Q ₂₅ –Q ₇₅] Score assessment before surgical treatment, Me [Q ₂₅ –Q ₇₅]	Оценка в баллах после оперативного лечения, Ме [Q ₂₅ –Q ₇₅] Scores assessment before surgical treatment, Me [Q ₂₅ –Q ₇₅]	Уровень значимости по критерию Вилкоксона Significance level by Wilcoxon's criterion
56 [46–58]	14 [12–28]	$T = 0,00, p < 0,00$

При анализе неудовлетворительных исходов лечения в 5 (0,98 %) случаях неблагоприятный исход был обусловлен аваскулярным некрозом головки плечевой кости при тяжелых многооскольчатых внутрисуставных переломах (11-С3.1 по классификации АО), в 4 (0,78 %) случаях – несращение перелома после первичного синтеза (в дальнейшем выполненное оперативное вмешательство позволило достичь благоприятного результата).

Выводы

1. В приведенных наблюдениях выполнение остеосинтеза потребовало реконструкции повреждений ротаторного элемента у всех пациентов и в 127 (24,8 %) случаях восстановления бицепитального элемента.

2. Применение разработанных тактических подходов и способов позволило достичь благоприятного исхода лечения у 503 (98,2 %) пациентов.

3. Реконструкция повреждений ротаторно-бицепитального комплекса является перспективным путем улучшения результатов лечения у пациентов с переломами проксимального отдела плеча.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Список использованных источников

1. Proximal humeral fractures. Management techniques and expected results / R. Szyszkowrtz [et al.] // *Clin. Orthop.* – 1993. – Vol. 292. – P. 13–25. <https://doi.org/10.1097/00003086-199307000-00005>
2. Surgical treatment of sequelae of fractures of the proximal third of the humerus. The role of osteotomies / R. Russo [et al.] // *Chir. Organi. Mov.* – 2005. – Vol. 90, N 2. – P. 159–169.
3. Flatow, E. L. Complex and Revision Problems in Shoulder Surgery / E. L. Flatow, J. J. P. Warner, J. P. Iannotti. – Lippincott Williams Wilkins, 2005. – 608 p.
4. Neer, C. S. Recent experience in total shoulder replacement / C. S. Neer, K. C. Watson, F. J. Stanton // *J. Bone Joint Surg.* – 1982. – Vol. 64, N 3. – P. 319–337. <https://doi.org/10.2106/00004623-198264030-00001>
5. Aspects of *in vitro* fatigue in human cortical bone: time and cycle dependent crack growth / R. K. Nalla [et al.] // *Biomaterials.* – 2005. – Vol. 26, N 14. – P. 2183–2195. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.05.024>
6. Mid term results of PlantTan plate in the treatment of proximal humerus fractures / B. Machani [et al.] // *Injury.* – 2006. – Vol. 37, N 3. – P. 269–276. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2005.10.003>
7. Martin, C. Treatment of 2- and 3-part fractures of the proximal humerus using external fixation: a retrospective evaluation of 62 patients / C. Martin, M. Guillen, G. Lopez // *Acta Orthop.* – 2006. – Vol. 77, N 2. – P. 275–278. <https://doi.org/10.1080/17453670610046028>
8. Zyto, K. Shoulder function after displaced fractures of the proximal humerus / K. Zyto, M. Kronberg, L. A. Brostrom // *J. Shoulder Elbow Surg.* – 1995. – Vol. 4. – P. 331–336. [https://doi.org/10.1016/s1058-2746\(95\)80016-6](https://doi.org/10.1016/s1058-2746(95)80016-6)
9. Rockwood, C. A. Fractures in adults / C. A. Rockwood, D. P. Green. – Philadelphia: Lippincott, 2001. – Vol. 1. – P. 997–1040.
10. Hoffmeyer, P. The operative management of displaced of fractures of the proximal humerus / P. Hoffmeyer // *J. Bone Joint Surg. (Br).* – 2002. – Vol. 84, N 4. – P. 469–480. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.84b4.13394>

References

1. Szyszkowrtz R., Seggl W., Schleifer P., Cundy P. J. Proximal humeral fractures. Management techniques and expected results. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 1993, vol. 292, pp. 13–25. <https://doi.org/10.1097/00003086-199307000-00005>
2. Russo R. Surgical treatment of sequelae of fractures of the proximal third of the humerus. The role of osteotomies. *La Chirurgia degli organi di movimento*, 2005, vol. 90, no. 2, pp. 159–169.
3. Flatow E. L., Warner J. J. P., Iannotti J. P. Complex and Revision Problems in Shoulder Surgery. Lippincott Williams Wilkins, 2005. 608 p.
4. Neer C. S., Watson K. C., Stanton F. J. Recent experience in total shoulder replacement. *Journal of Bone & Joint Surgery*, 1982, vol. 64, no. 3, pp. 319–337. <https://doi.org/10.2106/00004623-198264030-00001>
5. Nalla R. K., Kruzic J. J., Kinney J. H., Ritchie R. O. Aspects of *in vitro* fatigue in human cortical bone: time and cycle dependent crack growth. *Biomaterials*, 2005, vol. 26, no. 14, pp. 2183–2195. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.05.024>
6. Machani B., Sinopidis C., Brownson P., Papadopoulos P., Gibson J., Frostick S. P. Mid term results of PlantTan plate in the treatment of proximal humerus fractures. *Injury*, 2006, vol. 37, no. 3, pp. 269–276. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2005.10.003>
7. Martin C., Guillen M., Lopez G. Treatment of 2- and 3-part fractures of the proximal humerus using external fixation: a retrospective evaluation of 62 patients. *Acta Orthopaedica*, 2006, vol. 77, no. 2, pp. 275–278. <https://doi.org/10.1080/17453670610046028>
8. Zyto K., Kronberg M., Brostrom L. A. Shoulder function after displaced fractures of the proximal humerus. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 1995, vol. 4, no. 5, pp. 331–336. [https://doi.org/10.1016/s1058-2746\(95\)80016-6](https://doi.org/10.1016/s1058-2746(95)80016-6)
9. Rockwood C. A., Green D. P. *Fractures in adults*. Philadelphia, Lippincott, 2001, vol. 1, pp. 997–1040.
10. Hoffmeyer P. The operative management of displaced of fractures of the proximal humerus. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 2002, vol. 84, no. 4, pp. 469–480. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.84b4.13394>

Информация об авторах

Даниленко Олег Анатольевич – канд. мед. наук, заведующий отделением. 6-я городская клиническая больница (ул. Уральская, 5, 220032, Минск, Республика Беларусь). E-mail: danilenkooa@gmail.com.

Макаревич Евгений Реональдович – д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, Минск, Республика Беларусь).

Сердюченко Николай Сергеевич – член-корреспондент, д-р мед. наук, профессор, академик-секретарь. Президиум НАН Беларуси (пр. Скорины, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lora323@mail.ru.

Малашко Антон Валерьевич – врач травматолог. Могилевская областная больница (ул. Бялыницкого-Бирули, 12, 212026, Могилев, Республика Беларусь).

Information about the authors

Danilenko Oleg Anatolievich – Ph. D. (Medicine), Head of the Department. Minsk City Clinical Hospital no. 6 (5, Uralskaya Str., 220032, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: danilenkooa@gmail.com.

Makarevich Evgenii Reonaldovich – D. Sc. (Medicine), Professor, Head of the Department. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhynski Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus).

Serduchenko Nikolai Sergeevich – Corresponding Member, D. Sc. (Medicine), Professor, Academic secretary. Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Skoriny Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lora323@mail.ru.

Malashko Anton Valerievich – traumatologist. Mogilev Regional Hospital (12, Bialynicki-Birulya Str., 212026, Mogilev, Republic of Belarus).

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCES

УДК 504.064
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-739-749>

Поступило в редакцию 01.08.2018
Received 01.08.2018

С. Л. Романов¹, А. Н. Червань², Е. М. Коробова³, Т. С. Яблонская¹

¹Геоинформационные системы Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

²Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

³Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского Российской академии наук,
Москва, Российская Федерация

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ЙОДОДЕФИЦИТА
НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

(Представлено академиком А. А. Махначом)

Аннотация. Впервые создана среднемасштабная карта, характеризующая состояние йододефицита на всей территории Беларуси. В сообщении анализируются полученные результаты и рассматривается пространственная специфика экологической обстановки, сложившейся в результате неоднородности содержания йода в почвах. С использованием возможностей специализированной ГИС на уровне административных областей районов была выделена зона повышенного йододефицита, которая дифференцирована по уровню риска возникновения йододефицитных заболеваний. В результате пространственного геоинформационного анализа для Беларуси впервые были выделены территории умеренного, значительного и наибольшего риска, которые должны стать объектами первоочередного контроля, непосредственно нуждающимися в целевом проведении адресной профилактики населения.

Ключевые слова: йододефицит, риск, ГИС-технология, картографическая оценка, профилактика

Для цитирования: Особенности проявления йододефицита на территории Республики Беларусь / С. Л. Романов [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 739–749. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-739-749>

Sergey L. Romanov¹, Aliaksandr N. Chervan², Elena M. Korobova³, Tatiana S. Yablonskaya¹

¹Geoinformation systems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

³Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

FEATURES OF IODINE DEFICIENCY IN THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF BELARUS

(Communicated by Academician Anatoly A. Makhnach)

Abstract. A medium-scale map of iodine deficiency in the territory of the Republic of Belarus was created for the first time. The map characterizes in detail a spatial variation of iodine concentration in soils of Belarus. The article analyzes a spatial specificity of the ecological situation formed as a result of heterogeneity of the iodine content in soils. Using the means of a specialized GIS, the area of high iodine deficiency was identified at the level of administrative regions. The identified area was further differentiated in terms of different level of ecological risk due to a natural soil iodine deficiency. As a result of such geoinformation analysis, the areas of moderate, significant and greatest risks were established in the territory of Belarus. These regions should become the objects of high priority monitoring and are directly in need of targeted preventive measures.

Keywords: iodine deficiency, risk, GIS-technology, cartographic evaluation, prevention

For citation: Romanov S. L., Chervan A. N., Korobova E. M., Yablonskaya T. S. Features of iodine deficiency in the territory of the Republic of Belarus. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 739–749 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-739-749>

Введение. Наличие безусловной связи между числом заболеваний щитовидной железы (ЩЖ) и содержанием йода в воде и продуктах питания было установлено более 100 лет назад. За истекшее время хорошо изучен механизм возникновения эндемических болезней ЩЖ, описаны особенности круговорота йода в окружающей среде и оценены уровни его содержания в разных типах почв и пород. В середине XX в. А. П. Виноградовым [1] и В. В. Ковальским [2] были определены параметры оптимально достаточного содержания йода в почве, а в пределах планеты были выделены зоны, характеризующиеся опасным для здоровья уровнем йододефицита, к числу которых была отнесена и территория Республики Беларусь. А поскольку более 90 % необходимого йода поступает в организм человека с местными продуктами питания и водой, то очевидно, что создание карты, детально характеризующей пространственную неоднородность распределения йода в почвах, может в решающей степени повысить эффективность профилактических мероприятий и способствовать решению задачи сокращения йододефицитных заболеваний (ЙДЗ), в том числе и рака щитовидной железы (РЩЖ) [3; 4].

Принципиальная возможность создания такой карты определяется наличием карты почв Беларуси, в легенде которой заложены настолько большие объемы разнообразной атрибутивной информации, что это позволило методически корректно создать на ее основе сателлитную карту йододефицита. В картографии такой подход называется интерпретационным и его смысл состоит в целенаправленной трансформации легенды при сохранении базовой карты в качестве контурной основы. При этом каждому из уже имеющихся на карте объектов ставится в соответствие набор тематических характеристик, которые либо заимствуются из содержания существующей легенды, либо присваиваются в соответствии с имеющейся информацией о качественных или количественных параметрах этих объектов.

Данный подход правомерен еще и потому, что фундаментальные исследования российских и белорусских ученых [2; 5–16] не только продемонстрировали безусловное наличие связи между содержанием йода и типом почвы, но и позволили охарактеризовать его количественное содержание для практически всех контуров среднemasштабной почвенной карты.

Состояние проблемы. Предлагаемый подход не является принципиально новым. Так, картосхема распределения йода в почвообразующих породах была построена на базе геологической карты четвертичных отложений под руководством К. И. Лукашева [11]. Затем на базе почвенной

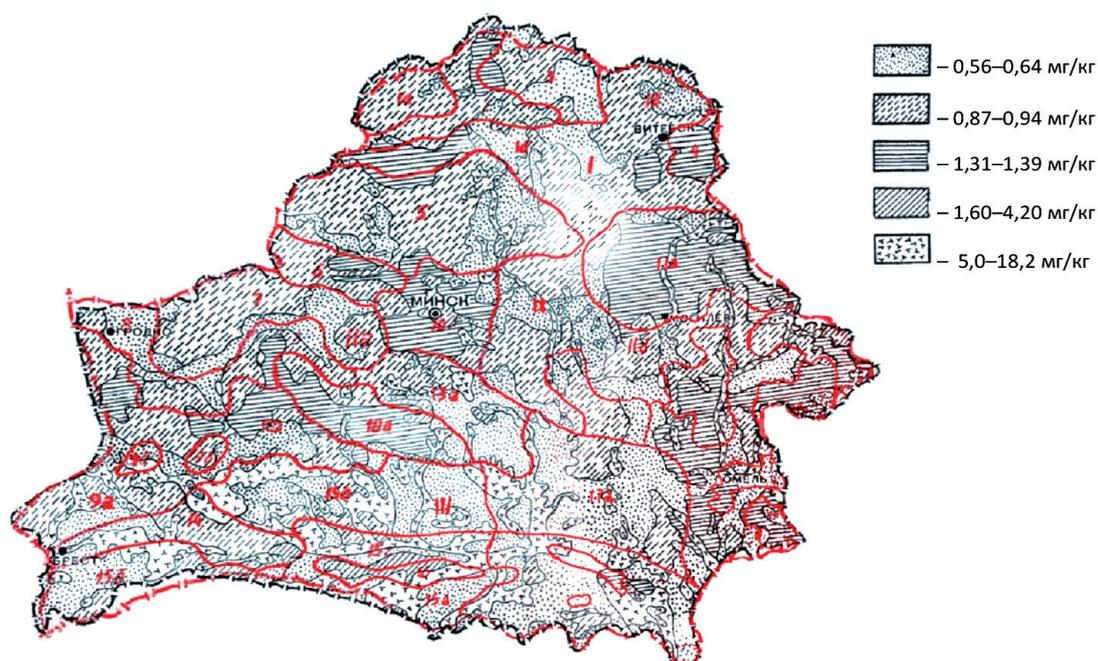


Рис. 1. Картосхема обеспеченности почв Беларуси валовым йодом [12] с наложением схемы почвенно-геохимического районирования [13]

Fig. 1. The map of the iodine content in soils of Belarus [12] with the overlapping of a scheme of soil-geochemical zoning [13]

карты были созданы карты Ю. Н. Зборищука и Н. Г. Зырина [14], позже появилась карта В. А. Ковды [5], характеризующие территорию Беларуси в пределах европейской части бывшего СССР. Все эти карты создавались на разном материале, сильно различались между собой и имели предельно низкий уровень детальности.

На картосхеме, построенной Л. И. Лозовским в 1971 г. [12] (рис. 1), помимо почв зонального типа были отражены и некоторые интразональные объекты, такие как поймы больших рек, крупные болотные массивы и др., благодаря чему она позволяла характеризовать обеспеченность йодом на уровне областей или крупных природных регионов. Данная схема дала возможность выделить на общем фоне всего один регион, характеризующийся заметно более низким содержанием йода в почвах Беларуси – западное и центральное Полесье.

Эти результаты позволили уточнить выводы о низкой, средней обеспеченности почв Беларуси йодом (1,3–1,4 мг/кг, при оптимуме 5 мг/кг [2]) и о большом разбросе наблюдаемых значений концентрации в диапазоне от 0,14 до 18,8 мг/кг [12].

Данной схеме, к сожалению, присущ ряд существенных недостатков, произошедших в результате глубокой генерализации базовой топоосновы (почвенной карты масштаба 1 : 200000), что привело к потере всего класса интразональных контуров, к трансформации границ и к нарушению соотношения площадей, занятых почвами одного типа. При этом следует учитывать и то, что схема Л. И. Лозовского была создана на основе всего 12 репрезентативных выборок, характеризующих 11 разновидностей почв Беларуси из 94, представленных на базовой карте.

Еще одной попыткой картографически отразить характер пространственной неоднородности йододефицита стала карта, построенная в 2000 г. Т. В. Мохорт и др. по данным ренальной экстрекции йода у школьников [17]. Недостатком этой схемы явился малый объем первичной выборки, состоящей всего из 30 точек, что не позволило репрезентативно воспроизвести характер реально существующей пространственной неоднородности.

Таким образом, изученность йодной проблемы на территории Беларуси до последнего времени оставалась явно недостаточной, причем главный недостаток состоял в том, что все имеющиеся карты характеризовались крайне низким уровнем детальности.

Предпосылки к созданию новой карты йододефицита. Необходимость создания детальной карты йододефицита определяется в первую очередь практической потребностью в такой информации, поскольку современное состояние эпидемиологической обстановки в республике по ряду причин далеко от оптимального [17]. Причины состоят в следующем:

низкий уровень ЙДЗ на территории Беларуси является исключительно результатом профилактических мероприятий, проводимых правительством Республики Беларусь, но ни в коем случае не следствием изменения природных условий, которые, как показал опыт 1980–1990-х годов, способны быстро спровоцировать зобную эндемию со средним уровнем заболеваемости детей на уровне более 30 % [18; 19];

на данный момент профилактическими мероприятиями охвачено 74 % населения, но даже если этот показатель удастся удержать на достигнутом уровне, численность граждан Беларуси, находящихся в группе риска, составит более 2,5 млн чел., в числе которых наибольшей опасности подвергается именно сельское население [16; 19; 20];

в почвах Беларуси наблюдается большой разброс содержания йода, что при повышении уровня детальности позволяет не только обнаруживать территории повышенного риска (первоочередного контроля), но и искать локальные источники дополнительного поступления йода в рацион местного населения;

за последнее время была не только создана и уточнена цифровая карта почвенного покрова Беларуси, но и собраны большие объемы информации, характеризующей содержание йода в почвах и породах, причем число накопленных таким образом йодных кларков достаточно для оценки всего разнообразия почв, представленных в классификационном перечне.

В этом отношении почвенная карта масштаба 1 : 500000, взятая в качестве картографической основы для построения карты йододефицита, обладает следующим набором преимуществ:

высокий уровень детальности почвенной съемки сочетается с использованием качественной топографии, что позволяет многократно превзойти достигнутый ранее уровень точности;

уровень детальности соразмерен площадным параметрам севооборотных контуров, что обеспечивает строгое пространственное позиционирование населенных пунктов и позволяет исключить из подсчета площади, не задействованные в производстве сельхозпродукции;

благодаря глубоко проработанной легенде такая карта обеспечивает полную унификацию атрибутивных показателей, фиксируемых для всех почвенных таксонов [7; 12; 21; 22].

Е. М. Коробовой собраны, систематизированы и уточнены данные о содержании стабильного йода в почвах практически всех типов и видов, встречающихся на территории республики, что позволило не только построить репрезентативную легенду новой карты йододефицита, но и учесть различия, обусловленные гранулометрическим составом, возрастом и генезисом почвообразующих пород [23].

Пространственная неоднородность природного йододефицита на территории Беларуси.

Новая карта йододефицита была создана с помощью специализированной ГИС. При этом процедура построения была последовательно алгоритмизирована до уровня технологии, в рамках которой каждому из контуров было сопоставлено определенное значение обеспеченности йодом, соответствующее его типовой и видовой принадлежности.

Полученный результат представлял собой векторную цифровую карту, что давало возможность с высокой точностью характеризовать интегральный уровень йододефицита в произвольно выбранной части Беларуси, включая районы и даже отдельные НП.

В легенде полученной карты были выделены пять типов территорий, различающихся по уровню йододефицита, от первой (0,64–0,945 мг/кг) и до пятой (2,79–5,31 мг/кг). Недавние исследования Е. Кардис и соавт., проведенные в том числе и на пострадавшей в результате аварии на ЧАЭС территории Беларуси, показали, что в тех случаях, когда содержание йода в наиболее распространенной супесчаной почве падало ниже значения 1,47 мг/кг это повсеместно приводило к устойчивому росту числа случаев РЩЖ у детей [24]. Поэтому базовый критерий разбивания диапазонов был выбран согласно этому порогу. Кроме того, при создании легенды была учтена мера площади, занимаемой почвами с определенными параметрами обеспеченности, а также соблюдено правило непрерывности шкалы и относительного равенства выделенных диапазонов.

Поскольку технология создания данной карты ранее уже была детально описана [23], главной задачей данного сообщения явилась интерпретация полученных результатов, что в первую очередь предполагало описание пространственной специфики распределения йода в почвах Беларуси. Так, если на карте В. А. Ковды [5] идентифицировалось 10 контуров, на карте Л. И. Лозовского [12] – около 100, то на карте 2017 г. [23] их стало уже более 2500 (рис. 2).

Достигнутый уровень детальности позволил контролировать структуру йододефицита на уровне практически любых природных регионов, но проведенный анализ показал, что на макроуровне пространственная неоднородность выражена слабо и определяется в первую очередь геоморфологическими особенностями формирования почвенного покрова, благодаря чему наиболее богатые йодом почвы приурочены к пойменным и заболоченным участкам речных долин, а наиболее бедные к водораздельным и склоновым территориям, сложенным древнеаллювиальными и флювиогляциальными песками.

Исследования [11; 12; 14; 21] в свое время свидетельствовали о наличии положительной корреляции ($r = 0,93$) между содержанием йода и содержанием илистой ($>0,05$ мм – по классификации USDA, FAO) фракции в верхних почвенных горизонтах. Проведенный картографический анализ позволил подтвердить справедливость данного утверждения, так как выявил наличие связи между содержанием йода и распространением пород разного гранулометрического состава, формирующих местные коры выветривания. Средний уровень обеспеченности почв йодом заметно растет в зоне моренных гряд, где преобладают суглинистые породы, в районах Полесья, где сосредоточены крупные массивы пород полугидроморфного и гидроморфного генезиса, а также существенно увеличивается в почвах Белорусского Поозерья, где доминирующую роль играют породы среднего и тяжелого гранулометрического состава [25].

Комплексная оценка состояния йододефицита и уровень риска возникновения ЙДЗ для населения Беларуси. Наличие векторной среднemasштабной карты позволило использовать богатые возможности существующих ГИС-технологий, которые дали возможность не только

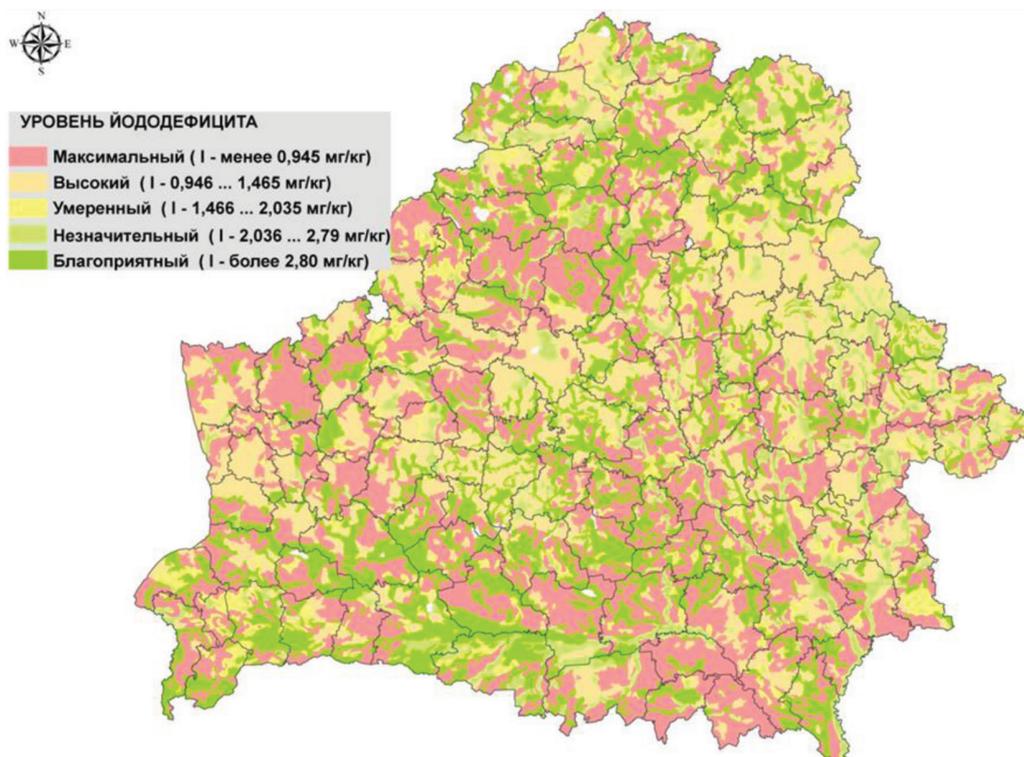


Рис. 2. Карта природного йододефицита на территории Республики Беларусь [23]

Fig. 2. The map of natural iodine deficiency in the territory of the Republic of Belarus [23]

оценить уровень природного йододефицита во всех 118 районах и 15780 крупнейших населенных пунктах Беларуси, но и определить меру риска возникновения ЙДЗ, обусловленную уровнем этого дефицита, для чего была разработана специальная процедура оценки экологического состояния площадных объектов.

Выбор критериев отнесения объекта к той или иной категории риска был осуществлен экспертно, исходя из параметров ситуации, реально сложившейся на той или иной территории республики. В результате к зонам наибольшего риска были причислены территории, в пределах которых либо более 65 % общей площади характеризовались максимальным йододефицитом, либо территории, для которых доля площади, занятая почвами с максимальным и высоким уровнем йододефицита, превышала 80 %. Значительному уровню риска соответствуют аналогичные показатели со значениям 60 и 70 %, а умеренному риску, соответственно 50 и 60 %.

Общая процедура оценки риска возникновения ЙДЗ на территории республики осуществлялась поэтапно. На первом этапе был выполнен анализ риска на уровне административных районов республики – при этом были не только выделены районы, попадающие в разные категории риска, но и отдельно рассчитаны показатели по каждой области, для которых была вычислена доля от общего количества населенных пунктов и процент населения, проживающего в опасных экологических условиях (табл. 1). Подобный анализ был выполнен впервые и, несомненно, имеет важное практическое значение. Однако возможности системы позволили осуществить значительно более детальный и точный анализ ситуации, характеризующий специфику распределения риска возникновения ЙДЗ.

Для этого было проанализировано состояние только наиболее уязвимых районов республики, для которых уровень риска возникновения ЙДЗ оценивался уже по трем показателям: количеству подверженных дефициту НП, общему количеству населения, проживающему в той или иной зоне риска, а также по уровню дефицита йода, наблюдаемого в структуре почвенного покрова буферной зоны, находящейся в радиусе 250 м от центра анализируемого НП. Такой подход был также впервые реализован на территории Беларуси, и его преимущество состоит в том, что риск ЙДЗ был учтен уже не в виде среднего показателя по району, а адресно, с учетом условий

Т а б л и ц а 1. Оценка риска йоддефицита на уровне областей и районов Республики Беларусь
 T a b l e 1. Iodine deficiency assessment at the level of regions and districts of the Republic of Belarus

Область	Риск йоддефицита										Риск на уровне области		
	Наибольший*	Доля от общего кол-ва, %		Значительный**	Доля от общего кол-ва, %		Умеренный***	Доля от общего кол-ва, %		Всего			
		НП	Население		НП	Население		НП	Население	НП	Население	Доля от общего кол-ва, %	
												НП	Население
Брестская	–	–	Барановичский, Пружанский	12,5	19,6	Ивановский	6,3	3,7	18,8	23,3	низкий		
Витебская	Оршанский, Толочинский	9,5	14,2	Дубровенский, Лиозненский	9,5	3,0	Чашникский	4,8	2,3	23,8	19,5	низкий	
Гродненская	Берестовицкий, Волковысский, Гродненский, Зельвенский, Щучинский	29,4	47,8	Вороновский, Мостовский, Островицкий, Ошмянский, Свислочский, Слонимский	35,3	20,7	Дятловский, Корелицкий, Лидский, Новогрудский	23,5	23,2	88,2	91,7	высокий	
Гомельская	Мозырский, Наровлянский	9,5	9,4	Ветковский, Гомельский, Калининковский, Кормянский, Дельчицкий, Рогачевский, Чечерский	33,3	51,5	Буда-Кощелевский, Ельский, Речицкий, Хойникский	19,1	13,3	61,9	74,2	высокий	
Минская	Вилейский, Минский	9,1	13,4	Воложинский, Дзержинский, Логойский, Молодечненский, Несвижский, Столбцовский, Червенский	31,8	27,7	Березинский, Борисовский, Копыльский, Крупский, Смолевичский, Узденский	27,3	28,5	68,2	69,6	средний	
Могилевская	Круглянский	4,8	1,6	Бобруйский, Могилевский, Чериковский, Шкловский	19,1	58,6	Белыничский, Быховский, Горецкий, Кировский, Климовичский, Краснопольский, Кричевский, Костюковичский, Славгородский, Хотимский	47,6	25,3	71,5	85,5	высокий	

Пр и м е ч а н и я: * – 1 + 2 категории более 80 % или 1 категории более 65 % общей площади; ** – 1 + 2 категории более 70 % или 1 категории более 60 % общей площади; *** – 1 + 2 категории более 60 % или 1 категории более 50 % общей площади.

N o t e s: * – 1 + 2 categories – more than 80 % or 1 category – 65 % of total area; ** – 1 + 2 categories – more than 70 % or 1 category – more than 60 % of total area; *** – 1 + 2 categories – more than 60 % or 1 category – more than 50 % of total area.

Таблица 2. Дифференциация земель и населения районов группы наибольшего риска по категориям природного недостатка валового йода
 Table 2. Differentiation of the land and the population of the districts of the largest risk group in terms of a natural soil iodine deficiency

Область	Район	Площадь I и II категории по району, тыс. га	Категория йододефицита в разрезе населенных пунктов														
			Первая (высшая) 0,64–0,945 мг/кг			Вторая 0,945–1,465 мг/кг			Третья 1,465–2,035 мг/кг			Четвертая 2,035–2,79 мг/кг			Пятая 2,79–5,31 мг/кг		
			Кол-во НП	Площадь НП и буферной зоны 250 м, тыс. га	Население, %	Кол-во НП	Площадь НП и буферной зоны 250 м, тыс. га	Население, %	Кол-во НП	Площадь НП и буферной зоны 250 м, тыс. га	Население, %	Кол-во НП	Площадь НП и буферной зоны 250 м, тыс. га	Население, %	Кол-во НП	Площадь НП и буферной зоны 250 м, тыс. га	Население, %
Витебская	Оршанский	142,5	7	3,4	1,9	73	29,2	97,6	5	2,1	0,3	2	0,6	0,1	2	0,7	0,2
	Толочинский	128,8	3	0,7	0,4	73	22,9	96,6	4	2,1	1,8	4	1,2	1,1	1	0,4	0,2
Минская и г. Минск	Вилейский	170	77	20,0	32,1	6	1,8	2,0	7	2,1	3,5	14	5,3	59,7	9	2,4	2,8
	Минский	183,1	14	2,4	0,33	72	19,7	6,78	2	18,5	91,64	14	3,9	0,55	4	1,2	0,70
Гродненская	Берестовицкий	64,6	11	2,7	14,75	20	5,2	81,93	1	0,2	0,57	4	1,5	2,75	0	0,0	0,00
	Волковьский	110,3	13	4,4	50,93	33	8,4	46,53	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	4	1,0	2,54
	Гродненский	245,8	39	14,2	96,26	49	16,1	3,49	1	0,2	0,02	4	1,2	0,11	5	1,1	0,11
	Зельвенский	71,8	21	6,1	33,77	16	5,8	58,99	1	0,0	0,27	2	0,5	1,83	4	1,3	5,14
Могилевская	Щучинский	156,9	56	14,6	84,10	5	1,0	1,68	1	0,4	1,33	1	0,1	0,33	11	3,2	12,56
	Круглянский	74,7	2	0,3	1,22	33	10,2	86,25	5	1,8	3,53	7	1,8	4,16	7	1,4	4,83
Гомельская	Мозырский	131,4	46	14,6	34,05	6	2,6	2,43	2	1,9	58,61	4	2,5	4,46	5	1,3	0,45
	Наровлянский	149,5	50	17,6	94,86	9	3,5	4,37	0	0,0	0,00	1	0,2	0,37	1	0,2	0,40

проживания. А поскольку в этих случаях речь шла о качественно разном риске, для исследованных районов были выделены разные оценочные категории, демонстрирующие высокий, средний и низкий уровень риска возникновения ЙДЗ (табл. 2).

Результаты, представленные в табл. 1 и 2, показывают, что в Беларуси уже на уровне отдельных областей наблюдается весьма значительная разница условий обеспеченности почв йодом. При этом относительно благополучная обстановка отмечена только на территории Витебской и Брестской областей, где процент населения, проживающего в экологически неблагоприятных условиях, составляет соответственно 23,8 и 18,8 %. Максимально высокий уровень риска наблюдается в Гродненской области, где площадь земель, относящихся к высшей категории риска (0,64–1,465 мг/кг) составляет 649,4 тыс. га и занимает 25,8 % площади. Причем в зоне наибольшего риска проживает почти половина (47,8 %) жителей области, а 91,7 % населения постоянно находится в экологически неблагоприятных условиях.

Весьма высокий уровень риска наблюдается также в Могилевской и Гомельской областях, в которых, несмотря на в целом незначительную площадь земель с высоким и средним уровнем йододефицита, общее количество населения, проживающего в неблагоприятных условиях составляет соответственно 85,5 и 74,2 %. Территория Минской области отнесена к зоне среднего риска, где наибольшему и значительному риску подвержено только 41,1 % населения.

При оценке риска ЙДЗ на уровне отдельных районов главным критерием выступила мера площади почв в радиусе 250 м от центра исследуемого НП, причем детальному анализу в данном случае подвергались только районы с наибольшим риском – те, в которых общая площадь почв, относящихся к первой (0,64–0,945 мг/кг) и второй (0,945–1,465 мг/кг) категории йододефицита, превышала 65 % общей площади района. Как это видно из содержания рис. 3, детальное рассмотрение проблемы ЙДЗ на уровне отдельных НП дает результат, несколько отличающийся от полученного ранее.

Так, в наибольшей мере дефицит йода оказался опасен для населения Гродненской, Минской и Могилевской областей, поскольку в каждой из этих областей наибольшему риску подвержены не менее 15 административных районов. Почвенный покров Гомельской области способствует дифференциации условий проявления ЙДЗ: от незначительного (8 районов) до наибольшего (Мозырский и Наровлянский районы). Районы, относящиеся к Брестской и Витебской областям,

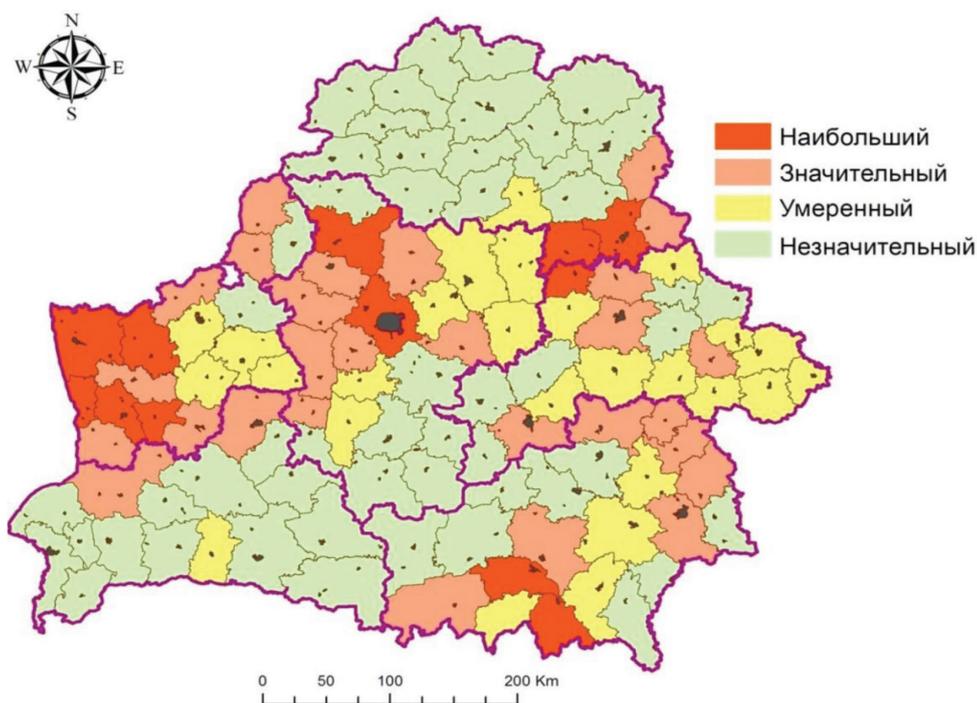


Рис. 3. Карта риска возникновения ЙДЗ для населения административных районов Республики Беларусь
Fig. 3. The map of risk of IHD occurrence for the population in borders of administrative areas of the Republic of Belarus

характеризуются в целом невысоким уровнем риска. Исключение составляют Барановичский и Пружанский районы Брестской области, а также Оршанский и Толочинский районы Витебской.

Результаты, представленные в табл. 2, показывают, что с помощью новой цифровой карты удалось точнее и детальнее, чем когда-либо ранее охарактеризовать пространственную неоднородность распределения риска ЙДЗ на территории Беларуси. Например, в Минском районе, несмотря на приуроченность места проживания большинства населения к третьей категории йододефицита (из-за большого удельного веса населения собственно Минска), выявлены еще 14 НП, относящихся к зоне высокого и 72 – к зоне среднего риска.

Аналогичная ситуация, когда на территориях, характеризующихся в среднем умеренным уровнем йододефицита, значительное количество жителей все же подвергается высокому риску возникновения ЙДЗ, отмечена в Оршанском и Толочинском районах Витебской области, Берестовицком и Зельвенском районах Гродненской, а также Круглянском районе Могилевской области. Хорошим примером здесь служат и территории Вилейского и Мозырского районов, где население райцентров проживает в зоне умеренного дефицита, в то время как большая часть остальных НП – соответственно 77 и 46 % подвержена наибольшему и значительному риску.

Следует также отметить, что разработанные методические подходы носят универсальный характер и могут применяться для анализа эколого-геохимической обстановки практически любой территории, причем не только применительно к оценке состояния йододефицита.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № X16P-186).

Acknowledgements. The work was sponsored by the Belarusian Republican Foundation of Fundamental Research (Project No. X16P-186).

Список использованных источников

1. Виноградов, А. П. Йод в природе / А. П. Виноградов // Природа. – 1927. – № 9. – С. 670–678.
2. Ковальский, В. В. Биологическая роль йода / В. В. Ковальский. – М., 1972. – С. 3–32.
3. Антонова, М. С. Борьба с йод-дефицитом: история и современность [Электронный ресурс] / М. С. Антонова // Исследовано в России. – 2004. – № 7. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/borba-s-yod-defitsitom-istoriya-i-sovremennost>.
4. Iodine status of UK schoolgirls: a cross-sectional survey / M. Vanderpump [et al.] // The Lancet. – 2007. – Vol. 377, N 9782. – P. 2007–2012. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(11\)60693-4](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(11)60693-4)
5. Ковда, В. А. Биогеохимия почвенного покрова / В. А. Ковда. – М., 1985. – 261 с.
6. Вильямс, В. Р. Почвоведение. Земледелие с основами почвоведения / В. Р. Вильямс. – М., 1946. – 458 с.
7. Глазовская, М. А. Биогеохимическая организованность экологического пространства в природных и антропогенных ландшафтах как критерий их устойчивости / М. А. Глазовская // Изв. РАН. Сер. географическая. – 1992. – № 5. – С. 5–12.
8. Романова, Т. А. Диагностика почв Белоруссии и их классификация в системе ФАО-WRB / Т. А. Романова. – Минск, 2004. – 427 с.
9. Фридланд, В. М. Структура почвенного покрова / В. М. Фридланд. – М., 1972. – 423 с.
10. Ковальский, В. В. Геохимическая экология / В. В. Ковальский. – М., 1974. – 282 с.
11. Лукашев, К. И. Ландшафтно-геохимические исследования в Белорусской ССР в связи с эндемическим зобом / К. И. Лукашев, С. Г. Комракова // Известия ВГО. – 1986. – Т. 118, вып. 1. – С. 75–83.
12. Лозовский, Л. И. Йод в почвах Беларуси: автореф. ... канд. биол. наук / Л. И. Лозовский. – Минск, 1971. – 18 с.
13. Петухова, Н. Н. Геохимия почв Белорусской ССР / Н. Н. Петухова. – Минск, 1987. – 229 с.
14. Зборищук, Ю. Н. Содержание йода в пахотном слое почв Европейской части СССР / Ю. Н. Зборищук // Почвоведение. – 1975. – № 9. – С. 49.
15. Evaluation of stable iodine status of the areas affected by the Chernobyl accident in an epidemiological study in Belarus and the Russian Federation / E. Korobova [et al.] // Journal of Geochemical Exploration. – 2010. – Vol. 107, N 2. – P. 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.08.005>
16. Проблема йодного дефицита и пути ее решения в Республике Беларусь / Т. В. Мохорт [и др.] // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. мед. навук. – 2006. – № 2. – С. 23–28.
17. Йодный дефицит в Беларуси и методы его коррекции и профилактики: метод. рекомендации / Т. В. Мохорт [и др.]. – Минск, 2001. – 22 с.
18. Стратегия устранения йодного дефицита в Республике Беларусь: Оценка результатов 10-летней работы / В. И. Качан [и др.] // Клиническая и экспериментальная териоидология. – 2010. – Т. 6, № 3. – С. 30–34. <https://doi.org/10.14341/ket20106330-34>
19. Состояние йодной обеспеченности и распространенности зоба у детей школьного возраста Беларуси / С. В. Петренко [и др.] // Экологический вестник. – 2007. – № 2. – С. 25–32.

20. Исследование распространенности зоба и экскреции йода с мочой у детей и подростков, родившихся до и после Чернобыльской аварии, как важных факторов оценки тиреоидной патологии, наблюдаемой в Республике Беларусь (протокол совместного международного исследования) / А. Н. Стожаров [и др.] // Медико-биологические аспекты аварии на Чернобыльской АЭС. Аналитико-информационный бюллетень. – 1997. – № 2. – С. 36–44.
21. Коробова, Е. М. Йод в ландшафтах Нечерноземного центра Русской равнины / Е. М. Коробова, Э. Б. Тюрюканова // Геохимия. – 1984. – № 9. – С. 1378–1388.
22. Оценка йодного статуса почв Брянской области с использованием ГИС-технологии / Е. М. Коробова [и др.] // Моделирование при решении геоэкологических задач. – М., 2009. – Вып. 11. – С. 51–55.
23. Методические принципы построения карты йододефицита на территории Беларуси / С. Л. Романов [и др.] // Вестн. Фонда фундаментальных исследований. – 2017. – № 3. – С. 118–135.
24. Risk of thyroid cancer after exposure to 131I in childhood / E. Cardis [et al.] // J. of Nat. Cancer Institute. – 2005. – Vol. 97, N 10. – P. 724–732. <https://doi.org/10.1093/jnci/dji129>
25. Матвеев, А. В. Геохимия четвертичных отложений Беларуси / А. В. Матвеев, В. Е. Бордон. – Минск, 2013. – 191 с.

References

- Vinogradov A. P. Iodine in nature. *Priroda = Nature*, 1927, no. 9, pp. 670–678 (in Russian).
- Koval'skii V. V. *The biological role of iodine*. Moscow, Kolos Publ., 1972, pp. 3–32 (in Russian).
- Antonova M. S. Fighting iodine deficiency: history and modern times. *Issledovano v Rossii [Investigated in Russia]*, 2004, no. 7. Available at: <http://zhurnal.ape.relarn.ru> (in Russian).
- Vanderpump M., Lazarus J. H., Smyth P. P., Laurberg P., Holder R. L., Boelaert K., Franklyn J. A. Iodine status of UK schoolgirls: a cross-sectional survey. *The Lancet*, 2011, vol. 377, no. 9782, pp. 2007–2012. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(11\)60693-4](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(11)60693-4)
- Kovda V. A. *Biogeochemistry of soil cover*. Moscow, 1985. 261 p. (in Russian).
- Vil'yams V. R. *Soil science. Farming with the basics of soil science*. Moscow, 1946. 458 p. (in Russian).
- Glazovskaya M. A. Biogeochemical organization of ecological space in natural and anthropogenic landscapes as a criterion for their sustainability. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya = Regional Research of Russia*, 1992, no. 5, pp. 5–12 (in Russian).
- Romanova T. A. *Soil diagnostics of Belarus and their classification in the FAO-WRB system*. Minsk, 2004. 427 p. (in Russian).
- Fridland V. M. *Soil cover structure*. Moscow, 1972. 423 p. (in Russian).
- Koval'skii V. V. *Geochemical ecology*. Moscow, 1974. 282 p. (in Russian).
- Lukashev K. I., Komrakova S. G. Landscape-geochemical studies in the Byelorussian SSR in connection with endemic goiter. *Izvestiya Vserossiiskogo geografičeskogo obshchestva [News of the All-Union Geographical Society]*, 1986, vol. 118, no. 1, pp. 75–83 (in Russian).
- Lozovskii L. I. *Iodine in the soils of Belarus*. Minsk, 1971. 18 p. (in Russian).
- Petukhova N. N. *Soil Geochemistry of the Byelorussian SSR*. Minsk, 1987. 229 p. (in Russian).
- Zborishchuk Yu. N. The content of iodine in the arable layer of the soil of the European part of the USSR. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 1975, no. 9, p. 49 (in Russian).
- Korobova E., Anoshko Y., Kesminiene A., Kouvyline A., Romanov S., Tenet V., Suonio E., Cardis E. Evaluation of stable iodine status of the areas affected by the Chernobyl accident in an epidemiological study in Belarus and the Russian Federation. *Journal of Geochemical Exploration*, 2010, vol. 107, no. 2, pp. 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.08.005>
- Mokhort T. V., Kholodova E. A., Kolomiets N. D., Mokhort E. G. Problem of iodine deficiency and the ways of its solution in the Republic of Belarus. *Vesti Natsyonal'noy akademii navuk Belarusi. Seriya medytsynskikh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, medical series*, 2006, no. 2, pp. 23–28 (in Russian).
- Mokhort T. V., Petrenko S. V., Arinchin A. N., Daud A. I., Gomolko N. N. *Iodine deficiency in Belarus and methods for its correction and prevention*. Minsk, 2001. 22 p. (in Russian).
- Kachan V. I., Mokhort T. V., Kolomiets N. D., Filonov V. P., Petrenko S. V., Zabarovskaya Z. V., Gusina N. B., Gerasimov G. A. Strategy for elimination of iodine deficiency in Belarus: evaluation of 10 years experience. *Clinical and Experimental Thyroidology*, 2010, vol. 6, no. 3, pp. 30–34. <https://doi.org/10.14341/ket20106330-34>
- Petrenko S. V., Okeanov A. E., Gomolko N. N., Leushev B. Ju., Koryt'ko S. S., Mokhort T. V., Dardynskaja I. V. The state of iodine availability and prevalence of goiter in school children of Belarus. *Ekologicheskii vestnik = Ecological Herald*, 2007, no. 2, pp. 25–32 (in Russian).
- Stozharov A. N., Arinchin A. N., Petrenko S. V. Study of the prevalence of goiter and urinary iodine excretion in children and adolescents born before and after the Chernobyl accident, as important factors in the assessment of thyroid pathology observed in the Republic of Belarus (joint international research protocol). *Mediko-biologicheskie aspekty avarii na Chernobyl'skoi AES [Medical and biological aspects of the Chernobyl accident]*, 1997, no. 2, pp. 36–44 (in Russian).
- Korobova E. M., Tyuryukanova E. B. Iodine in landscapes of the Nonchernozem Center of the Russian Plain. *Geohimija = Geochemistry International*, 1984, no. 9, pp. 1378–1388 (in Russian).
- Korobova E. M., Kuvylin A. I., Chesalova E. I., Berezkin V. Ju. Assessment of the iodine status of the soil of the Bryansk region using GIS technology. *Modelirovanie pri reshenii geojekologicheskikh zadach [Modeling in solving geo-environmental problems]*. Moscow, 2009, no. 11, pp. 51–55 (in Russian).

23. Romanov S. L., Chervan' N. A., Korobova E. M., Yablonskaya T. S. Methodical principles for constructing a map of iodine deficiency in Belarus. *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovaniy = Vestnik of the Foundation for Fundamental Research*, 2017, no. 3, pp. 118–135 (in Russian).

24. Cardis E., Kesminiene A., Ivanov V., Malakhova I., Shibata Y., Khrouch V., Drozdovitch V., Maceika E., Zvonova I., Vlassov O., Bouville A., Goulko G., Hoshi M., Abrosimov A., Anoshko J., Astakhova L., Chekin S., Demidchik E., Galanti R., Ito M., Korobova E., Lushnikov E., Maksoutov M., Masyakin V., Nerovnia A., Parshin V., Parshkov E., Piliptsevich N., Pinchera A., Polyakov S., Shabeka N., Suonio E., Tenet V., Tsyb A., Yamashita S., Williams D. Risk of thyroid cancer after exposure to ¹³¹I in childhood. *Journal of the National Cancer Institute*, 2005, vol. 97, no. 10, pp. 724–732. <https://doi.org/10.1093/jnci/dji129>

25. Matveev A. V., Bordon V. E. *Geochemistry of Quaternary sediments of Belarus*. Minsk, 2013. 191 p. (in Russian).

Информация об авторах

Романов Сергей Львович – канд. географ. наук, ст. науч. сотрудник. Геоинформационные системы (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: SRomanov@GIS.by.

Червань Александр Николаевич – канд. с.-х. наук, вед. науч. сотрудник. Институт почвоведения и агрохимии НАН Беларуси (ул. Казинца, 90, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ChervanAlex@mail.ru.

Коробова Елена Михайловна – д-р геол.-минералог. наук, ученый секретарь. Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (ул. Косыгина, 19, 119334, Москва, Российская Федерация). E-mail: korobova@geokhi.ru.

Яблонская Татьяна Сергеевна – техник первой категории. Геоинформационные системы (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: TYablonskaya@gis.by.

Information about the authors

Romanov Sergey Lvovich – Ph. D. (Geography), Senior researcher. Geoinformation systems (6, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: SRomanov@GIS.by.

Chervan Aliaksandr Mikalaevich – Ph. D. (Agrarian), Leading researcher. Institute for Soil Science and Agrochemistry (90, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ChervanAlex@mail.ru.

Korobova Elena Mihailovna – D. Sc. (Geology), Scientific Secretary. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS (19, Kosygin Str., 119334, Moscow, Russian Federation). E-mail: korobova@geokhi.ru.

Yablonskaya Tatiana Sergeevna – Technician of the first category. Geoinformation systems (6, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: TYablonskaya@gis.by.

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 551.583

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-750-755>

Поступило в редакцию 01.11.2018

Received 01.11.2018

С. А. Лысенко, академик В. Ф. Логинов, С. Л. Ощепков*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***МЕХАНИЗМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА**

Аннотация. Исследуются причины и механизм возникновения паузы в изменении климата с 1998 по 2014 г. На основании данных спутниковых измерений и метеорологического реанализа установлена связь между температурой тропической зоны Тихого океана, скоростью приповерхностного ветра и общим содержанием водяного пара в атмосфере. Дано объяснение интенсивного убывания содержания водяного пара в атмосфере в годы климатической паузы и количественно оценено связанное с этим изменение радиационного баланса подстилающей поверхности. Показано, что наблюдаемая динамика водяного пара привела к снижению приходной части радиационного баланса подстилающей поверхности на величину, более чем на порядок превышающую приток к ней длинноволнового излучения за счет увеличения концентрации углекислого газа. Стабилизации глобальной температуры способствовало уменьшение оптической толщины облаков, приводящее к дополнительному радиационному прогреву подстилающей поверхности в коротковолновом диапазоне.

Ключевые слова: климат, океан, водяной пар, облака, атмосферная радиация

Для цитирования: Лысенко, С. А. Механизмы стабилизации современного климата / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов, С. Л. Ощепков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 750–755. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-750-755>

Sergei A. Lysenko, Academician Vladimir F. Loginov, Sergei L. Oshepkov*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***MECHANISMS OF STABILIZATION OF MODERN CLIMATE**

Abstract. This article investigates the causes and mechanism of change in the climatic pause from 1998 to 2014. In particular, based on the satellite data and the meteorological reanalysis we found a relationship between the temperature of the tropical region of the Pacific Ocean, the speed of the surface wind, and the total content of water vapor in the atmosphere. We also showed that the climatic pause can be explained by a decrease in the water vapor content in the atmosphere and evaluated how this decrease affected the radiation balance of the ground surface. The observed dynamics of water vapor is shown to lead to a decrease in the incoming part of the radiation balance of the ground surface by an amount, which is more than one order of magnitude larger than that caused by the increase in anthropogenic carbon dioxide. It was demonstrated that a decrease in the cloud cover optical thickness could also lead to the stabilization of the global temperature by means of radiative heating of the underlying surface.

Keywords: climate, ocean, water vapor, clouds, atmospheric radiation

For citation: Lysenko S. A., Loginov V. F., Oshepkov S. L. Mechanisms of stabilization of modern climate. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 750–755 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-750-755>

Введение. Современные глобальные и региональные изменения температуры, наблюдавшиеся за период инструментальных наблюдений, имеют более сложный характер, чем антропогенные изменения содержания парниковых газов в атмосфере. Во временной динамике среднегодовой температуры поверхности Земли отчетливо выделяются паузы, длящиеся более десяти лет. В последний раз рост глобальной температуры Земли приостанавливался с 1998 по 2014 г. До этого пауза в глобальном потеплении наблюдалась с 1945 г. до конца 1960-х – начала 1970-х годов. Такие события каждый раз вызывают интенсивные дискуссии в научном сообществе и заставляют климатологов более пристально взглянуть на причины естественной изменчивости климата.

В настоящей работе предпринята попытка объяснить паузы в изменении глобальной температуры с точки зрения механизмов формирования и трансформации водяного пара в атмосфере. В качестве основы для проведения исследований использовались данные искусственных спутников Земли и ретроспективные расчеты моделей общей циркуляции атмосферы, построенные на данных метеорологических наблюдений за прошедшее время (реанализ). Предполагаемый механизм стабилизации среднглобальной температуры подтверждается расчетами радиационной модели атмосферы при фактических данных о временной динамике водяного пара, углекислого газа и облачности.

Исследование термодинамики атмосферы и океана. Для понимания причин многолетних изменений содержания водяного пара в атмосфере полезно рассмотреть тенденции изменений температуры и приповерхностной скорости ветра в различных районах Мирового океана. Такое рассмотрение проведено с использованием следующих комплектов данных:

температура поверхности моря (SST, Sea Surface Temperature), измеряемая тепловым спектро- радиометром ATSR (Along Track Scanning Radiometer);

аномалии высоты уровня моря (SLH, Sea Level Height) и ее составляющие (температурно-обусловленная и массовая), измеряемые в рамках глобальных спутниковых экспериментов AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data) и GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment);

общее содержание водяного пара в столбе атмосферы (TCWV, Total Column Water Vapor), восстанавливаемое по данным пассивного зондирования атмосферы спутниковым прибором MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer);

глобальные поля приповерхностной скорости ветра (TWS, Terrestrial Wind Speed), рассчитанные с использованием модели MERRA-2, иницируемой данными наземных и спутниковых наблюдений за состоянием атмосферы.

Временной ряд глобальных среднемесячных значений TCWV, построенный по данным спутникового прибора MODIS, приведен на рис. 1. Видно, что с 2000 по 2014 г. величина TCWV понижалась практически монотонно со средней скоростью $\sim 0,12$ мм/год. За эти годы уменьшение TCWV составило около 10 % от его среднего по планете значения (22,5 мм).

Влияние температуры поверхности океана на поступление влаги в атмосферу наиболее отчетливо проявляется в летние месяцы, когда содержание водяного пара в атмосфере достигает своего максимума в годовом ходе. Коэффициенты линейных трендов SST, TWS и TCWV для летнего сезона приведены на рис. 2. Схожесть их распределений по поверхности Мирового океана говорит о взаимообусловленности процессов перераспределения энергии (в виде скрытой теплоты парообразования) и количества движения между атмосферой и океаном. Вариации средних летних значений SST и TCWV относительно их трендов более чем на половине площади Мирового океана связаны с коэффициентом корреляции $>0,55$ (рис. 2, *d*). Наиболее значимая корреляция и скорость изменения TCWV ($-0,28$ мм/год) наблюдаются в восточной и центральной зонах Тихого океана, лежащих между -30 и 30° с. ш. Температура поверхности этой зоны океана в годы климатической паузы понижалась со скоростью $-0,026$ $^\circ\text{C}/\text{год}$, а тропические ветры усиливались со скоростью $0,032$ $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}/\text{год}$. В целом по планете скорость приповерхностного ветра с 1998 по 2013 г. уменьшилась на $0,093$ $\text{м}/\text{с}$, однако в тропической зоне Тихого океана и также в циркумполярной зоне Южного океана на-

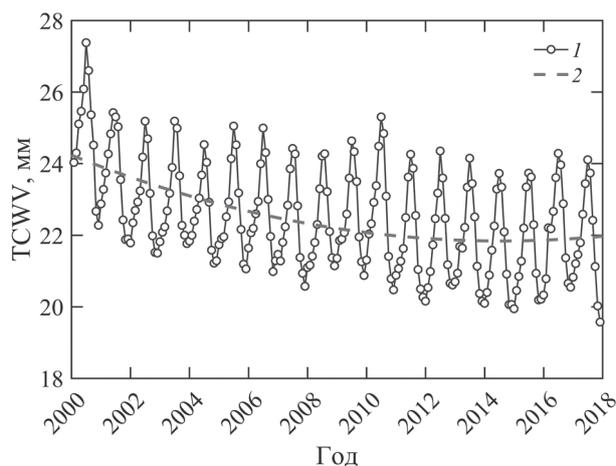


Рис. 1. Динамика (1) и квадратичный тренд (2) среднемесячных глобальных значений общего содержания водяного пара в столбе атмосферы

Fig. 1. Dynamics (1) and quadratic trend (2) one mean-month global values of the total water vapor content in the atmospheric column

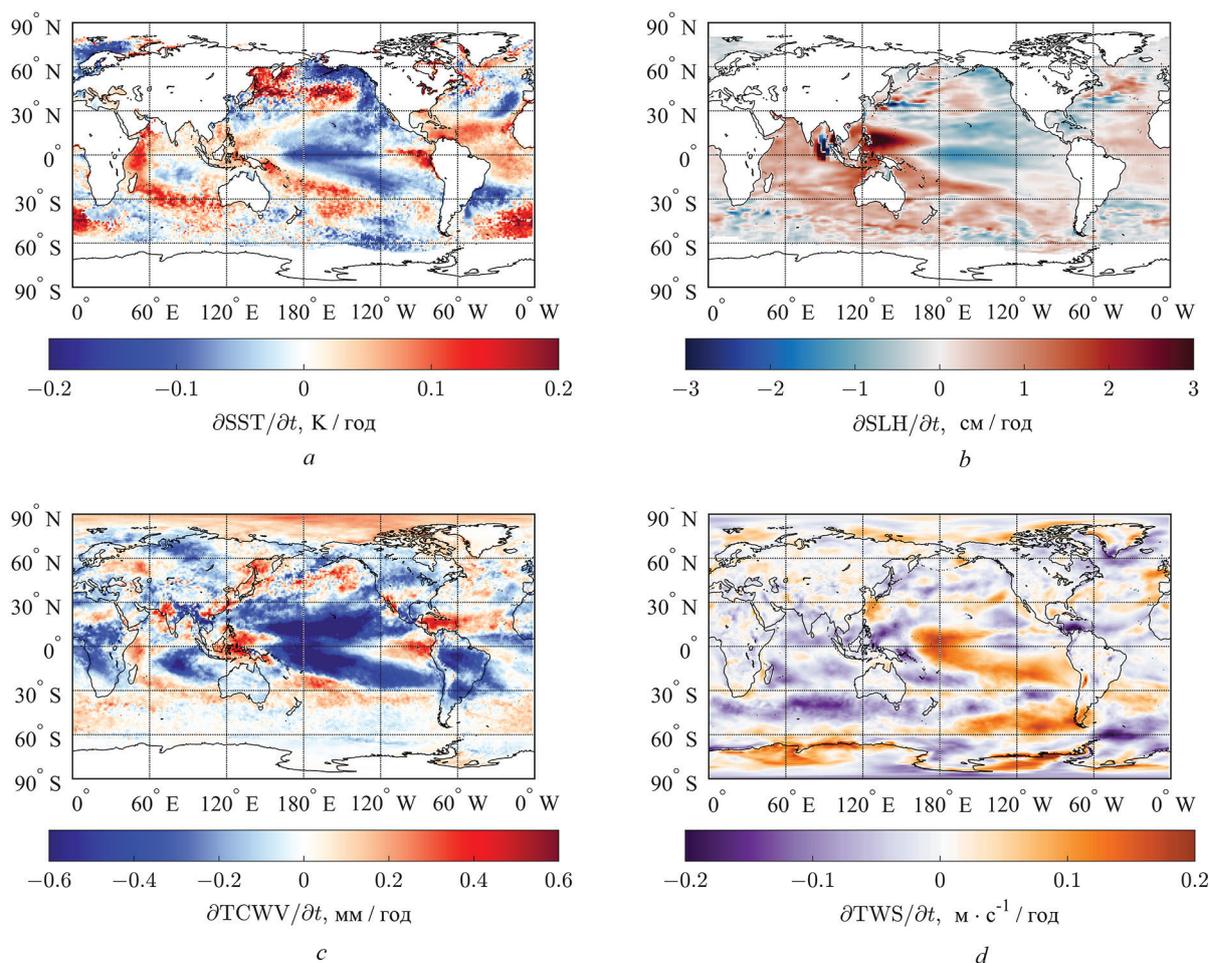


Рис. 2. Глобальные распределения трендов SST (a), SLH (b), TCWV (c) и TWS (d) в летние месяцы периода климатической паузы

Fig. 2. Global distributions of trends SST (a), SLH (b), TCWV (c) and TWS (d) during summer months of the climatic pause period

блюдался ее статистически значимый рост. Это обстоятельство могло способствовать усилению океанических течений и зональному переносу им тепла [1–3].

Представляет интерес количественно оценить влияние изменений температуры поверхности Мирового океана и глобальной скорости ветра на общее содержание водяного пара в атмосфере. Для этого рассмотрим уравнение регрессии между указанными геофизическими параметрами, полученное на данных спутниковых наблюдений и метеорологического реанализа для периода стабилизации глобальной температуры в начале текущего столетия:

$$\text{TCWV} = -153,09 + 6,535\text{SST} + 6,132\text{TWS}. \quad (1)$$

Коэффициент множественной корреляции, описываемой уравнением (1), составляет 0,91. Данное уравнение позволяет оценить чувствительность TCWV к вариациям SST и TWS. На основании этого можно сделать вывод, что трендовая компонента TCWV в годы климатической паузы на 71 % формировалась за счет охлаждения поверхности Мирового океана ($-0,012$ °C/год) и на 9 % под влиянием уменьшения глобальной скорости приземного ветра ($-0,0028$ м·с⁻¹/год).

Моделирование радиационного баланса подстилающей поверхности. Теперь оценим, как изменения TCWV в годы климатической паузы отразились на радиационном балансе подстилающей поверхности. Для этого использовалась разработанная нами модель переноса излучения в системе «атмосфера–подстилающая поверхность». Модель включает в себя отдельные блоки по расчету высотных профилей физических параметров атмосферы (температуры, влажности

воздуха, парциальных давлений газовых компонент), оптических характеристик аэрозоля и облаков (показателей ослабления, рассеяния, индикатрисы рассеяния), газового поглощения и рассеяния, восходящих и нисходящих потоков солнечного и теплового излучения.

Рассмотрим два значения TCWV: 23,5 мм (глобальный средний уровень 2001 г.) и 21,5 мм (2014 г.). Значения других параметров атмосферы, влияющих на ее радиационный режим, выбраны следующими: приземная температура воздуха – 18 °С, аэрозольная оптическая толщина – 0,255 при, концентрация CO₂ – 370,41 ppmv (уровень 2001 г.) и 397,11 ppmv (2014 г.), концентрации других атмосферных газов и их высотная стратификация приняты в соответствии со стандартной моделью атмосферы для лета средних широт. Температура подстилающей поверхности во всех проводимых расчетах задавалась постоянной – 20 °С. Тип подстилающей поверхности соответствовал зеленой траве с альбедо и излучательной способностью, взятыми из базы данных ASTER [4]. Косинус зенитного угла Солнца задавался равным 0,58, что соответствует его оптимальному значению для расчетов планетарного альбедо [5].

Результаты расчетов приведены в таблице. Видно, что уменьшение общего содержания водяного пара в атмосфере с 2001 по 2014 г. снизило приходную часть радиационного баланса подстилающей поверхности примерно на 0,93 Вт/м². Эта величина более чем в 11 раз превышает приток к подстилающей поверхности длинноволнового излучения за счет увеличения концентрации CO₂ в атмосфере.

Оценки радиационных воздействий на подстилающую поверхность в солнечной (shortwave, SW) и тепловой (longwave, LW) областях спектра за счет вариаций содержания водяного пара (δ TCWV) и углекислого газа (δ CO₂) в атмосфере

Assessments of the radiation effects on the underlying surface in solar (shortwave, SW) and thermal (longwave, LW) spectral regions due to variations of the content of water vapor (δ TCWV) and carbon dioxide (δ CO₂) in the atmosphere

TCWV, mm	C _{GHG} , ppmv	δ _{TCWV} , mm	δ C _{GHG} , ppmv	δF_{sw} , W/m ²	δF_{LW} , W/m ²	δF_{Tot} , W/m ²
23,5	370	–2	0	2,887	–3,827	–0,938
23,5	397	–2	0	2,851	–3,782	–0,929
21,5	370	0	27	–0,136	0,223	0,087
23,5	370	0	27	–0,100	0,178	0,078

Примечания: C_{GHG} – концентрация углекислого газа (greenhouse gas); F_{sw}, F_{LW} и F_{Tot} – нисходящие потоки коротковолновой, длинноволновой и полной радиации на нижней границе атмосферы соответственно; δ – абсолютные вариации величин.

Note: C_{GHG} – carbon dioxide concentration (greenhouse gas); F_{sw}, F_{LW} and F_{Tot} – descending flows of shortwave, longwave and total radiation at the lower boundary of the atmosphere respectively; δ – absolute value variations.

Очевидно, что при наблюдаемой динамике TCWV в начале 2000-х годов результирующий радиационный форсинг на подстилающую поверхность должен был уменьшаться. Однако в действительности среднегодовая температура планеты в эти годы сохранялась практически постоянной, причем в летние месяцы даже наблюдался ее рост. Этот факт можно объяснить косвенными механизмами воздействия водяного пара на климат и, в частности, его взаимодействием с облаками.

Данные спутниковых наблюдений показывают, что оптическая толщина облаков в своей глобальной временной динамике повторяет ход TCWV с коэффициентом корреляции 0,74, но с задержкой в полгода. Наибольшее уменьшение оптической толщины облачного покрова (на величину ~0,031 в год) наблюдается в средних и субполярных широтах Северного полушария (рис. 3), что, по-видимому, связано с особенностями атмосферной циркуляции в рассматриваемые годы. Проведенный нами анализ типов атмосферной циркуляции по Дзердзеевскому показывает увеличение повторяемости и продолжительности арктических вторжений в Тихоокеанском секторе Северного полушария (170°E–120°W) с 1992 по 2013 г. Такие вторжения блокируют западный перенос воздушных масс влажного воздуха с Тихого океана на континенты Северного полушария. Блокирующие воздушные потоки с севера слабо обогащены влагой и, поступая на теплую континентальную поверхность, еще более удаляются от состояния насыщения. Уменьшение

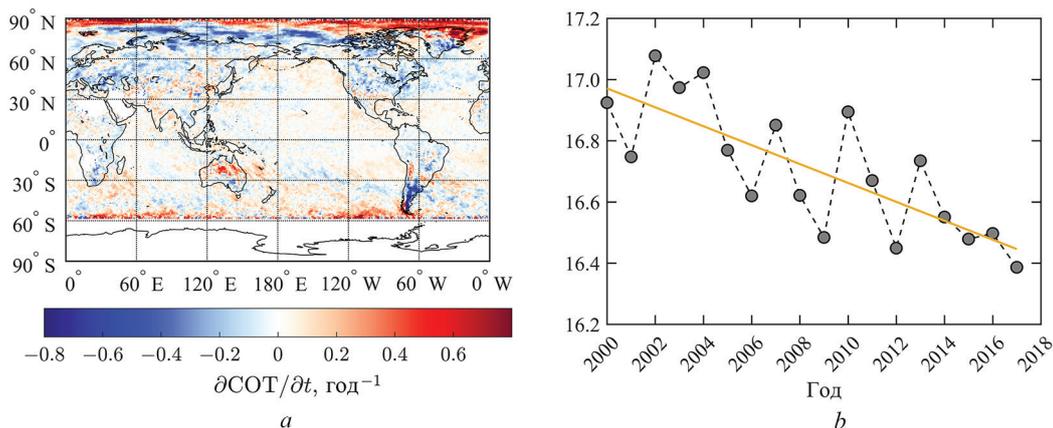


Рис. 3. Глобальное распределение тренда оптической толщины облачности в теплый период года Северного полушария (май–сентябрь) (а) и ее динамика в земном поясе между 30 и 75° с. ш. (b)

Fig. 3. Global distribution of the trend of the optical thickness of cloudiness during the warm season of the Northern hemisphere (May–September) (a) and its dynamics in the earth belt between 30 and 75° north latitude (b)

относительной влажности воздуха, очевидно, сказывается на общей облачности и ее оптической толщине.

Для количественных оценок влияния наблюдаемых изменений оптической толщины аэрозоля на радиационный баланс подстилающей поверхности проведены численные расчеты переноса излучения в атмосфере. В качестве опорных значений параметров облаков, используемых в радиационной модели атмосферы, приняты их средние значения для северных широт от 30 до 75° в теплый период года (с мая по сентябрь). Расчеты атмосферной радиации выполнялись для ряда среднегодовых значений оптической толщины облачности, концентраций CO_2 и водяного пара в атмосфере, наблюдаемых с начала текущего столетия.

Смоделированные значения среднегодовых аномалий приповерхностной температуры (с точностью до константы, задающей нулевой уровень) сопоставлены на рис. 4 с данными наблюдений для широтной зоны 30–75° с. ш.

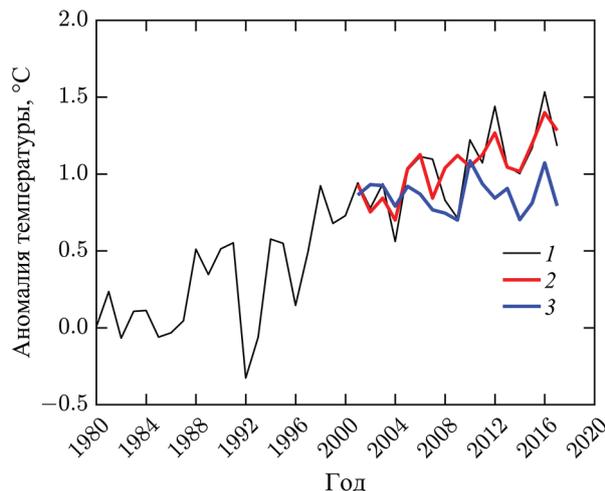


Рис. 4. Наблюдаемая (1) и смоделированная динамика аномалии приземной температуры воздуха в теплый период года для пояса Северного полушария, лежащего между 30 и 75° с. ш., без учета (2) и с учетом (3) изменений оптической толщины облаков

Fig. 4. Observed (1) and modeled dynamics of anomaly of the air ground temperature during the warm season for the belt of the North hemisphere between 30 and 75° north latitude, with no regard (2) and with regard (3) of changes in the optical thickness of clouds

При расчетах радиационного баланса подстилающей поверхности рассмотрено два сценария межгодовой динамики оптической толщины облачности: ее постоянство с 2000 г. и изменение в соответствии с данными спутниковых наблюдений, представленными на рис. 3, b. В первом случае модельные расчеты дают практически постоянную температуру с 2000 по 2017 г. Это говорит о том, что в средних и субполярных широтах Северного полушария потепление климата, связанное с антропогенными выбросами CO_2 в атмосферу, практически полностью компенсировалось противоположным по знаку радиационным эффектом от убывания содержания в атмосфере водяного пара (примерно на 0,043 мм/год для теплого периода года). Во втором случае модельные расчеты достаточно хорошо воспроизводят межгодовую изменчивость приземной температуры и дают ее линейный тренд, практически идентичный наблюдаемому ($\sim 0,029$ °C/год). При этом положительная ве-

личина этого тренда объясняется не эффектами парниковых газов, а динамикой оптической толщины облаков и ослаблением ими солнечного излучения, достигающего земной поверхности.

В зимние месяцы в Северном полушарии поток солнечного излучения ослаблен, а подстилающая поверхность часто покрыта снегом и отражает значительную часть падающего на нее излучения. В этих условиях приток к подстилающей поверхности солнечного излучения, связанный с уменьшением оптической толщины облаков, не компенсирует ее выхолаживание за счет уменьшения парникового эффекта водяного пара. В результате приповерхностная температура воздуха понижалась.

Заключение. Таким образом, на основании данных дистанционного зондирования Земли, компьютерного моделирования можно сделать вывод, что стабилизация температуры Земного шара в начале текущего столетия была результатом противоположно направленных радиационных воздействий на подстилающую поверхность, обусловленных естественной и взаимосвязанной динамикой содержания водяного пара в атмосфере и оптической толщины облаков. В Северном полушарии планеты зимние температуры приземного воздуха понижались в результате уменьшения парникового эффекта водяного пара, а летние температуры повышались за счет увеличения пропускания облаками солнечного излучения. Под влиянием этих процессов среднегодовая температура воздуха поддерживалась практически неизменной.

Список использованных источников

1. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus / M. H. England [et al.] // *Nat. Clim. Chang.* – 2014. – Vol. 4, N 3. – P. 222–227. <https://doi.org/10.1038/nclimate2106>
2. Surface warming hiatus caused by increased heat uptake across multiple ocean basins / S. S. Drijfhout [et al.] // *Geophys. Res. Lett.* – 2014. – Vol. 41, N 22. – P. 7868–7874. <https://doi.org/10.1002/2014gl061456>
3. Chen, X. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration / X. Chen, K.-K. Tung // *Science.* – 2014. – Vol. 345, N 6199. – P. 897–903. <https://doi.org/10.1126/science.1254937>
4. The ASTER Spectral Library Version 2.0 / A. M. Baldridge [et al.] // *Remote Sens. Environ.* – 2009. – Vol. 113, N 4. – P. 711–715. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.007>
5. Cronin, T. W. On the Choice of Average Solar Zenith Angle / T. W. Cronin // *J. Atmospheric Sci.* – 2014. – Vol. 71, N 8. – P. 2994–3003. <https://doi.org/10.1175/jas-d-13-0392.1>

References

1. England M. H., McGregor S., Spence P., Meehl G. A., Timmermann A., Cai W., Gupta A. S., McPhaden M. J., Purich A., Santoso A. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nature Climate Change*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 222–227. <https://doi.org/10.1038/nclimate2106>
2. Drijfhout S. S., Blaker A. T., Josey S. A., Nurser A. J. G., Sinha B., Balmaseda M. A. Surface warming hiatus caused by increased heat uptake across multiple ocean basins. *Geophysical Research Letters*, 2014, vol. 41, no. 22, pp. 7868–7874. <https://doi.org/10.1002/2014gl061456>
3. Chen X., Tung K.-K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. *Science*, 2014, vol. 345, no. 6199, pp. 897–903. <https://doi.org/10.1126/science.1254937>
4. Baldridge A. M., Hook S. J., Grove C. I., Rivera G. The ASTER Spectral Library Version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 2009, vol. 113, no. 4, pp. 711–715. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.007>
5. Cronin T. W. On the Choice of Average Solar Zenith Angle. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, vol. 71, no. 8, pp. 2994–3003. <https://doi.org/10.1175/jas-d-13-0392.1>

Информация об авторах

Лысенко Сергей Александрович – д-р физ.-мат. наук, заместитель директора. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lysenkorfe@gmail.com.

Логинов Владимир Федорович – академик, д-р географ. наук, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nature@ecology.basnet.by.

Ощепков Сергей Леонидович – д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sergey.http@gmail.com.

Information about the authors

Lysenko Sergey Alexandrovich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Deputy Director. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoryna Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lysenkorfe@gmail.com.

Loginov Vladimir Fedorovich – Academician, D. Sc. (Geography), Chief researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoryna Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nature@ecology.basnet.by.

Oshepkov Sergey Leonidovich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Chief researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoryna Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sergey.http@gmail.com.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

UDC 532.526.5

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-756-762>

Received 04.10.2018

Поступило в редакцию 04.10.2018

Yulia V. Zhukova¹, Aleksandr M. Terekh², Aleksandr I. Rudenko²¹*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*²*Igor Sikorsky National Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine***CONVECTIVE HEAT TRANSFER AND DRAG OF TWO SIDE-BY-SIDE TUBES
IN THE NARROW CHANNEL AT DIFFERENT REYNOLDS NUMBER***(Communicated by Academician Oleg G. Penyazkov)*

Abstract. We studied numerically and experimentally convective heat transfer and drag of two side-by-side tubes in different arrangements in the narrow channel at the Reynolds number ranging from 8000 to 40000 in comparison with circular tubes. The visualization results of the flow structure in the wake behind the arrangements of the investigated tubes are presented. It is shown that the thermal and hydraulic performance of side-by-side drop-shaped tubes is by a factor of 1.2–2 higher than that of circular tubes due to a lower drag of drop-shaped tubes.

Keywords: heat transfer, drag, side-by-side tubes, drop-shaped tubes, narrow channel, numerical simulation, flow visualization, thermal and hydraulic performance

For citation: Zhukova Yu. V., Terekh A. M., Rudenko A. I. Convective heat transfer and drag of two side-by-side tubes in the narrow channel at different Reynolds number. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 756–762. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-756-762>

Ю. В. Жукова¹, А. М. Терех², А. И. Руденко²¹*Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*²*Киевский политехнический институт им. И. Сикорского, Киев, Украина***КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОБМЕН И АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
ДВУХ РАСПОЛОЖЕННЫХ БОК О БОК ТРУБ В УЗКОМ КАНАЛЕ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА***(Представлено академиком О. Г. Пенязьковым)*

Аннотация. Проведено численное и экспериментальное исследование конвективного теплообмена и аэродинамического сопротивления двух расположенных бок о бок каплеобразных труб в различной компоновке, размещенных в узком канале в диапазоне чисел Рейнольдса от 8000 до 40000, в сравнении с трубами круглого сечения. Представлены результаты визуализации структуры течения в следе за компоновками исследуемых труб. Показано, что теплоаэродинамическая эффективность расположенных бок о бок капельных труб в 1,2–2 раза выше, чем у труб круглого сечения за счет более низкого аэродинамического сопротивления каплеобразных труб.

Ключевые слова: теплообмен, аэродинамическое сопротивление, расположение бок о бок труб, каплеобразные трубы, узкий канал, численное моделирование, визуализация потока, теплогидравлическая эффективность

Для цитирования: Жукова, Ю. В. Конвективный теплообмен и аэродинамическое сопротивление двух расположенных бок о бок труб в узком канале при различных числах Рейнольдса / Ю. В. Жукова, А. М. Терех, А. И. Руденко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 756–762. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-756-762>

Introduction. Since today the use of circular tubes without intensifiers, which can make additional aerodynamic drag, has exhausted itself, it is obvious that for the sake of increase in the performance of heat exchange devices and for the sake of improvement of their weight-and-size indicators, changing

the form of a cross section of a heat transfer surface based on a round tube will cause controlled flow to separate, the wake structure to change and, as a result, aerodynamic drag to reduce. To do this, non-circular tubes can find use, for example, these are flat-oval, drop-shaped, elliptic tubes, whose drag is by a factor of 1.5–2 less than that of circular tubes and whose heat transfer characteristics are close and, hence, have a higher thermal and hydraulic efficiency.

A very small number of works have been devoted to the study of drag of non-circular tubes and their banks. The known works in their majority contain the comparison results of single elliptic and circular tubes and are mainly concerned with the study of the influence of the tube cross section on drag and heat transfer [1; 2]. However the important factor influencing drag and heat transfer of tube banks are a tube distance and a distance from tubes to the wall of the working section. Therefore, the objective of the work to be presented herein was to obtain new results on convective heat transfer influenced by the location of two different-configuration side-by-side tubes in the narrow channel at the 0° angle of attack.

This work presents the numerical and experimental results on convective heat transfer and drag of two side-by-side tubes of different cross section in the narrow channel. The visualization results of the flow structure in the wake behind the arrangements of investigated tubes are also given.

Test model and task statement. An object of investigation (Fig. 1) is a pair of side-by-side circular tubes (Fig. 1, *a*) and drop-shaped tubes (Fig. 1, *b*), the latter being considered in three arrangements. In the first arrangement, drop-shaped tubes are in the flow on the side of the large diameter (Fig. 1, *b*); in the second arrangement, tubes are in the flow on the side of the small diameter (Fig. 1, *c*); in the third arrangement (mixed), one of the tubes is in the flow on the side of the large diameter and the other is in the flow on the side of the small diameter (Fig. 1, *d*).

The studies of the influence of both the distance from the channel wall to circular tubes and the tube distance on drag [3; 4] revealed three flow regimes. The first flow regime is realized within the tube distance range of $0.2–0.3D$ (D is the tube diameter); tubes are streamlined as one bluff body, generating one common vortex street. The second regime is within the tube distance range from $0.2–0.3D$ to $1.2–1.5D$; in this case, the asymmetric regime arises in the wake – the off-center flow separation causes one wide wake and one narrow wake to form behind cylinders. The third regime occurs within the tube distance

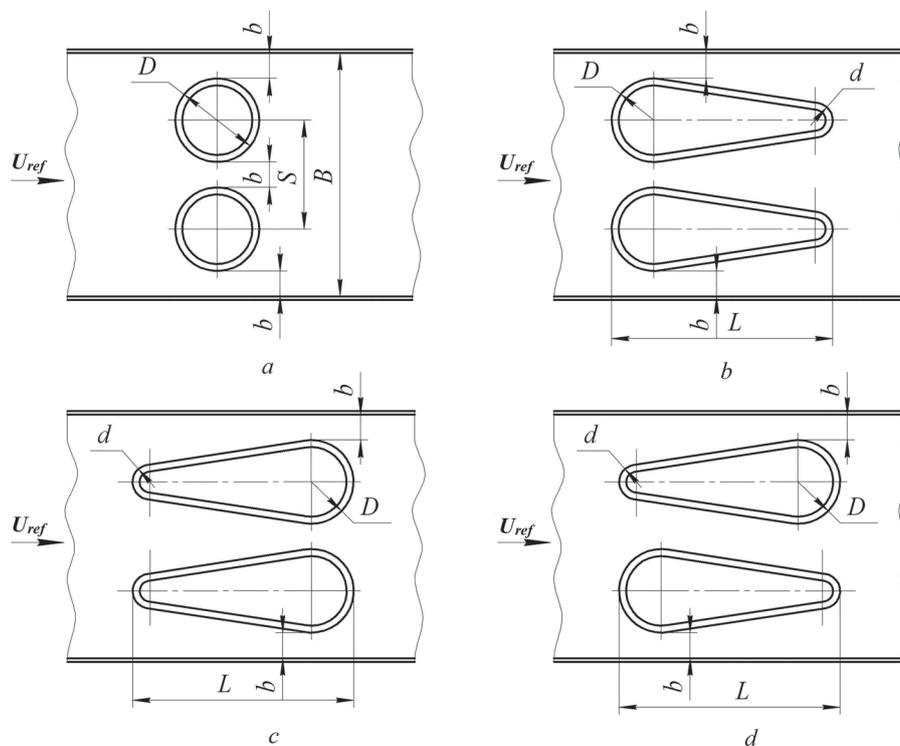
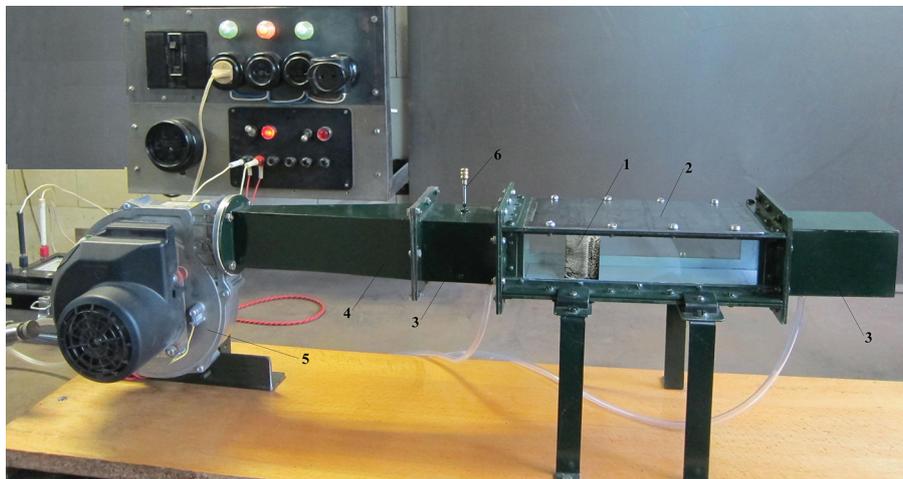


Fig. 1. Object of investigation: circular tubes (*a*), drop-shaped tubes in the flow on the side of the large diameter (*b*), drop-shaped tubes on the side of the small diameter (*c*), drop-shaped tubes when one of the tubes is streamlined on the side of the large diameter and the other – on the side of the small diameter (*d*)

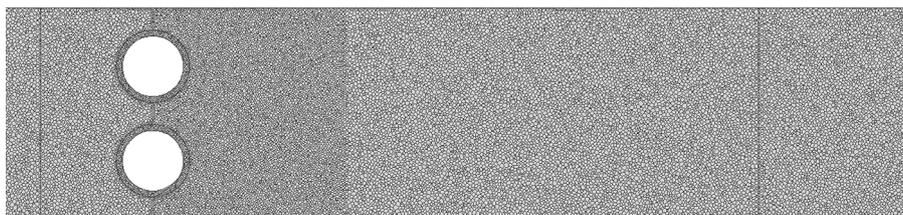
range of $1.2\text{--}1.5D$; within this regime, tubes are streamlined as two independent bluff bodies and behind them two independent vortex streets with the same vortex shedding frequency are formed. The present work studied the second flow regime for all arrangements

The channel blockage was $k_q = 0.69$ and in the case of mixed arrangement, $k_q = 0.54$. The drop-shaped tube profile length L (Fig. 1, *b–d*) was 51 mm, the large diameter $D = 24$ mm, and the small diameter $d = 10$ mm. For all-type tubes, the tube center distance S and the gap b between the tubes and the working section walls (with the exception of drop-shaped tubes of mixed arrangement were taken constant and equal to 31.3 and 7.3 mm, respectively, keeping a constant distance between the tube walls and the distance between the investigated tube walls and the working section walls.

Experiments on flow around two side-by-side tubes of different cross section in the narrow channel were performed in a closed-circuit wind tunnel with a rectangular working section of width $B = 70$ mm and height $A = 60$ mm (Fig. 2, *a*). The flow-through area was represented by a working section, comprising an investigated tube, two straight channels in front of and behind the working section, and a diffuser connected with one end to a fan outlet connection and with the other – to a straight channel. A maximum capacity of the fan was 0.085 m³/s. This made it possible to achieve a flow velocity up to 20 m/s in the free area of the working section.



a



b

Fig. 2. Experimental set-up (*a*): 1 – place of mounting objects of investigation; 2 – working section; 3 – straight channel; 4 – diffuser; 5 – fan; 6 – injector; computational grid fragments (*b*)

To level a velocity field and to reduce a turbulence degree at the working section inlet, the honeycomb with 1.2×1.2 mm cells was placed between the diffuser (4) and the straight channel (3). It served to break up large vortices and to form a system of small fast decaying vortices. The turbulence degree Tu behind the grid was determined by the Roach formula [5]

$$Tu \sim 0.8(x/d_{wr})^{-\frac{5}{7}},$$

where $x \approx 180$ mm is the distance from the grid to the investigated tubes; $d_{wr} = 0.3$ mm is the wire diameter. The calculation results of the flow turbulence degree at the working section inlet showed that it is close to 1%.

To visualize the structure of flow around two side-by-side tubes of different cross section, flow features at a different location of tubes to each other and processes occurring in the near wake in transverse flow around them, a device to inject a soot-kerosene suspension into the flow was mounted in the straight channel. The methods to visualize flow by means of a soot-kerosene suspension were detailed in [6].

For numerical simulation to be made, the three-dimensional statement of the task was set. Geometric sizes of tubes were selected from the condition of matching with experiment. Computational domain sizes were $0.06 \text{ m} \times 0.07 \text{ m} \times 0.447 \text{ m}$. Computation was made on an unstructured 3D grid composed of polyhedral elements. In the 3D grid, we selected an area with a structured grid around a tube to describe the boundary layer. Fig. 2, *b* illustrates the computational domain fragments. The total power of the grid was about 10 mln cells.

We solved the steady Reynolds-averaged Navier–Stokes equations, the continuity equation and the energy equation [7]. The Reynolds equations were closed using Menter's $\kappa\text{-}\omega$ shear stress transport model in standard statement [7].

An incoming flow velocity U_{ref} , an incoming flow temperature T_{ref} , a turbulence level Tu and a hydrodynamic diameter d_{hyd} matched with experiment conditions were assigned at the computational domain inlet. A constant heat flux was predetermined at the inner surface of tubes; outflow boundary conditions – at the exterior boundary; channel walls were assumed to be smooth and thermally insulated, no-slip conditions were implemented at the walls.

The verification of the computational algorithm using different experimental data is described elsewhere in [8–11]. There, it was shown that the error of numerical simulation results does not exceed 12 % in comparison to experiment.

Results and discussion. Figs. 3–4 demonstrate the numerical and experimental results. The similarity numbers – the Reynolds number $Re_D = \frac{U_{ref} D}{\nu}$, the Euler number $Eu = \frac{\Delta p}{\rho_{ref} U_{ref}^2}$ and the Nusselt number $Nu_D = \frac{\alpha D}{\lambda}$ were formulated using an air density ρ_{ref} , a flow velocity U_{ref} at the inlet of the working section of the channel and a large diameter of a drop-shaped tube equal to a circular tube diameter D as defining values.

The arrangement of circular tubes (Fig. 3, *a*) exhibits the largest drag, while the mixed arrangement of drop-shaped tubes (Fig. 3, *a*) – the smallest drag. This can be attributed to the case when the channel is not heavily blocked ($k_q = 0.54$) in comparison to other arrangements. In terms of heat transfer, circular tubes continue to be most efficient; all the considered arrangements of drop-shaped tubes are very close in total heat transfer (Fig. 3, *b*). However the thermal and hydraulic performance $\xi = \frac{(Nu_{drop}/Nu_{cir})}{(Eu_{drop}/Eu_{cir})}$

of drop-shaped tubes (Fig. 3, *c*) in any arrangement exceeds that of circular tubes.

Comparing the arrangements of drop-shaped tubes by drag, it can be emphasized that a bank of drop-shaped tubes in the flow on the side of the small diameter (Fig. 3, *a*) has the largest drag. This can be explained as follows: when drop-shaped tubes are in the flow on the side of the small diameter, the flow encounters an obstacle – a drop-shaped tube – having a small rounding radius. Further, moving along the drop-shaped tube the flow enters a convergent channel formed by the drop-shaped tube wall, the velocity increasing and the pressure decreasing. In the rear part of drop-shaped tubes the flow is separated and the rear part of drop-shaped tubes is streamlined in the same manner as in the case

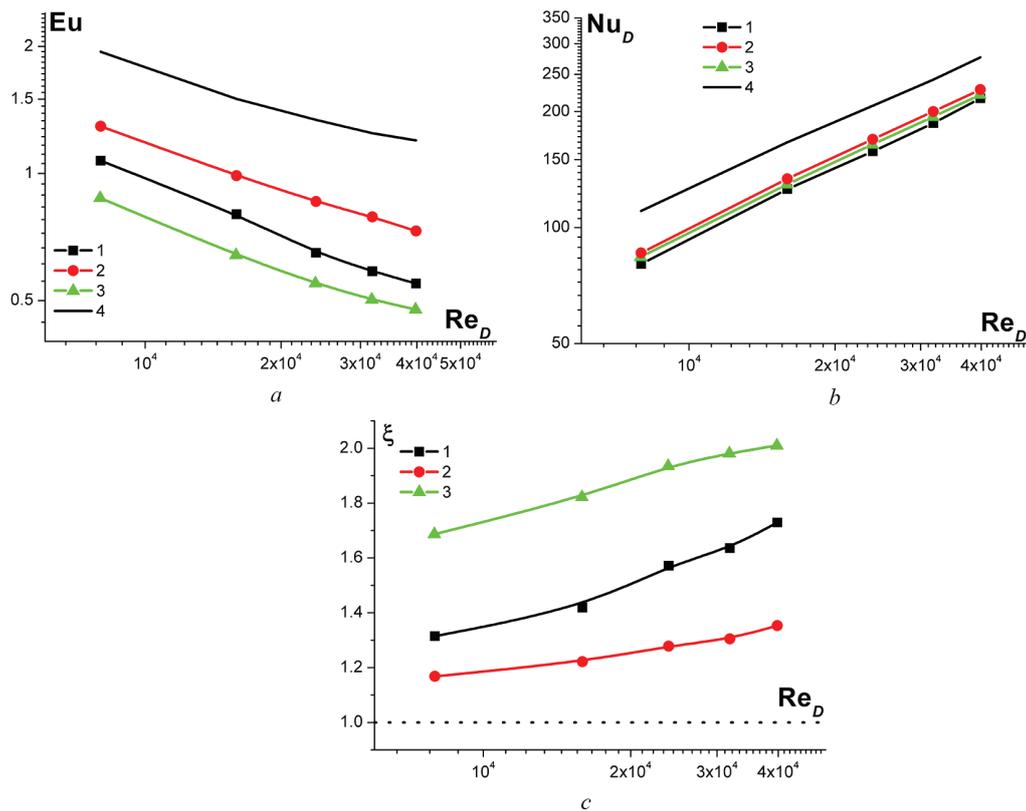


Fig. 3. Hydraulic losses (a), total heat transfer (b), thermal and hydraulic efficiency (c) of the investigated tubes: 1 – pair of side-by-side drop-shaped tubes streamlined on the side of the large diameter; 2 – pair of side-by-side drop-shaped tubes streamlined on the side of the small diameter; 3 – mixed arrangement; 4 – pair of side-by-side circular tubes

of circular tubes. Owing to this, behind the drop-shaped tube streamlined on the side of the small diameter, a wide recirculation zone (Fig. 4, a) is formed. All the above facts show that drag grows. The experimental data for flow structure visualization (Fig. 4, a) support the fact that asymmetric structures appear in the wake behind drop-shaped tubes.

In flow around a pair of drop-shaped tubes on the side of the large diameter, the frontal part of each of the tubes is streamlined as in the case of circular tubes. The flow then enters the divergent channel – a peculiar diffuser formed by the wall of the both tubes, the pressure increasing and the velocity decreasing. As mentioned in [12], diffuser losses can be up to 30 % of all hydraulic losses. Moreover, the flow can be separated in the diffuser and separation zones can be formed near the edges of the diffuser. Thus, beyond the diffuser, the flow is injected into the near wake and separation is formed in the rear part of drop-shaped tubes (Fig. 4, b). Since separation is formed over the section of small-diameter tubes, the separation zone width is not large and the jet injection from the diffuser into the near wake decreases drag. It should be noted that for some velocity regimes, two separation zones can merge into one common zone downstream (Fig. 4, b) at $Re_D = 15940$. This can be attributed to the fact that in diffusers, even at small angles of expansion the flow at some distance from the inlet can be separated at the wall [12]. This circumstance can affect the recirculation zone behind the pair of drop-shaped tubes.

In the mixed arrangement, the asymmetric near wake is formed (Fig. 4, c) first due to the asymmetric location of the drop-shaped walls relative to the channel asymmetry and second due to the formation of a wide wake behind the drop-shaped tube streamlined on the side of the small diameter. The formed wide wake suppresses the narrow wake that had formed behind the drop-shaped tube streamlined on the side of the large diameter. The wake asymmetry causes the flow to separate at the channel wall.

As mentioned above [3; 4], flow around a pair of circular tubes occurs simultaneously with the asymmetric wake formation (Fig. 4, d). It should be noted that a difference in heat transfer of the pair of the considered circular tubes can achieve up to 7 %.

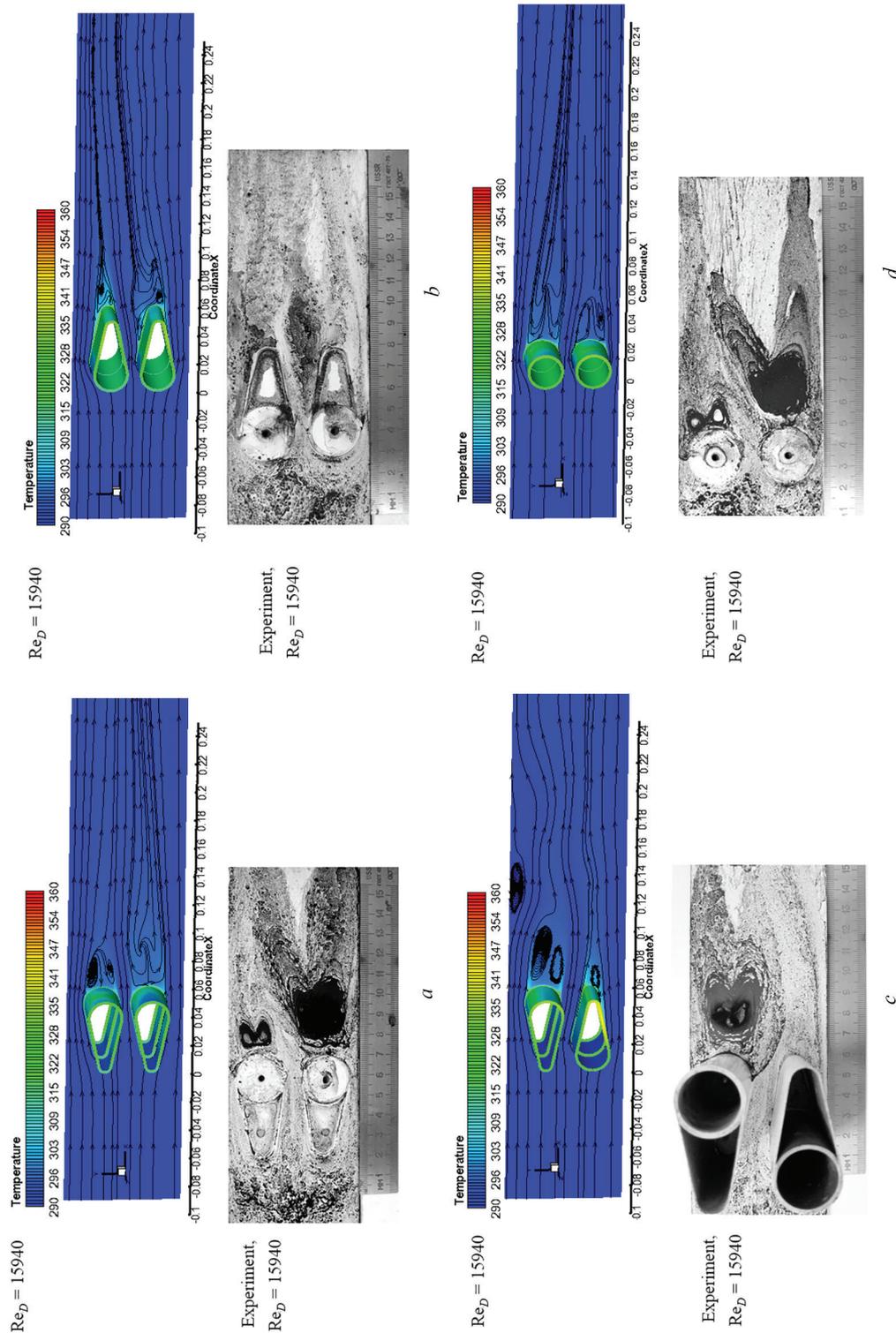


Fig. 4. Structure of flow around a pair of side-by-side tubes depending on the incoming flow velocity: pair of side-by-side drop-shaped tubes streamlined on the side of the large diameter (a); pair of side-by-side drop-shaped tubes streamlined on the side of the small diameter (b); mixed arrangement (c); pair of side-by-side circular tubes (d)

Conclusion. We studied numerically and experimentally convective heat transfer and drag of two side-by-side tubes in different arrangements in the narrow channel at the Reynolds number ranging from 8000 to 40000 in comparison with circular tubes. The visualization results of the flow structure in the wake behind the arrangements of the investigated tubes are presented. It is shown that the thermal and hydraulic performance of side-by-side drop-shaped tubes is by a factor of 1.2–2 higher than that of circular tubes due to a lower drag of drop-shaped tubes.

Acknowledgement. The work has been done under financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research on the Project No F18R-035

References

1. Hasan Ala. Thermal-hydraulic performance of oval tubes in a cross-flow of air. *Heat and Mass Transfer*, 2005, vol. 41, no. 8, pp. 724–733. <https://doi.org/10.1007/s00231-004-0612-7>
2. Terukazu O., Nishiyama H., Taoka Y. Heat transfer and flow around an elliptic cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1984, vol. 27, no. 10, pp. 1771–1779. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(84\)90159-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(84)90159-5)
3. Alam Md. M., Moriya M., Sakamoto H. Aerodynamic characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon. *Journal of Fluids and Structures*, 2003, vol. 18, no. 3–4, pp. 325–346. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2003.07.005>
4. Alam Md. M., Zhou Y. Flow around two side-by-side closely spaced circular cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 2007, vol. 23, no. 5, pp. 799–805. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2006.12.002>
5. Roach P. E. The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1987, vol. 8, no. 2, pp. 82–92. [https://doi.org/10.1016/0142-727x\(87\)90001-4](https://doi.org/10.1016/0142-727x(87)90001-4)
6. Rudenko A. I., Terekh A. M., Semenyako A. V., Nishchik A. P., Baranyuk A. V. The method of the gas flow visualizing on the body's surface of different shapes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2011, vol. 1, no. 9(49), pp. 51–55 (in Russian).
7. Ansys Fluent. Pennsylvania, Ansys Inc., 2011. 11 p. Available at: <http://www.ansys.com> (Accessed 2 December 2018).
8. Zhukova Yu. V., Terekh A. M., Semenyako A. V. Numerical simulation of unsteady cross-flow past an oval cylinder at various Reynolds numbers. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2011, vol. 55, no. 1, pp. 102–107 (in Russian).
9. Terekh M., Rudenko A. I., Zhukova Y. V. Aerodynamic drag to flows about single drop-like tubes and visualization of these flows. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 2, pp. 378–384. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0844-9>
10. Kondratyuk V. A., Semenyako A. V., Terekh A. M., Rudenko A. I., Zhukova Yu. V. Heat transfer and aerodynamics of single oval-flat tubes. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezultaty, tekhnologii = Modern Science: Studies, Ideas, Technologies*, 2013, no. 1 (12), pp. 3–6
11. Skrypnik A. N., Shchelchikov A. V., Popov I. A., Ryzhkov D. V., Sverchkov S. A., Zhukova Yu. V., Chorny A. D., Zubkov N. N. Thermohydraulic Efficiency of Tubes with Internal Spiral Finning. *Journal of Engineering Physics and Thermal Physics*, 2018, vol. 91, no. 1, pp. 52–63. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1718-y>
12. Povkh I. L. *Aerodynamic experiment in mechanical engineering*. Leningrad, 1974. 480 p. (in Russian).

Information about the authors

Zhukova Yulia Vladimirovna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: julia_zhukova@rambler.ru.

Terekh Aleksandr Mikhailovich – Ph. D. (Engineering), Senior researcher. Igor Sikorsky National Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute” (37, Pobedy Ave., 03056, Kiev, Ukraine). E-mail: teram1957@meta.ua.

Rudenko Aleksandr Igorevich – Ph. B. (Engineering), Associate professor. Igor Sikorsky National Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute” (37, Pobedy Ave., 03056, Kiev, Ukraine). E-mail: a_rudenko@ukr.net.

Информация об авторах

Жукова Юлия Владимировна – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: julia_zhukova@rambler.ru.

Терех Александр Михайлович – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник. Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского (пр. Победы, 37, 03056, Киев, Украина). E-mail: teram1957@meta.ua.

Руденко Александр Игоревич – канд. техн. наук, доцент. Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского (пр. Победы, 37, 03056, Киев, Украина). E-mail: a_rudenko@ukr.net.

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 621.396.98
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-763-768>

Поступило в редакцию 29.05.2018
Received 29.05.2018

Член-корреспондент С. М. Костромицкий¹, А. П. Шумский², И. Н. Давыденко¹

¹*Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

²*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь*

СТРУКТУРЫ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АВТОКОМПЕНСАТОРОВ МЕШАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ГРАДИЕНТНОГО ТИПА

Аннотация. Путем последовательных преобразований математической модели и структуры классического автокомпенсатора мешающих излучений (АКМИ) градиентного типа получены математическая модель и структура АКМИ градиентного типа с предпроцессором и стабилизацией быстродействия. Быстродействие полученной структуры АКМИ не зависит от распределения собственных значений корреляционной матрицы сигналов входных помех.

Ключевые слова: градиентный автокомпенсатор мешающих излучений, математическая модель, предпроцессор, стабилизация быстродействия

Для цитирования: Костромицкий, С. М. Структуры и математические модели автокомпенсаторов мешающих излучений градиентного типа / С. М. Костромицкий, А. П. Шумский, И. Н. Давыденко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 763–768. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-763-768>

Corresponding Member Sergei M. Kostromitski¹, Aleksey P. Shumski², Igor N. Davydenka¹

¹*Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

STRUCTURE AND MATHEMATICAL MODEL OF GRADIENT JAMMER CANCELLERS

Abstract. In the article, using subsequent transformations of the structure and mathematical model of a classic gradient jammer canceller, the mathematical model and the structure of a gradient jammer canceller with a pre-processor are obtained. A new structure provides that the adaptation speed of a canceller does not depend on the spread of the eigenvalues of the input signal correlation matrix. An intermediate model provides the analysis of weight misadjustment of the classic gradient jammer canceller. The aim of the new mathematical model is a subsequent analysis of weight misadjustment of the jammer canceller with a stable adaptation speed.

Keywords: gradient jammer canceller, mathematical model, pre-processor, stable adaptation speed

For citation: Kostromitski S. M., Shumski A. P., Davydenka I. N. Structure and mathematical model of gradient jammer cancellers. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 763–768 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-763-768>

Введение. Известно, что в классических автокомпенсаторах мешающих излучений (АКМИ) градиентного типа при большом разбросе собственных значений корреляционной матрицы помех возникают трудности, связанные с медленной сходимостью алгоритмов [1]. Это происходит тогда, когда наряду с сигналом от источника сильных помех появляются сигналы от источников слабых помех или когда два источника помех близко расположены [1].

Одним из способов получения быстрой сходимости является преобразование входных сигналов. Для такого преобразования предлагаются предпроцессоры, обеспечивающие разложение входных сигналов на главные компоненты (проекции вектора входных сигналов на собственные векторы корреляционной матрицы) [1]. Корреляционная матрица преобразованных сигналов будет тогда диагональной, а ее диагональные элементы будут равны собственным значениям корреляционной матрицы входных сигналов. Если затем учесть различные собственные значения, то можно обеспечить независимость сходимости алгоритма адаптации от их разброса. В данном сообщении АКМИ со стабилизацией быстродействия и предпроцессором получен путем последовательного преобразования классического АКМИ градиентного типа.

Математическая модель классического многоканального АКМИ. Система дифференциальных уравнений, описывающая работу классического многоканального АКМИ (рис. 1), имеет следующий вид (в качестве цепей сглаживания сигнала ошибки для простоты рассмотрения будем использовать идеальный интегратор) [2]:

$$\frac{1}{K_V} \frac{d\mathbf{W}}{dt} = \mathbf{U}_{\text{co}} = -K_{\text{п}} \mathbf{E}^* \{E_0(t) + \mathbf{E}^T(t) \mathbf{W}\}, \quad (1)$$

где K_V – коэффициент преобразования интегратора; $K_{\text{п}}$ – коэффициент передачи цепей корреляционной обратной связи по мощности; $\mathbf{W} = \{W_1, W_2, W_3, \dots, W_N\}^T$ – вектор-столбец комплексных весовых коэффициентов; $\mathbf{E} = \{E_1, E_2, E_3, \dots, E_N\}^T$ – вектор-столбец комплексных амплитуд сигналов, принятых компенсационными каналами; \mathbf{U}_{co} – вектор-столбец комплексных сигналов ошибок измерения весовых коэффициентов; «*» – символ комплексного сопряжения; «T» – символ транспонирования.

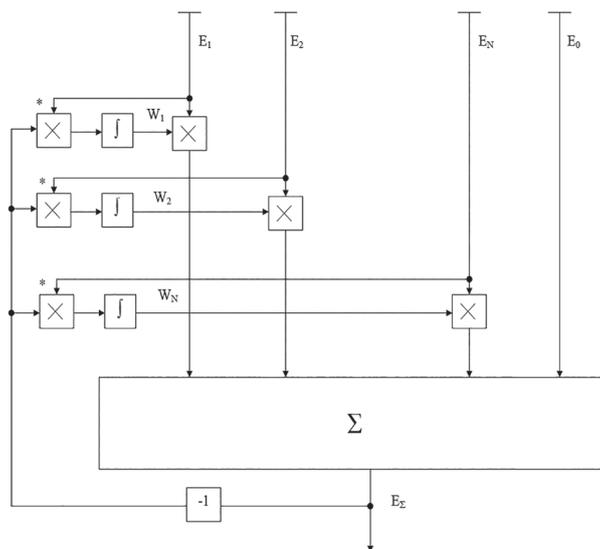


Рис. 1. Структурная схема классического АКМИ

Fig. 1. Normal jammer canceller block diagram

После усреднения (1) примет следующий вид [2]:

$$\frac{1}{K_V} \frac{d\mathbf{W}}{dt} = \mathbf{K}_{\text{д}} (\mathbf{W}_{\text{зад}} - \mathbf{W} + \boldsymbol{\eta}(t)), \quad (2)$$

где $\mathbf{K}_{\text{д}} = K_{\text{п}} \mathbf{R}$ – матрица крутизны многомерного дискриминатора весовых коэффициентов; $\mathbf{W}_{\text{зад}} = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{R}_0$ – задающее воздействие измерителя; $\mathbf{R} = \mathbf{E}^* \mathbf{E}^T$ – корреляционная матрица сигналов, принятых компенсационными каналами; $\mathbf{R}_0 = E_0 \mathbf{E}^*$ – вектор корреляции сигналов, принятых основным и компенсационными каналами; $\boldsymbol{\xi}(t) = \mathbf{U}_{\text{co}}(t) - \overline{\mathbf{U}_{\text{co}}(t)}$ – вектор случайных составляющих сигнала ошибки; $\boldsymbol{\eta}(t) = \mathbf{K}_{\text{д}}^{-1} \boldsymbol{\xi}(t)$ – случайное возмущающее воздействие измерителя; $\{\}$ – операция усреднения.

Удвоенная мощность остатков помехи на выходе АКМИ с учетом ошибок самонастройки ($\mathbf{W} = \mathbf{W}_{\text{зад}} + \Delta \mathbf{W}$) описывается выражением [2]

$$2\sigma_{\Sigma}^2 = \overline{[E_0 + (\mathbf{W}_{\text{зад}}^T + \Delta \mathbf{W}^T) \mathbf{E}][E_0 + \mathbf{E}^T (\mathbf{W}_{\text{зад}} + \Delta \mathbf{W})]^*} = 2\sigma_{\Sigma \min}^2 + 2\sigma_{\Sigma \Delta W}^2,$$

где $2\sigma_{\Sigma \min}^2 = 2\sigma_0^2 - \mathbf{R}_0^+ \mathbf{R}^{-1} \mathbf{R}_0$ – минимальная удвоенная мощность остатков помехи на выходе автокомпенсатора; $2\sigma_{\Sigma \Delta W}^2 = \Delta \mathbf{W}^+ \mathbf{R} \Delta \mathbf{W}$ – составляющая удвоенной мощности остатков помехи на выходе автокомпенсатора, обусловленная ошибками самонастройки; «+» – символ эрмитова сопряжения.

Полагая сигналы помех в каналах приема гауссовыми случайными процессами с нулевыми средними и используя выражения для моментов четвертого порядка [1; 3], можно получить выражение для матрицы эквивалентной спектральной плотности случайного возмущающего воздействия измерителя весовых коэффициентов [2]:

$$\mathbf{S}_{\text{эkv}} = \mathbf{S}_{\eta} = \mathbf{S}_{\eta}(\omega) \Big|_{\omega=0} = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{R}_{\eta}(\tau) d\tau = \frac{K_{\Pi} 2\sigma_{\Sigma}^2}{\beta \Delta f_{\text{ш}}} (\mathbf{K}_{\text{д}}^{\text{T}})^{-1}, \quad (3)$$

где $\Delta f_{\text{ш}} = \left(\int_{-\infty}^{\infty} r(\tau) d\tau \right)^{-1}$ – ширина спектра помехи; $\beta = \int_{-\infty}^{\infty} r(\tau) d\tau / \int_{-\infty}^{\infty} r^2(\tau) d\tau$ – постоянный коэффициент;

$\mathbf{R}_{\eta}(\tau) = \overline{\boldsymbol{\eta}^*(t)\boldsymbol{\eta}^{\text{T}}(t-\tau)}$ – матрица корреляционных функций случайного возмущающего воздействия; $r(\tau)$ – нормированная корреляционная функция помехи; $2\sigma_{\Sigma}^2 = \overline{|E_{\Sigma}(t)|^2} = \overline{|E_0(t) + \mathbf{W}^{\text{T}}\mathbf{E}(t)|^2}$ – удвоенная мощность остатков компенсации помехи.

Математическая модель классического многоканального АКМИ в эквивалентном базисе. Анализ характеристик многомерной следящей системы вида (2) является сложным по той причине, что в общем случае матрица $\mathbf{K}_{\text{д}}$ является недиагональной. Для преодоления этой трудности проводится матричное преобразование над исходными векторными переменными $(\mathbf{W}, \mathbf{E}, \boldsymbol{\eta})$ [1]. Так как матрица $\mathbf{K}_{\text{д}}$ является положительно определенной эрмитовой матрицей, она может быть представлена в виде [3]

$$\mathbf{K}_{\text{д}} = K_{\Pi} \mathbf{R} = K_{\Pi} \mathbf{U} \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{U}^+, \quad (4)$$

где $\mathbf{U} = [\mathbf{G}_{1\text{н}}, \mathbf{G}_{2\text{н}}, \dots, \mathbf{G}_{N\text{н}}]$ – квадратная матрица, столбцами которой являются нормированные собственные векторы матрицы \mathbf{R} ; $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ – диагональная матрица с элементами главной диагонали, равными собственным значениям матрицы \mathbf{R} .

Представление матрицы \mathbf{R} через унитарную и диагональную матрицы эквивалентно некоторому преобразованию над вектором входных сигналов \mathbf{E} , в результате чего составляющие нового вектора \mathbf{E}' не коррелированы между собой и имеют удвоенные мощности, равные соответствующим собственным значениям матрицы \mathbf{R} : $\boldsymbol{\Lambda} = \mathbf{U}^+ \mathbf{R} \mathbf{U} = \mathbf{U}^+ \mathbf{E}'^* \mathbf{E}' \mathbf{U} = \overline{\mathbf{E}'^* \mathbf{E}'^{\text{T}}} = \mathbf{R}'$ или $\mathbf{E}' = \mathbf{U}^{\text{T}} \mathbf{E}$.

С учетом (4) система дифференциальных уравнений (2) преобразуется к следующему виду с диагональной матрицей крутиз $K_{\Pi} \boldsymbol{\Lambda}$ [2]:

$$\frac{1}{K_{\text{V}}} \frac{d\mathbf{W}'}{dt} = K_{\Pi} \boldsymbol{\Lambda} (\mathbf{W}'_{\text{зад}} + \boldsymbol{\eta}'(t) - \mathbf{W}'), \quad (5)$$

где $\mathbf{W}' = \mathbf{U}^+ \mathbf{W}$; $\mathbf{W}'_{\text{зад}} = \mathbf{U}^+ \mathbf{W}_{\text{зад}}$; $\boldsymbol{\eta}' = \mathbf{U}^+ \boldsymbol{\eta}$.

Таким образом, (2) свелось к набору независимых дифференциальных линейных уравнений первого порядка, анализ выходных характеристик которых известен [4]. При необходимости вернуться к исходным векторам $\mathbf{W}, \boldsymbol{\eta}$ пользуются обратными преобразованиями [1]:

$$\mathbf{W} = \mathbf{U} \mathbf{W}', \quad \boldsymbol{\eta} = \mathbf{U} \boldsymbol{\eta}'. \quad (6)$$

Переход к преобразованным входным сигналам E' и весовым коэффициентам W' не приведет к изменению выходного эффекта автокомпенсатора [1]

$$\mathbf{W}'^{\text{T}} \mathbf{E}' = \mathbf{W}^{\text{T}} \mathbf{U}^* \mathbf{U}^{\text{T}} \mathbf{E} = \mathbf{W}^{\text{T}} \mathbf{E} = E_{\Sigma}. \quad (7)$$

Структурная схема автокомпенсатора в эквивалентном базисе может быть представлена в виде, приведенном на рис. 2.

Выражение (7) дает основание представить составляющую мощности остатков помехи на выходе классического АКМИ, обусловленную ошибками самонастройки, в более удобном эквивалентном базисе

$$2\sigma_{\Sigma \Delta W}^2 = \Delta \mathbf{W}^+ \mathbf{R} \Delta \mathbf{W} = \Delta \mathbf{W}'^+ \boldsymbol{\Lambda} \Delta \mathbf{W}' = \sum_{i=1}^N \lambda_i |\Delta W'_i|^2.$$

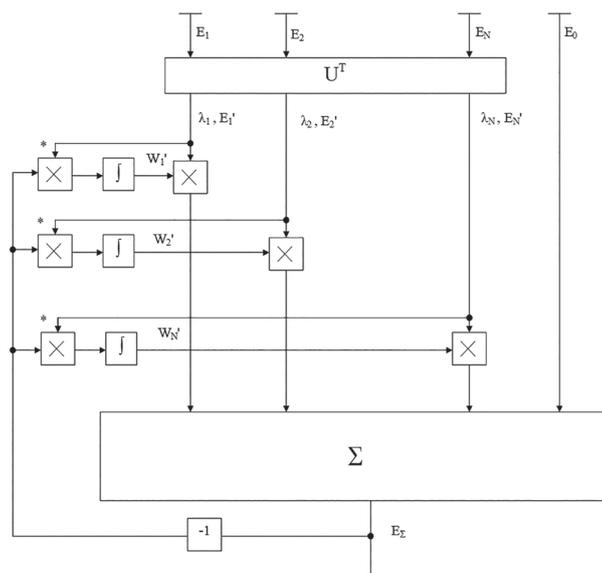


Рис. 2. Структурная схема классического АКМИ в эквивалентном базисе

Fig. 2. Normal jammer canceller equivalent block diagram

Матрица спектральной плотности возмущающего воздействия в эквивалентном базисе имеет диагональный вид и описывается выражением [2]

$$\mathbf{S}'_{\text{эКВ}} = \mathbf{S}_{\eta'} = \frac{2\sigma_{\Sigma}^2}{\beta\Delta f_{\text{ш}}} \mathbf{\Lambda}^{-1}. \quad (8)$$

Математическая модель АКМИ со стабилизацией быстрогодействия. Заметим, что структуру АКМИ на рис. 2 можно рассматривать не только с точки зрения математической модели, обеспечивающей анализ характеристик классического АКМИ, но и как самостоятельную структуру, которая может быть реализована и подвержена последующей модификации.

В частности, на рис. 3 представлен вариант структуры АКМИ, в котором обеспечивается выравнивание динамических характеристик отдельных контуров самонастройки за счет введения в цепи интегрирования сигналов ошибок нормирующих множителей $\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_i}$. Предполагается, что имеется информация о собственных векторах и собственных значениях корреляционной матрицы помех R , алгоритмы получения которых в данном сообщении не обсуждаются (априорная информация; численный анализ оценочной корреляционной матрицы \hat{R} ; использование предпроцессора Нолен [1]; усреднение выходных сигналов предпроцессора).

Введение нормирующих множителей $\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_i}$ приведет к тому, что система дифференциальных уравнений (5) изменится следующим образом:

$$\frac{1}{K_V} \frac{d\mathbf{W}'}{dt} = K_{\Pi} \lambda_{\Sigma} \mathbf{I} (\mathbf{W}'_{\text{зад}} + \boldsymbol{\eta}'(t) - \mathbf{W}'), \quad (9)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица.

Таким образом, получен набор дифференциальных линейных уравнений, не только не связанных между собой, но и имеющих одинаковую крутизну дискриминационной характеристики $K_{\Pi} \lambda_{\Sigma}$. Выражения для вектора задающего воздействия $\mathbf{W}'_{\text{зад}}$ и матрицы спектральной плотности возмущающего воздействия $\mathbf{S}'_{\text{эКВ}}$ не изменились и описываются выражениями (5) и (8) соответственно, так как цепи формирования сигналов ошибок не изменились. После применения обратного преобразования (6) к (9) получим эквивалентную математическую модель

$$\frac{1}{K_V} \frac{d\mathbf{W}}{dt} = K_{\Pi} \lambda_{\Sigma} \mathbf{I} (\mathbf{W}_{\text{зад}} + \boldsymbol{\eta}(t) - \mathbf{W}). \quad (10)$$

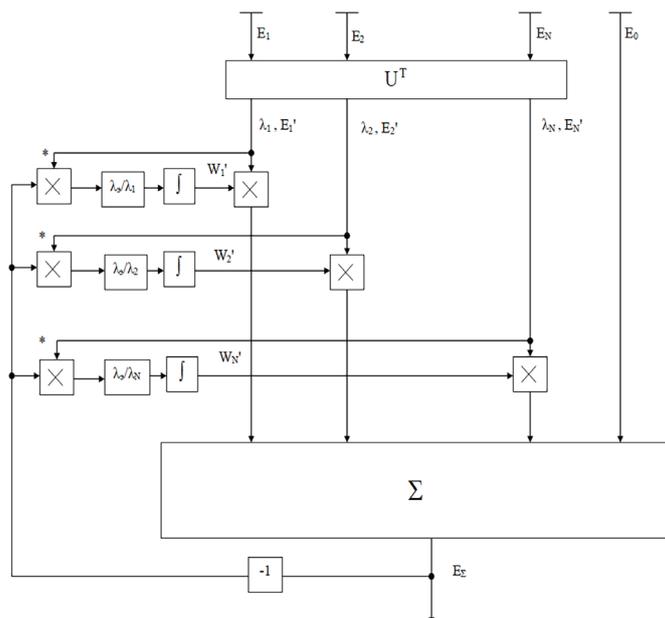


Рис. 3. Структурная схема АКМИ со стабилизацией быстродействия
 Fig. 3. Stable adaptation speed jammer canceller block diagram

Заметим, что в соответствии с (10) полученная математическая модель в отличие от математической модели (3) классического АКМИ отличается только заменой матрицы крутизны с $\mathbf{K}_d = \mathbf{K}_n \mathbf{R}$ на матрицу $\mathbf{K}_d = \mathbf{K}_n \lambda \mathbf{I}$, что соответствует также и структуре АКМИ на основе использования алгоритма Ньютона [5].

Заключение. Таким образом, в сообщении путем последовательных преобразований структуры и математической модели классического АКМИ градиентного типа получены структура и математическая модель АКМИ градиентного типа со стабилизацией быстродействия, предполагающие использование предпроцессора для сигналов компенсационных каналов. В полученной структуре быстродействие АКМИ не зависит от распределения собственных значений корреляционной матрицы помех. Полученная математическая модель справедлива и для АКМИ, реализующего алгоритм Ньютона. Целью дальнейших исследований может являться исследование ошибок самонастройки различных АКМИ с использованием разработанной математической модели.

Список использованных источников

1. Монзинго, Р. А. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию: пер. с англ. / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер. – М., 1986. – 448 с.
2. Костромицкий, С. М. Математическая модель многоканального автокомпенсатора помех / С. М. Костромицкий, И. Н. Давыденко, А. А. Дятко // Электроника-инфо. – 2010. – № 3. – С. 64–66.
3. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М., 1974. – 832 с.
4. Охрименко, А. Е. Теоретические основы радиолокации / А. Е. Охрименко, О. А. Олейников. – Минск, 1976. – 606 с.
5. Уидроу, Б. Адаптивная обработка сигналов: пер. с англ. / Б. Уидроу, С. Стирнз. – М., 1989. – 440 с.

References

1. Monzingo R. A., Miller T. U. *Introduction to adaptive arrays*. Moscow, 1986. 448 p. (in Russian).
2. Kostromitskiy S. M., Davyidenko I. N., Dyatko A. A. Mathematical model of a multi-channel jammer canceller. *Elektronika-info*, 2010, no. 3, pp. 64–66.
3. Korn G., Korn T. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. Moscow, 1974. 832 p. (in Russian).
4. Ohrimenko A. E., Oleynikov O. A. *Theoretical basis of radar*. Minsk, 1976. 606 p. (in Russian).
5. Uidrou B., Stirnz S. *Adaptive Signal Processing*. Moscow, 1989. 440 p. (in Russian).

Информация об авторах

Костромицкий Сергей Михайлович – член-корреспондент, д-р техн. наук, профессор, директор. Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси (220072, ул. П. Бровки, 15/5, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sleus@abv.bg.

Шумский Алексей Петрович – соискатель. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (6, ул. П. Бровки, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shumsky.aleksey@gmail.com.

Давыденко Игорь Николаевич – канд. техн. наук, доцент, ученый секретарь. Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15/5, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: igord1@tut.by.

Information about the authors

Kostromitski Sergei Mikhailovich – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Director. Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus (15/5, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sleus@abv.bg.

Shumski Aleksey Petrovich – Postgraduate student. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shumsky.aleksey@gmail.com.

Davydzenka Igor Nikolaevich – Ph. D (Engineering), Associate professor, Scientific Secretary. Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus (15/5, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igord1@tut.by.