

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

МИНСК. БЕЛОРУССКАЯ НАУКА. 2017. ТОМ 61. № 2

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

В. Г. Гусаков

Председатель Президиума Национальной академии наук Беларуси

Редакционная коллегия

С. А. Чижик

первый заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси

(заместитель главного редактора)

С. Я. Клиш

заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси *(заместитель главного редактора)*

А. В. Кильчевский

главный ученый секретарь Национальной академии наук Беларуси *(заместитель главного редактора)*

Т. П. Петрович

(ведущий редактор журнала)

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

П. А. Витязь – Президиум Национальной академии наук Беларуси

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

И. В. Гайшун – Институт математики Национальной академии наук Беларуси

С. В. Гапоненко – Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований

А. Е. Дайнеко – Институт мясо-молочной промышленности Научно-практического центра

Национальной академии наук Беларуси по продовольствию

И. В. Залуцкий – Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси

О. А. Ивашкевич – Белорусский государственный университет

Н. А. Изобов – Институт математики Национальной академии наук Беларуси

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

А. А. Коваленя – Президиум Национальной академии наук Беларуси

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

Белорусского государственного университета

И. В. Котляров – Институт социологии Национальной академии наук Беларуси

В. А. Лабунов – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

А. П. Ласковнев – Президиум Национальной академии наук Беларуси

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

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 (Российская Федерация)
К. П. Валуцкас – Национальный институт рака (Литовская Республика)
С. Воденичаров – Болгарская академия наук (Республика Болгария)
И. М. Дунин – Всероссийский научно-исследовательский институт племенного дела
Министерства сельского хозяйства Российской Федерации (Российская Федерация)
Н. Желев – Медицинский биотехнологический центр молекулярной и клеточной технологии
Абертейского университета (Великобритания)
Н. Н. Казанский – Институт лингвистических исследований Российской академии наук (Российская Федерация)
А. Карклинш – Институт почвоведения и растениеводства Латвийского сельскохозяйственного университета в Елгаве
(Латвийская Республика)
С. П. Карпов – Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Российская Федерация)
М. Ларссон – Университетский центр Алба Нова Стокгольмского университета (Королевство Швеция)
А. Г. Наумовец – Национальная академия наук Украины (Украина)
И. Д. Рашаль – Институт биологии Латвийского университета (Латвийская Республика)
В. А. Садовничий – Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Российская Федерация)
А. Г. Тарарико – Национальная академия аграрных наук Украины (Украина)
Л. Трипольская – Литовский центр аграрных и лесных наук (Литовская Республика)
Тъяу Ван Минь – Вьетнамская академия наук и технологий (Социалистическая Республика Вьетнам)
А. Цайлингер – Институт квантовой оптики и квантовой информатики Австрийской академии наук
(Австрийская Республика)
В. Ф. Чехун – Институт экспериментальной патологии, онкологии и радиологии имени Р. Е. Кавецкого
Национальной академии наук Украины (Украина)
Чжао Лян – Хэнаньская академия наук (Китайская Народная Республика)

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. 2017. Т. 61, № 2

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор Т. П. П е т р о в и ч
Компьютерная верстка Н. И. К а ш у б а

Сдано в набор 05.04.2017. Выпуск в свет 27.04.2017. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 152 экз. Заказ 57.

Цена: индивидуальная подписка – 10,34 руб.; ведомственная подписка – 25,29 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, 2017

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

MINSK. BELARUSKAYA NAVUKA. 2017. Vol. 61. No. 2

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)*

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

V. G. Gusakov

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

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

S. A. Chizhik

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

S. Ya. Kilin

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

A. V. Kilchevsky

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

T. P. Petrovich

(*Lead editor*)

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

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

I. V. Gaishun – Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus

S. V. Gaponenko – Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research

O. A. Ivashkevich – Belarusian State University

N. A. Izobov – Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus

N. S. Kazak – B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus

L. V. Khotyleva – Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus

V. A. Khripach – Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus

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

I. V. Kotlyarov – Institute of Sociology of the National Academy of Sciences of Belarus

A. A. Kovalenya – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus

V. A. Labunov – Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

A. P. Laskovnev – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus

A. I. Lesnikovich – Belarusian State University

O. N. Levko – Institute of History of the National Academy of Sciences of Belarus

- V. F. Loginov** – Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus
A. A. Makhnach – Scientific and Practical Center on Geology
A. A. Mikhalevich – Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus
M. Ye. Nikiforov – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus
V. A. Orlovich – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus
O. G. Penyazkov – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus
Yu. M. Pleskachevsky – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus
N. S. Serduchenko – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus
I. P. Sheiko – Scientific and Practical Center for Animal Breeding
A. F. Smeyanovich – Republican Scientific and Practical Center of Neurology and Neurosurgery
L. M. Tomilchik – B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
S. A. Usanov – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus
P. A. Vitiaz – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus
I. D. Volotovskii – Institute of Biophysics and Cell Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus
I. V. Zalutsky – Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus

E d i t o r i a l C o u n c i l

- Zh. Alferov** – Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences (Russian Federation)
Chau Van Minh – Vietnam Academy of Science and Technology (Socialist Republic of Vietnam)
V. F. Chekhun – Kavetsky Institute of Experimental Pathology, Oncology and Radiology of the National Academy of Sciences (Ukraine)
I. M. Dunin – All-Russian Scientific Research Institute of Breeding of the Ministry of Agriculture Economy of the Russian Federation (Russian Federation)
A. Karklinsh – Institute of Soil Science and Plant of the Latvia University of Agriculture in Elgava (Republic of Latvia)
S. P. Karpov – Lomonosov Moscow State University (Russian Federation)
N. N. Kazansky – Institute for Linguistic Studies of the Russian Academy of Sciences (Russian Federation)
M. Larsson – Alba Nova University Center of the University of Stockholm (Kingdom of Sweden)
A. G. Naumovets – National Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine)
I. D. Rashal – Institute of Biology of the University of Latvia (Republic of Latvia)
V. A. Sadovnichiy – Lomonosov Moscow State University (Russian Federation)
A. G. Tarariko – National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine (Ukraine)
L. Tripolskaya – Lithuanian Centre of Agricultural and Forest Sciences (Republic of Lithuania)
K. P. Valuckas – National Cancer Institute (Republic of Lithuania)
S. Vodenicharov – Bulgarian Academy of Sciences (Republic of Bulgaria)
A. Zeilinger – Institute for Quantum Optics and Quantum Information of the Austrian Academy of Sciences (Republic of Austria)
Zhao Liang – Henan Academy of Sciences (People's Republic of China)
N. Zhelev – Medical Biotechnology Center of Molecular and Cellular Technology of the Abertay University (Great Britain)

Address of the Editorial Office:

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

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS. 2017. VOL. 61. No. 2

Printed in Russian, Belarusian and English languages

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

Sent for press 05.04.2017. Output 27.04.2017. Format 60×84¹/₈. Offset paper.
 Digital press. Printed sheets 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 152 copies. Order 57.
 Price: individual subscription – 10,34 BYN, departmental subscription – 25,29 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, 2017

СОДЕРЖАНИЕ*МАТЕМАТИКА*

Бенедиктович В. И. Спектральный радиус сбалансированного двудольного графа и его гамильтоновость	7
Поляков Д. Б. О согласованных двусторонних оценках решений однородных квазилинейных параболических уравнений и их аппроксимаций	13

ФИЗИКА

Черкас Н. Л., Черкас С. Л. Квазикристаллическая модель радиальной функции распределения твердых дисков на плоскости	18
Троянчук И. О., Бушинский М. В., Чобот Г. М., Никитин А. В. Магнитные фазовые превращения в перовскитах $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 0,2$)	25

ХИМИЯ

Кошевар В. Д. Области существования устойчивых концентрированных эпоксидных эмульсий «масло в воде»	32
Панкратова Е. В., Бритиков В. В., Усанов С. А. Исследование трансмембранного белка CD79B методом многомерной импульсной ЯМР спектроскопии	39

БИОЛОГИЯ

Спиров Р. К., Никитин А. Н., Чешик И. А., Король Р. А. Аккумуляция трансурановых элементов надземными и подземными органами сосудистых растений	51
--	----

МЕДИЦИНА

Рудниченко Ю. А., Лукашевич В. С., Залуцкий И. В. Влияние рекомбинантного лактоферрина человека на уровень половых гормонов у самцов крыс разного возраста	58
---	----

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Кот В. А. Метод взвешенной температурной функции в решении задач нестационарной теплопроводности	64
Песецкий С. С., Богданович С. П., Содылева Т. М. Упрочнение полиамида 6 при гибридном наполнении коротким базальтовым волокном и наноглиной	74
Поплавский В. В., Комаров Ф. Ф., Матыс В. Г. Состав и свойства поверхностных слоев, формируемых ионно-ассистируемым осаждением каталитических металлов из плазмы вакуумного дугового разряда на углеродные подложки	84

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

Смехович Н. В. Основные направления аграрной политики СССР 1953–1964 гг. и результаты ее исполнения в БССР (на бел. яз.)	92
---	----

АГРАРНЫЕ НАУКИ

Герман Ю. И., Шейко И. П. Оценка племенной ценности лошадей ганноверской и тракененской пород	105
Ловкис З. В., Куликов А. В. Анализ отходообразования при механическом способе очистки картофеля	114
Китиков В. О. Обоснование режимных параметров рабочего вакуумного контура доильных установок для физиологически щадящего процесса машинного доения коров	121

CONTENTS*MATHEMATICS*

- Benediktovich V. I.** Spectral radius of a balanced bipartite graph and its hamiltonicity 7
- Poliakov D. B.** Consistent two-sided estimates for the solutions of homogeneous quasi-linear parabolic equations and their approximations 13

PHYSICS

- Cherkas N. L., Cherkas S. L.** Quasi-crystal model of the radial distribution function for hard disks in the plane 18
- Troyanchuk I. O., Bushinsky M. V., Chobot G. M., Nikitin A. V.** Magnetic phase transitions in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 0.2$) perovskites 25

CHEMISTRY

- Koshevar V. D.** Areas of existence of oil/water stable concentrated epoxy emulsions 32
- Pankratova E. V., Britikov V. V., Usanov S. A.** Study of the transmembrane protein CD79B by multidimensional pulse NMR spectroscopy 39

BIOLOGY

- Spirov R. K., Nikitin A. N., Cheshik I. A., Korol R. A.** Accumulation of transuranium elements by underground and aboveground organs of tracheophytes 51

MEDICINE

- Rudnichenko Ju. A., Lukashevich U. S., Zalutsky I. V.** Influence of human recombinant lactoferrin on the level of sex hormones in male rats of different age 58

TECHNICAL SCIENCES

- Kot V. A.** Weighted temperature function method for solution of unsteady-state heat conduction problems 64
- Pesetskii S. S., Bogdanovich S. P., Sodyleva T. M.** Polyamide 6 reinforcement by hybrid short basalt fiber and organoclay filling 74
- Poplavsky V. V., Komarov F. F., Matys V. G.** Composition and properties of surface layers prepared by ion beam-assisted deposition of catalytic metals from vacuum arc-discharge plasma on carbon substrates 84

SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES

- Smiakhovich M. U.** Main directions of the USSR agricultural policy during 1953–1964 years and the results of their implementation in the BSSR 92

AGRARIAN SCIENCES

- German Y. I., Sheyko I. P.** Estimation of the breeding value of the Hannover and Trakehner breeds of horses 105
- Lovkis Z. V., Kulikou A. V.** Analysis of waste during mechanical potato peeling 114
- Kitikov V. O.** Rationale of vacuum operating circuits regime parameters of milking machines for physiologically sparing process of cow machine milking 121

ISSN 0002–354X (print)

МАТЕМАТИКА**MATHEMATICS**

УДК 519.173

Поступило в редакцию 13.03.2017

Received 13.03.2017

В. И. Бенедиктович*Институт математики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь***СПЕКТРАЛЬНЫЙ РАДИУС СБАЛАНСИРОВАННОГО ДВУДОЛЬНОГО ГРАФА
И ЕГО ГАМИЛЬТОНОВОСТЬ***(Представлено академиком И. В. Гайшуном)*

В данной работе получена улучшенная нижняя оценка для спектрального радиуса сбалансированного двудольного графа достаточно большого порядка, дающая условие существования гамильтонова цикла в нем и зависящая от инварианта графа – нижней границы минимальной степени графа.

Ключевые слова: матрица смежности, спектральный радиус, сбалансированный двудольный граф, гамильтонов цикл, минимальная степень.

V. I. Benediktovich*Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***SPECTRAL RADIUS OF A BALANCED BIPARTITE GRAPH AND ITS HAMILTONICITY***(Communicated by Academician I. V. Gaishun)*

In this article, an improved lower bound for the spectral radius of a balanced bipartite graph of quite a large order giving the condition of existence of a Hamiltonian cycle in it and depending on the lower bound of the minimum degree of the graph has been obtained.

Keywords: adjacency matrix, spectral radius, Hamiltonian cycle, minimum degree, balanced bipartite graph.

Пусть $G = (V(G), E(G))$ – простой неориентированный граф порядка n и размера $e(G)$, и пусть $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ являются собственными значениями его матрицы смежности $A = A(G)$, упорядоченными по убыванию (с учетом их кратностей). Наибольшее собственное значение λ_1 называется *спектральным радиусом* (или *индексом*) графа G , который будем обозначать через $\rho(G)$. Поскольку матрица A является симметрической, спектральный радиус $\rho(G)$ является неотрицательным действительным корнем характеристического полинома $\chi_A(\lambda) = \det(\lambda I - A)$ этой матрицы.

Для произвольной вершины $v \in V(G)$ будем обозначать ее *окружение* через $N(v) = \{u \in V(G) \mid uv \in E(G)\}$ и *замкнутое окружение* через $N[v] = N(v) \cup \{v\}$. *Окружение множества вершин* $X \subset V(G)$ обозначим через $N(X) = \{v \in V(G) \mid \exists x \in X : vx \in E(G)\}$. Тогда *степень вершины* $v_i \in V(G)$ равна $\deg_G(v_i) = |N(v_i)|$, которую кратко будем обозначать через $d_{v_i} = d_i$. Пусть (d_1, d_2, \dots, d_n) – *последовательность степеней* графа G , упорядоченная по возрастанию: $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_n$. Тогда $d_1 = \delta$ называется *минимальной степенью*.

Объединением двух простых графов G и H называется простой граф $G \cup H$ с множеством вершин $V(G) \cup V(H)$ и множеством ребер $E(G) \cup E(H)$. Если графы G и H не пересекаются ($V(G) \cap V(H) = \emptyset$), то их объединение называется *дизъюнктным* и обозначается через $G + H$. Дизъюнктное объединение k копий графа G обозначается через kG . *Соединением* непересекающихся графов G и H называется граф $G \vee H$, получаемый из дизъюнктного объединения $G + H$ добавлением всех ребер, которые соединяют каждую вершину графа G с каждой вершиной гра-

фа H . \bar{H} – обозначает дополнение графа H . Для произвольного подмножества вершин $U \subset V(G)$ графа G $G[U]$ обозначает индуцированный этим множеством подграф в G .

Цикл или цепь, проходящие через все вершины графа G , называются *гамильтоновыми*. Граф G , содержащий гамильтонов цикл или цепь, называется соответственно *гамильтоновым* или *трассируемым*. Как известно, задача распознавания гамильтоновости или трассируемости заданного графа является NP-полной. Недавно для решения этой проблемы стала активно применяться спектральная теория графов.

Пусть G – двудольный граф с долями X и Y . Двудольный граф G называется *сбалансированным*, если его доли X и Y имеют одинаковое количество вершин: $|X| = |Y|$.

Напомним понятие замыкания графа, введенное Оре в [1; 2] и Бонди и Хваталом в [3]. Фиксируем целое число $k \geq 0$. Для заданного графа G выполним следующую операцию: если существуют две несмежные вершины u и v с $d_u + d_v \geq k$, то добавим ребро uv ко множеству $E(G)$. k -замыканием графа G называется граф $cl_k(G)$, полученный из графа G с помощью последовательного применения этих операций, пока это возможно. Отметим, что k -замыкание графа G единственно, т. е. не зависит от порядка, в котором добавляются ребра (см. [3]). Двудольным замыканием (или B -замыканием) графа двудольного графа G , которое обозначается через $cl_B(G)$, называется граф, который получается из графа G рекурсивным добавлением ребер uv ко множеству $E(G)$ для несмежных вершин u, v , лежащих в разных долях, чья сумма степеней не меньше $(n + 1)$: $d_u + d_v \geq n + 1$. Отметим некоторые свойства k -замыкания $cl_k(G)$ графа G [1; 2]:

1) Если u и v – произвольные несмежные вершины $cl_k(G)$, то $d_{cl_k(G)}(u) + d_{cl_k(G)}(v) \leq k - 1$.

2) Сбалансированный двудольный граф G порядка $2n$ гамильтонов тогда и только тогда, когда гамильтоново его B -замыкание $cl_B(G)$.

Для любых натуральных чисел $k \geq 1$ и $n \geq 2k + 1$ обозначим через B_n^k граф, полученный из полного двудольного графа $K_{n,n}$ удалением всех ребер его полного двудольного подграфа $K_{n-k,k}$. Отметим, что граф B_n^k негамильтонов и число его ребер равно

$$e(B_n^k) = n(n - k) + k^2.$$

Здесь мы рассматриваем следующую проблему Брюалди–Золхайда [4]:

Проблема. Среди всех негамильтоновых сбалансированных двудольных графов G порядка $2n$ с $\delta(G) \geq k$ найти максимальное значение спектрального радиуса: $\max \rho(G)$.

Последний известный результат в решении этой проблемы был получен сравнительно недавно.

Теорема 1 [5]. Пусть G сбалансированный двудольный граф порядка $2n$ и минимальной степени $\delta(G) \geq k \geq 1$. Тогда если $n \geq (k + 1)^2$ и $\rho(G) \geq \rho(B_n^k)$, то G гамильтонов, кроме единственного случая, когда $G = B_n^k$.

Поскольку условие $\delta(G) \geq 2$ является тривиальным необходимым условием для гамильтоновости графа G , то в дальнейшем мы будем это предполагать.

Поскольку справедливо следующее неравенство: $\rho(B_n^k) > \rho(K_{n-k,k}) = \sqrt{n(n-k)}$, в данной работе получено усиление последнего утверждения в виде следующей теоремы.

Теорема 2. Пусть G – простой граф порядка $2n \geq k^3 + 4k + 2$ с минимальной степенью $\delta(G) \geq k \geq 2$, отличный от графа B_n^k . Тогда если его спектральный радиус

$$\rho(G) < \sqrt{n(n-k)},$$

то граф G гамильтонов.

Для доказательства этой теоремы нам понадобится следующая теорема, представляющая самостоятельный интерес:

Теорема 3. Пусть G – простой граф порядка $2n \geq k^3 + 4k + 2$ с минимальной степенью $\delta(G) \geq k \geq 1$. Тогда если G является собственным подграфом B_n^k , то его спектральный радиус удовлетворяет неравенству

$$\rho(G) < \sqrt{n(n-k)}.$$

Доказательство теоремы 3. Пусть G является собственным подграфом B_n^k . В силу того, что для произвольного графа G и любого его пографа H всегда справедливо неравенство

$\rho(H) \leq \rho(G)$, то без ограничения общности можно предполагать, что граф G получается из графа B_n^k с помощью удаления только одного ребра uv : $G = B_n^k - uv$. В графе B_n^k обозначим через X вершины степени k , через Y множество соседних вершин для X : $Y = N(X)$, через Z – множество вершин $Z = N(Y) \setminus X$ и через W – множество вершин $W = N(Z) \setminus Y$. Отметим, что тогда $|X| = |Y| = k$ и $|Z| = |W| = n - k$. Поскольку $\delta(G) \geq k$, то граф G содержит все ребра, инцидентные множеству вершин X . Поэтому $u, v \in Y \cup Z \cup W$, и априори возможны лишь два случая:

- 1) $u \in Z, v \in Y$;
- 2) $u \in Z, v \in W$.

Обозначим граф G , соответствующий этим случаям, через G_i , $i = 1, 2$, соответственно.

Покажем, что наибольший спектральный радиус из них имеет граф G_2 . Для этого используем известную операцию Кельманса [6]. Для заданного графа G и двух выделенных его вершин u, v построим новый граф G^* , заменив все ребра vx на ребра ix для всех $x \in N(v) \setminus N[u]$. Новый граф G^* , полученный таким образом, имеет тот же порядок и размер, что и исходный граф G , и все вершины, отличные от u и v , сохраняют свою степень. Кроме того, вершины u, v смежны в G^* тогда и только тогда, когда они смежны в G . Справедливо следующее утверждение.

Л е м м а 1 [7; 8]. Пусть G – произвольный граф и пусть G^* – граф, полученный из G с помощью операции Кельманса. Тогда $\rho(G) \leq \rho(G^*)$.

На основании этой леммы справедлива

Л е м м а 2. Для графов G_i , $i = 1, 2$, соответствующих случаям 1)–2), выполняется неравенство $\rho(G_1) \leq \rho(G_2)$.

Действительно, пусть в графе G_1 вершины $u \in Z, v \in Y$ несмежны, и w – произвольная вершина из множества W . Применим теперь операцию Кельманса для случая, когда $v = w, u = v, x = u = N(w) \setminus N[v]$. Тогда $G_1^* = G_2$ и по лемме 1 $\rho(G_1) \leq \rho(G_2)$.

Таким образом, для доказательства теоремы 3 достаточно рассмотреть только единственный случай: $G = G_2$.

Для упрощения вычисления спектрального радиуса этого графа рассмотрим разбиение множества его вершин. Разбиение π множества вершин $V(G)$ на попарно непересекающиеся подмножества C_1, \dots, C_r называется *равномерным*, если число соседей в C_j вершины u из C_i равно константе b_{ij} , не зависящей от выбора вершины u : $|N(u) \cap C_j| = b_{ij}, \forall u \in C_i$. Это определение эквивалентно следующему: все индуцированные подграфы $G[C_i], i = 1, \dots, r$, являются *регулярными* и ребра, соединяющие два различных подмножества C_i и C_j , образуют *бирегулярный* граф. Ориентированный мультиграф с r вершинами и b_{ij} дугами от i -й вершины к j -й называется *частным графом G по разбиению π* и обозначается через G/π . Матрица смежности $A(G/\pi)$ этого ориентированного мультиграфа G/π имеет компоненты $A(G/\pi)_{ij} = b_{ij}, i, j = \overline{1, r}$. Справедлива следующая техническая лемма.

Л е м м а 3 ([9]). Если π – равномерное разбиение множества вершин графа G , то спектральный радиус матрицы $A(G/\pi)$ равен спектральному радиусу матрицы $A(G)$.

Рассмотрим следующее разбиение π графа G_2 : $C_1 = X, C_2 = Y, C_3 = Z \setminus \{u\}, C_4 = W \setminus \{v\}, C_5 = \{u\}, C_6 = \{v\}$. Нетрудно убедиться, что это разбиение является равномерным и матрица смежности частного графа G_2/π равна

$$A(G_2/\pi) = \begin{pmatrix} 0 & k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k & 0 & n-k-1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & k & 0 & n-k-1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & n-k-1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & k & 0 & n-k-1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n-k-1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Значит, по лемме 3 спектральный радиус $\rho(G_2)$ должен быть корнем характеристического полинома матрицы $A(G_2/\pi)$, который, как нетрудно вычислить, равен

$$\chi(\lambda) = \lambda^6 - (n^2 - kn + k^2 - 1)\lambda^4 + ((k^2 + 1)n^2 - (2k^3 + k + 2)n + k^4 - k^2 + k + 1)\lambda^2 + (-k^2n^2 + (2k^3 + 2k^2)n - (k^4 + 2k^3 + k^2)).$$

Покажем теперь, что все корни этого характеристического полинома лежат левее числа $\sqrt{n(n-k)}$.

Действительно, имеем

$$\chi(\lambda)|_{\sqrt{n(n-k)}} = 2n^4 - (k^3 + 4k + 2)n^3 + (2k^4 + 3k + 1)n^2 - (k^5 - 3k^3 - k^2 + k)n + (-k^4 - 2k^3 - k^2).$$

Нетрудно проверить, что при $n \geq \frac{k^3 + 4k + 2}{2}$ сумма первых двух слагаемых $2n^4 - (k^3 + 4k + 2)n^3$ неотрицательна, а сумму следующих трёх слагаемых можно оценить снизу следующим образом:

$$\begin{aligned} & ((2k^4 + 3k + 1)n - (k^5 - 3k^3 - k^2 + k))n + (-k^4 - 2k^3 - k^2) \geq \\ & \frac{(2k^4 + 3k + 1)(k^3 + 4k + 2) - 2k^5 + 6k^3 + 2k^2 - 2k}{2}n - k^4 - 2k^3 - k^2 = \\ & \left(k^7 + 3k^5 + \frac{7}{2}k^4 + \frac{7}{2}k^3 + 7k^2 + 4k + 1 \right)n - k^4 - 2k^3 - k^2 > \\ & k^7 + 3k^5 + \frac{5}{2}k^4 + \frac{3}{2}k^3 + 6k^2 + 4k + 1 > 0. \end{aligned}$$

Вычисляем значение первой производной характеристического полинома в точке $x = \sqrt{n(n-k)}$:

$$\chi'(\lambda)|_{\sqrt{n(n-k)}} = 2\sqrt{n(n-k)}(n^4 - 2kn^3 + 3n^2 - (3k + 2)n + (k^4 - k^2 + k + 1)).$$

Нетрудно убедиться, что $\chi'(\lambda)|_{\sqrt{n(n-k)}} > 0$ уже при $n \geq 2k + 1$.

Вычисляем значение второй производной характеристического полинома в точке $x = \sqrt{n(n-k)}$:

$$\chi''(\lambda)|_{\sqrt{n(n-k)}} = 2(9n^4 - 18kn^3 + (4k^2 + 7)n^2 + (4k^3 - 7k - 2)n + (k^4 - k^2 + k + 1)).$$

Нетрудно также убедиться, что $\chi''(\lambda)|_{\sqrt{n(n-k)}} > 0$ уже при $n \geq 2k + 1$.

Вычисляем значение третьей производной характеристического полинома в точке $x = \sqrt{n(n-k)}$:

$$\chi'''(\lambda)|_{\sqrt{n(n-k)}} = \sqrt{n(n-k)}(4n^2 - 4kn - k^2 + 1).$$

Нетрудно проверить, что также $\chi'''(\lambda)|_{\sqrt{n(n-k)}} > 0$ при $n \geq 2k + 1$.

Вычисляем значение четвертой производной характеристического полинома в точке $x = \sqrt{n(n-k)}$:

$$\chi^{(4)}(\lambda)|_{\sqrt{n(n-k)}} = 24(14n^2 - 14kn - k^2 + 1).$$

Нетрудно также видеть, что $\chi^{(4)}(\lambda)|_{\sqrt{n(n-k)}} > 0$ при $n \geq 2k + 1$.

Наконец, вычисляем значение пятой производной характеристического полинома в точке $x = \sqrt{n(n-k)}$:

$$\chi^{(5)}(\lambda)|_{\sqrt{n(n-k)}} = 720\sqrt{n(n-k)} > 0.$$

Воспользуемся теперь следующей известной теоремой:

Т е о р е м а 4 (Фурье–Бюдан [10]). Пусть $N(x)$ – число перемен знака в последовательности $f(x), f'(x), \dots, f^{(n)}(x)$, где f – многочлен степени n . Тогда число корней многочлена f (с учетом их кратностей), заключенных между a и b , где $f(a) \neq 0, f(b) \neq 0$ и $a < b$, не превосходит $N(a) - N(b)$.

Поскольку очевидно, для произвольного многочлена справедливо равенство $N(+\infty) = 0$, то по теореме Фурье–Бюдана заключаем, что правее числа $\sqrt{n(n-k)}$ нет корней характеристического полинома $\chi(\lambda)$. Откуда мы получаем, что $\rho(G_2) < \sqrt{n(n-k)}$.

Теорема 3 доказана.

Для доказательства теоремы 2 воспользуемся следующими известными фактами.

Т е о р е м а 5 [11]. Пусть G – произвольный двудольный граф порядка $2n$. Тогда его спектральный радиус удовлетворяет неравенству

$$\rho(G) \leq \sqrt{e(G)}.$$

Кроме того, равенство достигается тогда и только тогда, когда

$$G = K_{p,q} + (2n - (p + q))K_1,$$

где $pq = e(G)$.

Т е о р е м а 6 [5]. Пусть G – сбалансированный двудольный граф порядка $2n$. Если $\delta(G) \geq k \geq 1$, $n \geq 2k + 1$ и выполняется неравенство

$$e(G) > n(n - k - 1) + (k + 1)^2,$$

то граф G гамильтонов, кроме случая, когда $G \subseteq B_n^k$.

Д о к а з а т е л ь с т в о т е о р е м ы 2. Поскольку граф G не имеет изолированных вершин и не является полным двудольным графом, то из условия теоремы 2 и теоремы 5 имеем следующую цепочку неравенств:

$$\sqrt{n(n - k)} \leq \rho(G) < \sqrt{e(G)}.$$

Откуда получаем, что

$$e(G) > n(n - k) = n(n - k - 1) + n \geq n(n - k - 1) + \frac{k^3 + 4k + 2}{2} \geq n(n - k - 1) + (k + 1)^2,$$

поскольку при $k \geq 2$ справедливо неравенство $\frac{k^3 + 4k + 2}{2} \geq (k + 1)^2$.

Из теоремы 6 заключаем, что граф G либо является гамильтоновым, либо содержится в графе B_n^k . Однако по теореме 3 граф G либо является гамильтоновым, либо $G = B_n^k$, откуда вытекает справедливость теоремы 2.

Благодарности. Работа профинансирована Институтом математики НАН Беларуси в рамках Государственной программы фундаментальных исследований «Конвергенция» и Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (проект № Ф16РА-003).

Acknowledgement. The work has been financially supported by the Institute of Mathematics of NAS of Belarus within the framework of the State Program of Fundamental Research “Convergence” and by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project no. Ф16РА-003).

Список использованных источников

1. Ore, O. Arc coverings of graphs / O. Ore // Ann. Mat. Pura Appl. – 1961. – Vol. 55, N 1. – P. 315–321. doi.org/10.1007/bf02412090.
2. Ore, O. Hamilton-connected graphs / O. Ore // J. Math. Pures Appl. – 1963. – Vol. 42. – P. 21–27.
3. Bondy, J. A. A method in graph theory / J. A. Bondy, V. Chvátal // Discrete Math. – 1976. – Vol. 15, N 2. – P. 111–135. doi.org/10.1016/0012-365x(76)90078-9.
4. Brualdi, R. A. On the spectral radius of complementary acyclic matrices of zeros and ones / R. A. Brualdi, E. S. Solheid // SIAM J. Algebraic Discrete Methods. – 1986. – Vol. 7, N 2. – P. 265–272. doi.org/10.1137/0607030.
5. Li, B. Spectral analogues of Erdős’ and Moon-Moser’s theorems on Hamilton cycles / B. Li, B. Ning // Linear and Multilinear Algebra. – 2016. – Vol. 64, N 11. – P. 2252–2269. doi.org/10.1080/03081087.2016.1151854.
6. Kelmans, A. K. On graphs with randomly deleted edges / A. K. Kelmans // Acta Math. Acad. Sci. Hung. – 1981. – Vol. 37, N 1–3. – P. 77–88. doi.org/10.1007/bf01904874.
7. Csikvari, P. On a conjecture of V. Nikiforov / P. Csikvari // Discrete Math. – 2009. – Vol. 309, N 13. – P. 4522–4526. doi.org/10.1016/j.disc.2009.02.013.
8. Brouwer, A. E. Spectra of graphs / A. E. Brouwer, W. H. Haemers. – New York: Springer-Verlag, 2011. – 255 p.
9. Godsil, C. D. Algebraic graph theory / C. D. Godsil, G. F. Royle. – New York: Springer-Verlag, 2001. – 442 p.
10. Прасолов, В. В. Многочлены / В. В. Прасолов. – М.: МИЦМО, 2003. – 336 p.
11. Bhattacharya, A. On the first eigenvalue of bipartite Graphs / A. Bhattacharya, S. Friedland, U. N. Peled // The Electronic Journal of Combinatorics. – 2008. – Vol. 15. – P. R144.

References

1. Ore O. Arc coverings of graphs. *Annali di Matematica Pura ed Applicata*, 1961, vol. 55, no. 1, pp. 315–321. doi.org/10.1007/bf02412090.
2. Ore O. Hamilton-connected graphs. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 1963, vol. 42, pp. 21–27.
3. Bondy J. A., Chvátal V. A method in graph theory. *Discrete Mathematics*, 1976, vol. 15, no. 2, pp. 111–135. doi.org/10.1016/0012-365x(76)90078-9.
4. Brualdi R. A., Solheid E. S. On the spectral radius of complementary acyclic matrices of zeros and ones. *SIAM Journal on Algebraic Discrete Methods*, 1986, vol. 7, no. 2, pp. 265–272. doi.org/10.1137/0607030.
5. Li B., Ning B. Spectral analogues of Erdős' and Moon-Moser's theorems on Hamilton cycles. *Linear and Multilinear Algebra*, 2016, vol. 64, no. 11, pp. 2252–2269. doi.org/10.1080/03081087.2016.1151854.
6. Kelmans A. K. On graphs with randomly deleted edges. *Acta Mathematica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 1981, vol. 37, no. 1–3, pp. 77–88. doi.org/10.1007/bf01904874.
7. Csikvari P. On a conjecture of V. Nikiforov. *Discrete Mathematics*, 2009, vol. 309, no. 13, pp. 4522–4526. doi.org/10.1016/j.disc.2009.02.013.
8. Brouwer A. E., Haemers W. H. *Spectra of graphs*. New York, Springer-Verlag, 2011. 255 p. doi.org/10.1007/978-1-4614-1939-6.
9. Godsil C. D., Royle G. F. *Algebraic graph theory*. New York, Springer-Verlag, 2001. 442 p. doi.org/10.1007/978-1-4613-0163-9.
10. Prasolov V. V. *Polynomials*. Moscow, Moscow Center For Continuous Mathematical Education, 2003. 336 p. (in Russian).
11. Bhattacharya A., Friedland S., Peled U. N. On the first eigenvalue of bipartite Graphs. *The Electronic Journal of Combinatorics*, 2008, vol. 15, pp. R144.

Информация об авторе

Бенедиктович Владимир Иванович – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, Институт математики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 11, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vbened@im.bas-net.by.

Information about the author

Benediktovich Vladimir Ivanovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading researcher, Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus (11, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vbened@im.bas-net.by.

Для цитирования

Бенедиктович, В. И. Спектральный радиус сбалансированного двудольного графа и его гамильтоновость / В. И. Бенедиктович // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 7–12.

For citation

Benediktovich V. I. Spectral radius of a balanced bipartite graph and its Hamiltonicity. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 7–12 (in Russian).

Д. Б. Поляков

Институт математики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**О СОГЛАСОВАННЫХ ДВУСТОРОННИХ ОЦЕНКАХ РЕШЕНИЙ
ОДНОРОДНЫХ КВАЗИЛИНЕЙНЫХ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ
И ИХ АППРОКСИМАЦИЙ**

(Представлено академиком И. В. Гайшуном)

В настоящей работе для линеаризованной разностной схемы, аппроксимирующей задачу Дирихле для однородного многомерного квазилинейного параболического уравнения с неограниченной нелинейностью установлены точечные двусторонние оценки решения, согласованные с аналогичными оценками для дифференциальной задачи. Любопытно отметить, что доказанные двусторонние оценки не зависят от величины коэффициента диффузии. Непосредственным применением данных оценок устанавливается сходимость исследуемой разностной схемы в сеточной норме L_2 . Приводится пример расчета по схеме Кранка–Никольсона, когда нарушение условий согласованности дифференциальной и разностной оценок приводит к немонотонности численного решения.

Ключевые слова: принцип максимума, двусторонние оценки, монотонная разностная схема, квазилинейное параболическое уравнение, согласованные оценки решения.

D. B. Poliakov

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

**CONSISTENT TWO-SIDED ESTIMATES FOR THE SOLUTIONS OF HOMOGENEOUS QUASI-LINEAR
PARABOLIC EQUATIONS AND THEIR APPROXIMATIONS**

(Communicated by Academician I. V. Gaishun)

In this article, for the linearized difference scheme that approximates the Dirichlet problem for the homogeneous multidimensional quasi-linear parabolic equation with unbounded nonlinearity, two-sided point-wise estimates of the solution are established which are fully consistent with the same estimates for the differential problem. It is interesting to note that the proved two-sided estimates do not depend on diffusion coefficient. The direct application of such estimates is the proof of the convergence of the considered difference scheme in the grid norm L_2 . An example of the calculation by the Crank–Nicolson difference scheme is given, showing that the violation of the consistency conditions of differential and difference estimates leads to non-monotonic numerical solutions.

Keywords: maximum principle, two-side estimates, monotone finite-difference scheme, quasi-linear parabolic equation, consistent estimates of the solution.

Введение. Одним из классических приемов получения оценок решения дифференциальных и разностных задач является принцип максимума. Он с успехом применяется для доказательства существования и единственности решения начально-краевых задач для параболических и эллиптических уравнений [1]. В теории разностных схем [2] с его помощью исследуются устойчивость и сходимость разностного решения в равномерной норме. При этом привлекаются оценки приближенного решения сверху.

Важными являются также нижние оценки решения дифференциально-разностных задач или в общем случае – двусторонние оценки решения задачи. Для линейных задач они позволяют найти диапазон изменения искомого решения через входные данные задачи (коэффициенты уравнения и правую часть, начальные и граничные условия). В вычислительных методах для задач с неограниченной нелинейностью они позволяют доказывать принадлежность сеточного решения окрестности значений точного решения [3; 4].

В нелинейном случае такие оценки для точного решения позволяют доказывать важную в физических задачах неотрицательность точного решения, находить условия на входные данные, при которых задача является параболической или эллиптической. Для этого, начиная с классической монографии [5], применяется специальная техника, связанная с заменой переменных и минимизацией или максимизацией по параметру некоторых функций.

Данное сообщение посвящено развитию техники из [6] и ее применению для получения двусторонних оценок разностных схем, полностью согласованных с дифференциальной задачей. Отметим, что для линейных задач и задач с ограниченной нелинейностью для метода конечных элементов подобные оценки получены в работах И. Фараго и соавт. [7].

Любопытно отметить, что доказанные двусторонние оценки не зависят от величины коэффициента диффузии. Приводится пример расчета по схеме Кранка–Никольсона, когда нарушение условий согласованности дифференциальной и разностной оценок приводит к немонотонности численного решения.

Когда удастся получить двусторонние оценки решения разностных схем, то исследование сходимости приводит для линеаризованных вычислительных алгоритмов к линейной задаче для погрешности метода. Используя метод энергетических неравенств [2], в работе устанавливается сходимость линеаризованной разностной схемы в сеточной норме L_2 .

Двусторонние оценки решения начально-краевых задач для параболических уравнений с неограниченной нелинейностью. В области $\bar{Q}_T = \{(x, t) : 0 \leq x_\alpha \leq l_\alpha, 0 \leq t \leq T, x = (x_1, x_2), \alpha = 1, 2\}$ рассмотрим следующую задачу для квазилинейного параболического уравнения

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial W_1}{\partial x_1} + \frac{\partial W_2}{\partial x_2}, \quad 0 < x_\alpha < l_\alpha, \quad \alpha = 1, 2, \quad 0 < t \leq T, \quad (1)$$

с начальным условием

$$u(\mathbf{x}, 0) = u_0(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} = (x_1, x_2), \quad 0 < x_\alpha < l_\alpha, \quad \alpha = 1, 2, \quad (2)$$

и краевыми условиями Дирихле

$$u(\mathbf{x}, t)|_{(\mathbf{x}, t) \in \partial Q_T} = \mu(\mathbf{x}, t), \quad (3)$$

где $W_\alpha = k_\alpha(u) \frac{\partial u}{\partial x_\alpha}$, $\alpha = 1, 2$.

Введем область значений точного решения

$$D_u = \{u \in R : u \in [m_1, m_2], \quad m_\alpha = \text{const}, \quad \alpha = 1, 2\}.$$

Предполагается, что функции $k_\alpha = k_\alpha(u)$, $\alpha = 1, 2$, достаточно гладкие и существуют константы $k_{\alpha,1}, k_{\alpha,2}, L_\alpha$, такие, что

$$k_{\alpha,1} < k_\alpha(u) \leq k_{\alpha,2}, \quad |k'_\alpha(u)| \leq L_\alpha, \quad \forall u \in D_u, \quad (\mathbf{x}, t) \in \bar{Q}_T, \quad \alpha = 1, 2.$$

Предположим, что функция $u(\mathbf{x}, t)$ непрерывна в \bar{Q}_T , имеет внутри Q_T непрерывные производные, входящие в (1), и удовлетворяет (1) и начальным и граничным условиям (2) и (3). Пусть $Q_{t_1} = \{(\mathbf{x}, t) \in Q_T : t \leq t_1\}$.

Тогда имеет место

Т е о р е м а 1 (О. А. Ладыженская [7]). Для решения $u(\mathbf{x}, t)$ задачи (1)–(3) в любой точке $(\mathbf{x}, t_1) \in \bar{Q}_T$ имеет место двусторонняя оценка:

$$u(\mathbf{x}, t_1) \geq m_1 = \sup_{\lambda > 0} \left(e^{\lambda t_1} \min \left\{ 0, \min_{Q_{t_1}} \{\mu, u_0\} e^{-\lambda t} \right\} \right),$$

$$u(\mathbf{x}, t_1) \leq m_2 = \inf_{\lambda > 0} \left(e^{\lambda t_1} \max \left\{ 0, \max_{Q_{t_1}} \{\mu, u_0\} e^{-\lambda t} \right\} \right).$$

Двусторонние оценки решения разностных схем. Для аппроксимации задачи (1)–(3) на равномерной пространственно-временной сетке в прямоугольнике \bar{Q}_T

$$\bar{\omega}_{h_\alpha} = \{x_{\alpha, i_\alpha} = i_\alpha h_\alpha, i_\alpha = 0, 1, \dots, N_\alpha; h_\alpha N_\alpha = l_\alpha\}, \quad \alpha = 1, 2,$$

$$\bar{\omega}_\tau = \{t_n = n\tau, n = 0, 1, \dots, N_0; \tau N_0 = T\}, \quad \bar{\omega}_\tau = \omega_\tau \cup \{t_{N_0} = T\},$$

$$\bar{\omega} = \bar{\omega}_{h_1} \times \bar{\omega}_{h_2} \times \bar{\omega}_\tau, \quad \omega_{t_n} = \{(\mathbf{x}, t) \in \bar{\omega} : t \leq t_n\}$$

используем линейризованную разностную схему

$$y_t = (a_1(y)\hat{y}_{\bar{x}_1})_{x_1} + (a_2(y)\hat{y}_{\bar{x}_2})_{x_2}, \quad (4)$$

$$y(\mathbf{x}, 0) = u_0(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \bar{\omega}_h, \quad (5)$$

$$y|_{\bar{\omega} \cap \partial Q_T} = \mu. \quad (6)$$

Шаблонные функционалы

$$a_\alpha(y) = 0,5(k_\alpha(y_{i_\alpha-1}) + k_\alpha(y_{i_\alpha})), \quad \alpha = 1, 2,$$

как обычно выбираются из условия аппроксимации второго порядка по пространственным переменным для эллиптического оператора [2]:

$$(a_\alpha(u)\hat{u}_{\bar{x}_\alpha})_{x_\alpha} - \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(k_\alpha(u) \frac{\partial u}{\partial x_\alpha} \right) = O(h_\alpha^2 + \tau).$$

Здесь и далее мы используем обычные обозначения теории разностных схем [2]:

$$y = y_{i_1 i_2}^n = y(x_{1, i_1}, x_{2, i_2}, t_n), \quad y_t = (\hat{y} - y) / \tau, \quad \hat{y} = y_{i_1 i_2}^{n+1},$$

$$v_{\bar{x}_\alpha} = (v_{i_\alpha} - v_{i_\alpha-1}) / h_\alpha, \quad v_{x_\alpha} = (v_{i_\alpha+1} - v_{i_\alpha}) / h_\alpha.$$

Т е о р е м а 2. Для решения $y(\mathbf{x}, t)$ задачи (4)–(6) в любой точке $(\mathbf{x}, t_n) \in \omega$ имеет место двусторонняя оценка

$$y(x, t_n) \geq m_{1, \tau} = \sup_{\lambda > 0} \left(e^{\lambda t_n} \min_{\omega_{t_n}} \left\{ 0, \min\{\mu, u_0\} e^{-\lambda t} \right\} \right),$$

$$y(x, t_n) \leq m_{2, \tau} = \inf_{\lambda > 0} \left(e^{\lambda t_n} \max_{\omega_{t_n}} \left\{ 0, \max\{\mu, u_0\} e^{-\lambda t} \right\} \right).$$

З а м е ч а н и е 1. Полученные результаты в теоремах 1 и 2 имеют вид

$$m_1 \leq u \leq m_2, \quad m_{1, \tau} \leq y \leq m_{2, \tau},$$

где

$$m_1 = m_{1, \tau}, \quad m_{2, \tau} = m_2.$$

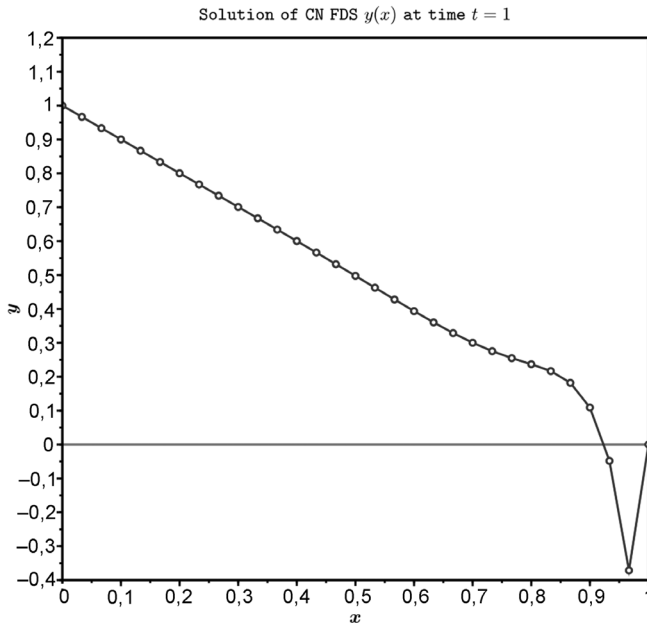
В этом смысле разностные оценки наследуют свойства дифференциальной задачи.

Таким образом, мы показали, что решение линейризованной разностной схемы (4)–(6) принадлежит области значений точного решения дифференциальной задачи (1)–(3) без условий на шаги сетки. Возникает вопрос: насколько это существенно?

Рассмотрим следующую начально-краевую задачу для одномерного линейного параболического уравнения

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad x \in (0, 1), \quad t \in (0, 1], \quad u(x, 0) = 1, \quad 0 < x < 1, \quad u(0, t) = 1, \quad u(1, t) = 0, \quad t \in [0, 1].$$

Двусторонняя оценка решения для этой задачи имеет вид $0 \leq u \leq 1$.



Численное решение при $t = 1$
Numerical solution at $t = 1$

Аппроксимируем данное уравнение схемой Кранка–Никольсона [7] с указанными ниже параметрами:

$$y_t = y_{\bar{x}\bar{x}}^{(0,5)}, \quad y^{(0,5)} = 0,5(\hat{y} + y),$$

$$h = \frac{1}{30}, \quad \tau = \frac{1}{11}.$$

Как видно из рисунка, решение разностной схемы не сохраняет положительность, и появляются нефизические осцилляции. Их причина, как известно [2], в нарушении достаточной условной монотонности разностной схемы Кранка–Никольсона, которые имеют следующий вид: $\tau \leq \frac{h^2}{2}$.

Сходимость разностной схемы в сеточной норме L_2 . Когда удается получить двусторонние оценки решения разностных схем, то исследование сходимости приводит для линеаризованных вычислительных алгоритмов к линейной задаче для по-

грешности метода $z = y - u$. В данном разделе будем дополнительно предполагать, что точное решение задачи (1)–(3) достаточно гладкое, а именно $u(\mathbf{x}, t) \in C^{4,2}(Q_T)$. Определим следующее скалярное произведение и соответствующую норму:

$$(u, v) = \sum_{i_1=1}^{N_1-1} \sum_{i_2=1}^{N_2-1} h_1 h_2 u_{ii_2} v_{ii_2}, \quad \|u\| = \sqrt{(u, u)}.$$

Имеет место следующее утверждение.

Т е о р е м а 3. Для решения разностной схемы (4)–(6) справедлива следующая оценка точности метода:

$$\|z^{n+1}\| \leq c(h_1^2 + h_2^2 + \tau), \quad c = \text{const} > 0.$$

З а м е ч а н и е 2. Обобщение результатов данной работы на задачи конвекции-диффузии произвольной размерности носят редакционный характер.

Список использованных источников

1. Владимиров, В. С. Уравнения математической физики / В. С. Владимиров. – М.: Наука, 1981. – 512 с.
2. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1989. – 656 с.
3. Matus, P. P. Analysis of second order difference schemes on non-uniform grids for quasilinear parabolic equations / P. P. Matus, L. M. Hieu, L. G. Volkov // J. Comput. Appl. Math. – 2017. – Vol. 310. – P. 186–199. doi.org/10.1016/j.cam.2016.04.006.
4. Matus, P. On Convergence of Difference Schemes for IBVP for Quasilinear Parabolic Equations with Generalized Solutions // Comp. Meth. Appl. Math. – 2014. – Vol. 14, N 3. – P. 361–371. doi.org/10.1515/cmam-2014-0008.
5. Ладыженская, О. А. Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа / О. А. Ладыженская, В. А. Солонников, Н. Н. Уралцева. – М.: Наука, 1967. – 736 с.
6. Ладыженская, О. А. Решение первой краевой задачи в целом для квазилинейных параболических уравнений // Тр. Моск. матем. об-ва. – 1958. – Т. 7. – С. 149–177.
7. Farago, I. Discrete maximum principle and adequate discretizations of linear parabolic problems / I. Farago, R. Horvath // SIAM J. Sci. Comput. – 2006. – Vol. 28, N 6. – P. 2313–2336. doi.org/10.1137/050627241.

References

1. Vladimirov V. S. *Equations of mathematical physics*. Moscow, Nauka Publ., 1981. 512 p. (in Russian).
2. Samarskii A. A. *The theory of difference schemes*. Moscow, Nauka Publ., 1989. 656 p. (in Russian).
3. Matus P. P., Hieu L. M., Volkov L. G. Analysis of second order difference schemes on non-uniform grids for quasilinear parabolic equations. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2017, vol. 310, pp. 186–199. doi.org/10.1016/j.cam.2016.04.006.

4. Matus P. On Convergence of Difference Schemes for IBVP for Quasilinear Parabolic Equations with Generalized Solutions. *Computational Methods in Applied Mathematics*, 2014, vol. 14, no. 3, pp. 361–371. doi.org/10.1515/cmam-2014-0008.

5. Ladyzhenskaya O. A., Solonnikov V. A., Ural'tseva N. N. *Linear and quasilinear equations of parabolic type*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 736 p. (in Russian).

6. Ladyzhenskaya O. A. Solution of the first boundary problem in the large for quasi-linear parabolic equations. *Trudy Moskovskogo matematicheskogo obshchestva* [Moscow Mathematical Society], 1958, vol. 7, pp. 149–177 (in Russian).

7. Farago I., Horvath R. Discrete maximum principle and adequate discretizations of linear parabolic problems. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2006, vol. 28, no. 6, pp. 2313–2336. doi.org/10.1137/050627241.

Информация об авторе

Поляков Дмитрий Борисович – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник, Институт математики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 11, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mitia87@gmail.com.

Information about the author

Poliakov Dmitriy Borisovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Researcher, Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus (11, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mitia87@gmail.com.

Для цитирования

Поляков, Д. Б. О согласованных двусторонних оценках решений однородных квазилинейных параболических уравнений и их аппроксимаций / Д. Б. Поляков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 13–17.

For citation

Poliakov D. B. Consistent two-sided estimates for the solutions of homogeneous quasi-linear parabolic equations and their approximations. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 13–17 (in Russian).

ФИЗИКА**PHYSICS**

УДК 544.273.4;544.022.2

Поступило в редакцию 15.02.2017

Received 15.02.2017

Н. Л. Черкас¹, С. Л. Черкас²¹Военная Академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь²Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Республика Беларусь**КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ТВЕРДЫХ ДИСКОВ НА ПЛОСКОСТИ***(Представлено членом-корреспондентом Л. М. Томильчиком)*

В рамках квазикристаллической модели предложен новый метод описания радиальной функции распределения твердых дисков на плоскости. Радиальная функция распределения моделируется размазыванием квадратной решетки и образованием дефектов типа вакансий. Наилучшие совпадения с радиальной функцией распределения, полученной решением интегрального уравнения Перкуса–Йевика, достигается в результате использования суперпозиции квадратной и гексагональной решеток. Примесь гексагональной решетки существенна на малых расстояниях. Найдены зависимости постоянной решетки, ширины размывания, примеси гексагональной решетки от параметра заполнения. Предполагается, что данный метод будет работать и области более высоких плотностей, где он может быть использован для описания перехода из жидкой фазы в гексатическую и затем в кристаллическую.

Ключевые слова: радиальная функция распределения, твердые диски на плоскости, вейвлеты, квазикристаллическая модель жидкости.

N. L. Cherkas¹, S. L. Cherkas²¹Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus²Institute for Nuclear Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus**QUASI-CRYSTAL MODEL OF THE RADIAL DISTRIBUTION FUNCTION
FOR HARD DISKS IN THE PLANE***(Communicated by Corresponding Member L. M. Tomilchik)*

The quasi-crystal model of the radial distribution function for hard disks in the plane is suggested. It is shown that the coincidence with the distribution function, obtained by solving Percus–Yevick's equation, is found by smoothing a square lattice and injecting vacancy-type defects into it. A better approximation is reached when the lattice is a result of a mixture of smoothed square and hexagonal lattices. Impurity of a hexagonal lattice is considerable at short distances. Dependences of lattice constants, smoothing widths and impurity on the filling parameter are found. In conclusion, it is stated that a basis of such a chaotic system apparently as a gas of hard disks in the plane at rather small filling parameters is a square lattice with some impurity of the hexagonal lattice at small distances. It is of importance to carry out investigations in a range of higher concentration and to compare with the modeling by the Monte-Carlo method.

Keywords: radial distribution function, wavelet, hard disks in a plane, quasicrystal model of liquid.

Введение. Система твердых дисков на плоскости, с одной стороны, привлекает математиков и физиков своей простотой, с другой – на примере этой системы можно исследовать важнейшие математические и физические закономерности, такие как переход от порядка к беспорядку, от жидкости к кристаллу [1–7]. Наиболее удивительным для данной системы оказывается то, что

фазовый переход из жидкой фазы в кристаллическую осуществляется через гексатическую фазу [5; 7]. Однако возникает вопрос, в каких терминах можно описывать указанные фазовые переходы? Одним из методов может являться исследование зависимости от плотности параметров, описывающих бинарную радиальную функцию распределения. Бинарная функция распределения характеризует вероятность нахождения частицы в окрестности одной изначально выбранной частицы и определяет такие важнейшие характеристики системы твердых частиц, как сжимаемость и уравнение состояния [8; 9]. Предельным случаем функции распределения твердых дисков при увеличении концентрации является гексагональная решетка, т. е. двумерный кристалл. Естественно считать, что при концентрациях, близких к максимальной, двухчастичную функцию распределения можно описать размытием гексагональной решетки, что представляет собой так называемую квазикристаллическую модель (см. [10; 11] и приведенные там ссылки). При не слишком больших концентрациях частиц достаточно хорошо работают методы интегральных уравнений [9], основанные на расщеплении цепочки Боголюбова, в частности, интегральное уравнение Перкуса–Йефика [2; 9]. Возникает вопрос, может ли бинарная функция распределения быть описана в рамках квазикристаллической модели не только в непосредственной близости к кристаллу, но и при средних концентрациях, в той области, где работает приближение Перкуса–Йефика? В данной работе предлагается квазикристаллическая модель твердых дисков на плоскости, которая удовлетворительно согласуется с расчетами по уравнению Перкуса–Йефика.

Квазикристаллическая модель. Двухчастичная функция распределения $g(\mathbf{p})$ позволяет описать среднее число частиц $\Delta N = g(\mathbf{p})d^2\mathbf{p}$ в окрестности одной произвольно выбранной частицы, которая считается находящейся в начале координат. Функция распределения равна нулю при $\rho < 2R$, где R – радиус диска, поскольку частицы считаются непроницаемыми. На большом расстоянии от выбранной частицы функция $g(\mathbf{p}) = n_0$, где n_0 – средняя поверхностная плотность дисков. В предельном случае максимально плотной упаковки заполненная дисками плоскость представляет собой идеальный двумерный кристалл, так что

$$\tilde{g}(\mathbf{p}) = \sum_i \delta^{(2)}(\mathbf{p} - \mathbf{p}_i), \quad (1)$$

где $\delta^{(2)}(\mathbf{p})$ представляет собой двумерную дельта-функцию Дирака; \mathbf{p}_i – радиус-векторы частиц в идеальной решетке. Суммирование в (1) ведется по всем частицам, кроме одной, находящейся в начале координат. Поскольку на одну ячейку кристалла приходится по одной частице, средняя плотность частиц в идеальном кристалле легко вычисляется: $\tilde{n}_0 = \frac{1}{S} = \left(\frac{Na^2}{4} \tan \frac{\pi}{M} \right)^{-1}$, где S – площадь элементарной ячейки; a – постоянная решетки (диаметр вписанной в ячейку элементарной окружности, рис. 1); M – число сторон элементарной ячейки.

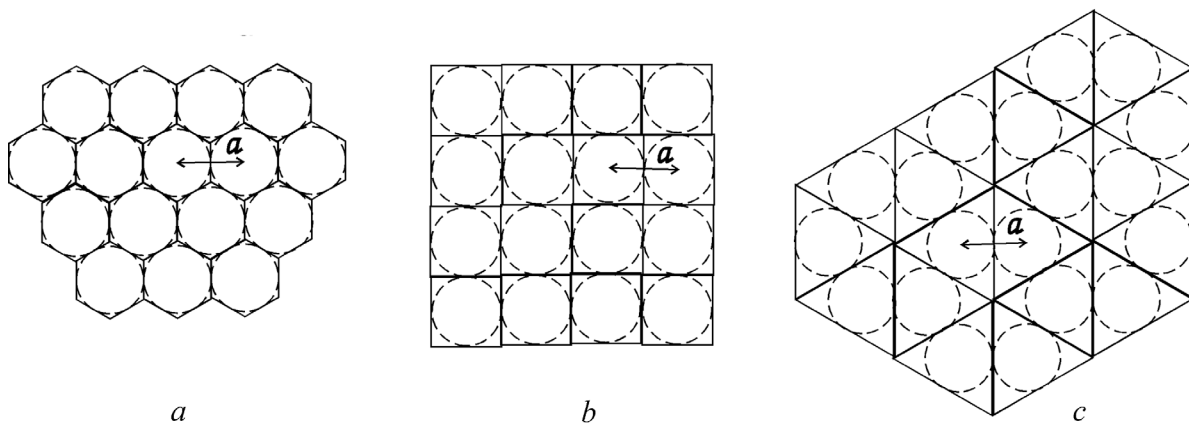


Рис. 1. Двумерные решетки: гексагональная (a), квадратная (b), треугольная (c)

Fig. 1. Two-dimensional lattices: hexagonal (a), square (b), triangular (c)

Корреляционная функция записывается как $\tilde{K}(\boldsymbol{\rho}) = \tilde{g}(\boldsymbol{\rho}) - \tilde{n}_0$. Переход от порядка (идеального кристалла) к беспорядку (газу твердых дисков) осуществляется, с одной стороны, образованием дефектов типа вакансий, когда существует вероятность отсутствия частицы в узле [11], с другой – разрушением самой решетки [11]. На первом этапе функцию распределения запишем как

$$\tilde{g}(\boldsymbol{\rho}) = \begin{cases} n_0 + \tilde{K}(\boldsymbol{\rho}) = n_0 + \left(\sum_i \delta^{(2)}(\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}_i) - \tilde{n}_0 \right) e^{-\lambda(\rho - 2R)}, & \rho > 2R, \\ 0 & , \rho < 2R, \end{cases} \quad (2)$$

где n_0 – поверхностная плотность частиц в образце; $\tilde{g}(\boldsymbol{\rho})$ обозначает функцию распределения на данном этапе. При этом подразумевается, что радиус дисков меньше радиуса вписанной в ячейку окружности. Формула (2) записана в предположении, что корреляционная функция идеального кристалла $\tilde{K}(\boldsymbol{\rho})$ экспоненциально ограничивается при больших ρ , причем принимается во внимание, что $\tilde{g}(\boldsymbol{\rho})$ должна иметь правильную асимптотику на бесконечности, где она равна n_0 , и при $\rho < 2R$, где она равна нулю, поскольку твердые диски не могут сблизиться на расстояние меньше диаметра. На втором этапе осуществляется размазывание решетки с помощью некоторого интегрального преобразования

$$g(\boldsymbol{\rho}) = \int_{\rho' > 2R} G(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}') \tilde{g}(\boldsymbol{\rho}') d^2 \boldsymbol{\rho}', \quad \rho > 2R, \quad (3)$$

где мы положили

$$G(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}') = \Delta(\rho) \exp\left(-\frac{(\boldsymbol{\rho}' - \boldsymbol{\rho})^2}{2\sigma^2(\rho)}\right).$$

Интегральное преобразование осуществляет отображение множества интегрируемых функций, определенных на двумерной области $\rho > 2R$ само в себя. При $\rho < 2R$ по-прежнему считается $g(\boldsymbol{\rho}) = 0$. Нормировочный множитель $\Delta(\rho)$ равен

$$\Delta(\rho) = \left(\int_{\rho' > 2R} \exp\left(-\frac{(\boldsymbol{\rho}' - \boldsymbol{\rho})^2}{2\sigma^2(\rho)}\right) d^2 \boldsymbol{\rho}' \right)^{-1} = \left(2\pi \int_{2R}^{\infty} \exp\left(-\frac{(\rho'^2 + \rho^2)}{2\sigma^2(\rho)}\right) I_0\left(\frac{\rho'\rho}{\sigma^2(\rho)}\right) \rho' d\rho' \right)^{-1},$$

где $I_0(z)$ – функция Бесселя. В данной нормировке при действии преобразования (3) на функцию, равную некоторой константе, она не меняется. В результате находим

$$g(\boldsymbol{\rho}) = n_0 + \Delta(\rho) \left(\sum_i \exp\left(-\lambda(\rho_i - 2R) - \frac{(\boldsymbol{\rho}_i - \boldsymbol{\rho})^2}{2\sigma^2(\rho)}\right) - 2\pi \tilde{n}_0 \int_{2R}^{\infty} \exp\left(-\lambda(\rho' - 2R) - \frac{(\rho'^2 + \rho^2)}{2\sigma^2(\rho)}\right) I_0\left(\frac{\rho'\rho}{\sigma^2(\rho)}\right) \rho' d\rho' \right).$$

Поскольку мы не рассматриваем ориентационный порядок и его потерю (что также является интересной проблемой), то проведем усреднение $\bar{g}(\rho) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g(\boldsymbol{\rho}) d\phi$ по углу, задающему ориентацию вектора $\boldsymbol{\rho}$ в полярных координатах. Таким образом, все направления равноправны, и функция распределения зависит только от расстояния, но не зависит от направления. Заметим, что обычно обсуждается радиальная функция распределения $W(\rho) = \bar{g}(\rho) / n_0$, причем диаметр твердых дисков полагается равным единице. В результате приходим к следующей формуле для радиальной функции распределения:

$$W(\rho) = 1 + 2\pi\Delta(\rho) \left(\frac{1}{n_0} \sum_i N_i \exp \left(-\lambda(\rho_i - 1) - \frac{(\rho_i^2 + \rho^2)}{2\sigma^2(\rho)} \right) I_0 \left(\frac{\rho_i \rho}{\sigma^2(\rho)} \right) - \right. \\ \left. \frac{\tilde{n}_0}{n_0} \int_1^\infty \exp \left(-\lambda(\rho' - 1) - \frac{(\rho'^2 + \rho^2)}{2\sigma^2(\rho)} \right) I_0 \left(\frac{\rho' \rho}{\sigma^2(\rho)} \right) \rho' d\rho' \right), \quad (4)$$

где суммирование ведется уже не по отдельным узлам решетки, а по координационным окружностям, на которых находятся узлы, расположенные на одном расстоянии от начала координат; N_i – число узлов, лежащих на i -й координационной окружности.

Сравнение с решениями уравнения Перкуса–Йефика. Следующим вопросом является, какая именно решетка должна быть размазана, и как соотносится постоянная решетки a с радиусом дисков в зависимости от параметра заполнения $\eta = n_0 \pi R^2$. Оказывается, что в диапазоне параметров заполнения 0,3–0,62 качественное соответствие с решениями уравнения Перкуса–Йефика достигается, если размазывать квадратную решетку, причем считать параметр размывания $\sigma(\rho)$, зависящим от расстояния, т. е. пики при увеличении расстояния от выбранной частицы размываются сильнее. В частности, была использована следующая зависимость $\sigma(\rho) = \gamma\sqrt{\rho}$. С другой стороны, очевидно, что при увеличении концентрации мы должны прийти к гексагональной решетке. Таким образом, осуществляется переход от квадратной решетки к гексагональной, который может быть описан в рамках следующей модели. Предположим, что радиальная функция распределения является суммой распределений, полученных размыванием квадратной и гексагональной решеток с весовыми функциями, зависящими от расстояния:

$$W(\rho) = W_{\text{squ}}(\rho)(1 - e^{-b\rho^2}) + W_{\text{gex}}(\rho)e^{-b\rho^2}. \quad (5)$$

При больших параметрах b радиальная функция распределения определяется в основном квадратной решеткой, и только в окрестности края диска начинает играть роль гексагональная решетка. Сравнение с решениями уравнения Перкуса–Йефика показывает, что, действительно, добавление примеси гексагональной решетки улучшает совпадение. В то же время мы обнаружили, что добавление примеси треугольной решетки не приводит к улучшению, поэтому данная решетка в (5) не используется.

Для простоты мы предполагали, что параметры γ и λ , определяющие размывание и количество дефектов-вакансий, одни и те же для обеих решеток, однако константы решеток брались различными. В табл. 1 приведены параметры, при которых достигается качественное совпадение с решениями уравнений Перкуса–Йефика (рис. 2, 3). Следует заметить, что для твердых дисков на плоскости уравнение Перкуса–Йефика аналитически не решается, поэтому использовались численные методы.

Константы решеток a_{squ} и a_{gex} для моделирования квазикристаллической радиальной функции распределения при различных коэффициентах заполнения η , а также другие параметры, фигурирующие в формулах (4), (5)

Lattice constants a_{squ} and a_{gex} for the modeling of the quasi-crystal radial distribution function at different filling coefficients η as well as other parameters available in formulas (4), (5)

η	a_{squ}	a_{gex}	γ	λ	b
0,62	1,04	1,1	0,158	0,027	0,4
0,6	1,056	1,12	0,176	0,03	0,41
0,55	1,095	1,14	0,192	0,1	0,45
0,5	1,11	1,2	0,2	0,2	0,53
0,45	1,112	1,3	0,209	0,5	0,7
0,4	1,115	1,6	0,213	0,9	1,1
0,35	1,117	2,1	0,224	1,4	0,75
0,3	1,12	2,3	0,236	2	0,6

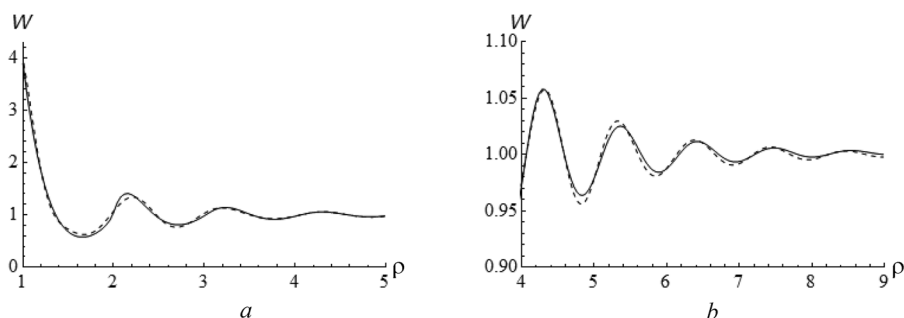


Рис. 2. Радиальная функция распределения для параметра заполнения $\eta = 0,62$ в диапазоне $\rho \in \{1, 5\}$ (a), в диапазоне $\rho \in \{4, 9\}$ («хвост» распределения) (b). Сплошная линия – решение уравнения Перкуса–Йевики, штриховая – квазикристаллическая модель

Fig. 2. Radial distribution function for the filling parameter $\eta = 0.62$ over the range $\rho \in \{1, 5\}$ (a), over the range $\rho \in \{4, 9\}$ (distribution “tail”) (b). Solid line – Percus–Yevick’s equation solution, dotted line – the quasi-crystal model

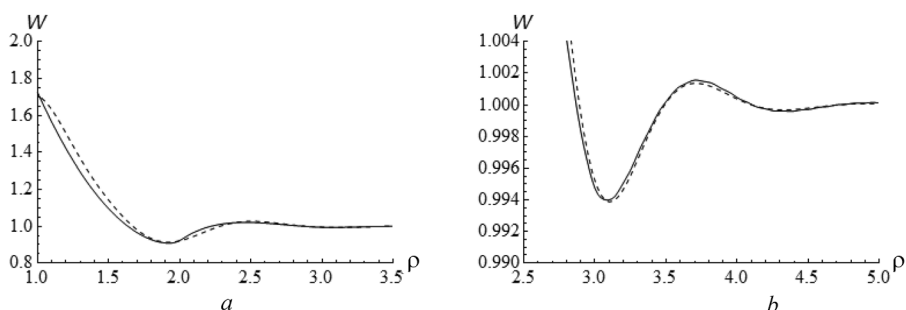


Рис. 3. Радиальная функция распределения для параметра заполнения $\eta = 0,3$ в диапазоне $\rho \in \{1, 3, 5\}$ (a), в диапазоне $\rho \in \{2, 5, 5\}$ («хвост» распределения) (b). Сплошная линия – решение уравнения Перкуса–Йевики, штриховая – квазикристаллическая модель

Fig. 3. Radial distribution function for the filling parameter $\eta = 0.3$ over the range $\rho \in \{1, 3, 5\}$ (a), over the range $\rho \in \{2.5, 5\}$ (distribution “tail”) (b). Solid line – Percus–Yevick’s equation solution, dotted line – the quasi-crystal model

Уравнение Перкуса–Йевики работает до параметров заполнения чуть более 0,6. В данной работе параметры формул (4), (5) подбирались вручную для достижения совпадения с решениями уравнения Перкуса–Йевики. В принципе, данная модель может служить базисом для вариационных методов, позволяющих найти параметры размазывания, дефектов и постоянные решеток путем минимизации некоторого функционала [12]. Также представляется интересным рассмотреть данную модель при больших параметрах заполнения, в области, где работает только метод Монте-Карло [1; 3].

Заключение. Таким образом, можно считать, что в основе такой, казалось бы, хаотической системы, как газ твердых дисков на плоскости даже при сравнительно небольших параметрах заполнения лежит квадратная решетка с некоторой примесью гексагональной решетки, существенной при малых расстояниях от центральной частицы. Обращает на себя внимание тот факт, что достаточно хорошо описываются хвосты распределений, которые трудно получить с помощью моделирования методом Монте-Карло. С математической точки зрения рассматриваемая система размазанных функций представляет собой частный случай вейвлетов. Напомним, что вейвлеты – это система локализованных функций, образуемых из базовой функции изменением центра и масштаба. Выбор системы вейвлетов во многом произволен. Выше было показано, что данная система вейвлетов позволяет качественно правильно описывать решения уравнения Перкуса–Йевики. При более высоких концентрациях, когда система становится ближе к кристаллу, точность аппроксимации должна возрасти. Предложенный в данной работе метод описания радиальной функции распределения может служить инструментом для изучения перехода системы твердых дисков из жидкого состояния в гексатическую фазу, который, как предполагают [7], является переходом первого рода. Если это так, то параметры, описывающие корреляцион-

ную функцию (константы решеток, величина размывания, примесь гексагональной решетки), должны меняться скачкообразно с изменением концентрации дисков. Мы позволим себе высказать гипотезу, что при переходе к гексатической фазе скачкообразно обращается в нуль примесь квадратной решетки. Для дальнейшего исследования данных предположений необходимо сравнение с методом моделирования Монте-Карло.

С практической точки зрения, описание радиальной функции распределения аналитическими выражениями, предложенными в данной работе, позволит повысить точность вычисления интегралов от радиальной функции распределения, возникающих в задаче о прохождении электромагнитной волны через слой плотноупакованных сферических частиц [13] или слой с упорядоченными цилиндрическими порами [14].

Благодарности. Авторы признательны И. С. Щукиной за разработку компьютерной программы для решения уравнения Перкуса–Йевика.

Acknowledgement. The authors acknowledge I. S. Shchukina for the development of the computer program for solution of the Percus–Yevick equation.

Список использованных источников

1. Fernandez, J. F. Melting of systems of hard disks by Monte Carlo simulations / J. F. Fernandez, J. J. Alonso, J. Stankiewicz // *Phys. Rev. E.* – 1997. – Vol. 55, N 1. – P. 750–764. doi.org/10.1103/physreve.55.750.
2. Adda-Bedia, M. Solution of the Percus–Yevick equation for hard disks / M. Adda-Bedia, E. Katzav, D. Vella // *J. Chem. Phys.* – 2008. – Vol. 128, N 18. – P. 184508-6. doi.org/10.1063/1.2919123.
3. Kapfer, S. C. Sampling from a polytope and hard-disk Monte Carlo / S. C. Kapfer, W. Krauth // *J. Phys.: conf. ser.* – 2013. – Vol. 454. – P. 012031-12. doi.org/10.1088/1742-6596/454/1/012031.
4. Gaal, A. T. Long-range order in a hard disk model in statistical mechanics / A. T. Gaal // *Electron. Comm. in Probab.* – 2014. – Vol. 19, N 9. – 9 pp. doi.org/10.1214/ecp.v19-3047.
5. Atkinson, S. Existence of isotatic, maximally random jammed monodisperse hard-disk packings / S. Atkinson, F. H. Stillinger, S. Torquato // *Proc. National Acad. Sci.* – 2014. – Vol. 111, N 52. – P. 18436–18441. doi.org/10.1073/pnas.1408371112.
6. Melting of 2D liquid crystal colloidal structure / A. Brodin [et al.] // *Cond. Matter Phys.* – 2010. – Vol. 13, N 3. – P. 33601-12. doi.org/10.5488/cmp.13.33601.
7. Hard-disk equation of state: First-order liquid-hexatic transition in two dimensions with three simulation methods / M. Engel [et al.] // *Phys. Rev. E.* – 2013. – Vol. 87, N 4. – P. 042134-8. doi.org/10.1103/physreve.87.042134.
8. Sokołowski, S. A note on the two-dimensional radial distribution function / S. Sokołowski // *Czec. J. Phys. B.* – 1978. – Vol. 28, N 7. – P. 713–720. doi.org/10.1007/bf01595993.
9. Коваленко, Н. П. Метод интегральных уравнений в статистической теории жидкости / Н. П. Коваленко, И. З. Фишер // *УФН.* – 1972. – Т. 108, № 2. – С. 209–239.
10. Аринштейн, Э. А. Модель фазового перехода жидкость–кристалл и квазикристаллическая модель жидкости / Э. А. Аринштейн // *ТМФ.* – 2007. – Т. 151, № 1. – С. 155–171. doi.org/10.4213/tmf6018.
11. Черкас, Н. Л. Модель радиальной функции распределения пор в слое пористого оксида алюминия / Н. Л. Черкас, С. Л. Черкас // *Кристаллография.* – 2016. – Т. 61, № 2. – С. 285–290. doi.org/10.7868/s0023476115060053.
12. Аринштейн, Э. А. Прямой вариационный метод в теории жидкости / Э. А. Аринштейн // *ТМФ.* – 2004. – Т. 141, № 1. – С. 152–160. doi.org/10.4213/tmf109.
13. Hong, K. M. Multiple scattering of electromagnetic waves by a crowded monolayer of spheres: Application to migration imaging films / K. M. Hong // *JOSA.* – 1980. – Vol. 70, N 7. – P. 821–826. doi.org/10.1364/josa.70.000821.
14. Anisotropic light scattering in nanoporous materials: A Photon Density of States Effect / A. A. Lutich [et al.] // *Nano Lett.* – 2004. – Vol. 4, N 9. – P. 1755–1758. doi.org/10.1021/nl049620e.

References

1. Fernandez J. F., Alonso J. J., Stankiewicz J. Melting of systems of hard disks by Monte Carlo simulations. *Physical Review E*, 1997, vol. 55, no. 1, pp. 750–764. doi.org/10.1103/physreve.55.750.
2. Adda-Bedia M., Katzav E., Vella D. Solution of the Percus–Yevick equation for hard disks. *The Journal of Chemical Physics*, 2008, vol. 128, no. 18, pp. 184508-6. doi.org/10.1063/1.2919123.
3. Kapfer S. C., Krauth W. Sampling from a polytope and hard-disk Monte Carlo. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, vol. 454, no. 1, pp. 012031-12. doi.org/10.1088/1742-6596/454/1/012031.
4. Gaal A. T. Long-range order in a hard disk model in statistical mechanics. *Electronic Communications in Probability*, 2014, vol. 19, no. 9, 9 pp. doi.org/10.1214/ecp.v19-3047.
5. Atkinson S., Stillinger F. H., Torquato S. Existence of isotatic, maximally random jammed monodisperse hard-disk packings. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, vol. 111, no. 52, pp. 18436–18441. doi.org/10.1073/pnas.1408371112.

6. Brodin A., Nych A., Ognysta U., Lev B., Nazarenko V., Skarabot M., Musevio I. Melting of 2D liquid crystal colloidal structure. *Condensed Matter Physics*, 2010, vol. 13, no. 3, pp. 33601-12. doi.org/10.5488/cmp.13.33601.
7. Engel M., Anderson J. A., Glotzer S. C., Isobe M., Bernard E. P., Krauth W., Hard-disk equation of state: First-order liquid-hexatic transition in two dimensions with three simulation methods. *Physical Review E*, 2013, vol. 87, no. 4, pp. 042134-8. doi.org/10.1103/physreve.87.042134.
8. Sokołowski S. A note on the two-dimensional radial distribution function. *Czechoslovak Journal of Physics*, 1978, vol. 28, no. 7, pp. 713–720. doi.org/10.1007/bf01595993.
9. Kovalenko N. P., Fisher I. Z. Method of integral equations in statistical theory of liquids. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1972, vol. 108, no. 10, pp. 209–239 (in Russian). doi.org/10.3367/ufnr.0108.197210a.0209.
10. Arinshtein É. A. A model of the liquid-crystal phase transition and the quasicrystal model of liquid. *Theoretical and Mathematical Physics*, 2007, vol. 151, no. 1, pp. 571–585. doi:10.1007/s11232-007-0043-y.
11. Cherkas N. L., Cherkas S. L. Model of the radial distribution function of pores in a layer of porous aluminum oxide. *Crystallography reports*, 2016, vol. 61, no. 2, pp. 285–290. doi:10.1134/S106377451506005X.
12. Arinshtein É. A. Direct Variational Method in the Theory of Liquids. *Theoretical and Mathematical Physics*, 2004, vol. 141, no. 1, pp. 1461–1468. doi:10.1023/B:TAMP.0000043861.74454.65.
13. Hong K. M. Multiple scattering of electromagnetic waves by a crowded monolayer of spheres: Application to migration imaging films. *Journal of the Optical Society of America*, 1980, vol. 70, no. 7, pp. 821–826. doi.org/10.1364/josa.70.000821.
14. Lutich A. A., Gaponenko S. V., Gaponenko N. V., Molchan I. S., Sokol V. A., Parkhutik V. Anisotropic light scattering in nanoporous materials: A Photon Density of States Effect. *Nano Letters*, 2004, vol. 4, no. 9, pp. 1755–1758. doi.org/10.1021/nl049620e.

Информация об авторах

Черкас Надежда Леонидовна – канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: n_cherkas@mail.ru.

Черкас Сергей Леонидович – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета (ул. Бобруйская, 11, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: cherkas@inp.bsu.by.

Для цитирования

Черкас, Н. Л. Квазикристаллическая модель радиальной функции распределения твердых дисков на плоскости / Н. Л. Черкас, С. Л. Черкас // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 18–24.

Information about the authors

Cherkas Nadezhda Leonidovna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Lecturer, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: n_cherkas@mail.ru.

Cherkas Sergei Leonidovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior researcher, Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (11, Bobruiskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: cherkas@inp.bsu.by.

For citation

Cherkas N. L., Cherkas S. L. Quasi-crystal model of the radial distribution function for hard disks in the plane. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 18–24 (in Russian).

ISSN 0002–354X (print)

УДК 536.424

Поступило в редакцию 25.01.2017

Received 25.01.2017

Член-корреспондент И. О. Троянчук¹, М. В. Бушинский¹, Г. М. Чобот², А. В. Никитин¹¹*НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Республика Беларусь*²*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь***МАГНИТНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ
В ПЕРОВСКИТАХ $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 0,2$)**

Перовскиты $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 0,2$) были исследованы методами дифракции нейтронов, измерения намагниченности и магниторезистивного эффекта. Показано, что ионы никеля и марганца частично упорядочены во всех составах, несмотря на замещение ионов La^{3+} на Sr^{2+} и повышение средней валентности ионов никеля. Магнитная структура изменяется от ферромагнитной ($x = 0$) к антиферромагнитной ($x \geq 0,1$), однако температура перехода в парамагнитное состояние не меняется. Магнитосопротивление в ферромагнитной фазе большое и уменьшается с ростом температуры и увеличением отношения $\text{Ni}^{3+}/\text{Ni}^{2+}$. Результаты обсуждаются в модели, согласно которой ферромагнитная и антиферромагнитная части обменных взаимодействий $\text{Ni}^{2+}\text{--O--Mn}^{4+}$ близки по величине, тогда как для $\text{Ni}^{3+}\text{--O--Mn}^{4+}$ сверхобменное взаимодействие антиферромагнитно.

Ключевые слова: магнитные материалы, дифракция, магниторезистивный эффект, обменное взаимодействие.

Corresponding Member I. O. Troyanchuk¹, M. V. Bushinsky¹, G. M. Chobot², A. V. Nikitin¹¹*Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*²*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus***MAGNETIC PHASE TRANSITIONS IN $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 0.2$) PEROVSKITES**

The $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 0.2$) perovskites have been studied by the methods of neutron powder diffraction and magnetization and by magnetoresistance measurement. It was shown that Ni and Mn ions are partially ordered in spite of the presence of Ni^{3+} ions arising from La^{3+} with Sr^{2+} substitution. The magnetic structure changes from ferromagnetic ($x = 0$) to antiferromagnetic ($x \geq 0.1$); however, the transition temperature into the paramagnetic state is constant. Magnetoresistance in the ferromagnetic phase is large and gradually decreases with increasing temperature and Sr^{2+} content. The results are discussed in terms of close in value ferromagnetic and antiferromagnetic parts of $\text{Ni}^{2+}\text{--O--Mn}^{4+}$ magnetic interactions and the enforcement of 3d-O2p orbital hybridization in the magnetic field.

Keywords: magnetic materials, diffraction, magnetoresistive effect, exchange interactions.

Введение. Твердые растворы со структурой перовскита на основе марганца, никеля или кобальта являются интересными объектами благодаря большому разнообразию физических свойств, которые во многом еще не поняты. Ферромагнитные и металлические свойства манганитов и кобальтитов возникают благодаря замещению La^{3+} на Sr^{2+} и, как следствие, появлению разновалентных ионов марганца или кобальта в твердых растворах $\text{La}_{1-x}^{3+}\text{Sr}_x^{2+}\text{Mn}(\text{Co})\text{O}_3$ [1–4]. Однако есть другой путь получения диэлектрического ферромагнитного состояния путем замещения ионов марганца в антиферромагнитном $\text{La}^{3+}\text{Mn}^{3+}\text{O}_3$ ионами никеля или кобальта [5–8]. Максимальные точки Кюри получены при 50 %-ном замещении, что связывается со структурным упорядочением ионов марганца и кобальта (никеля) [5–9]. Однако в зависимости от условий синтеза можно получить сильный разброс значений точек Кюри, которые достигают 280 К для $\text{LaMn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_3$ [8; 9] и 230 К для $\text{LaMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ [6] в упорядоченных составах. В [10] предположено, что в низкотемпературных магнитных фазах 3d-ионы находятся преимущественно в трехвалентном состоянии, тогда как в высокотемпературной фазе доминируют ионы Mn^{4+} и Ni^{2+} (Co^{2+}), которые структурно упорядочены [11]. Однако методом ХМCD показано [6], что в обеих магнитных фазах Mn^{4+} и Ni^{2+} (Co^{2+}) ионные состояния являются доминирующими, что косвенно указывает на то, что структурное упорядочение разновалентных ионов играет важную роль. Не-

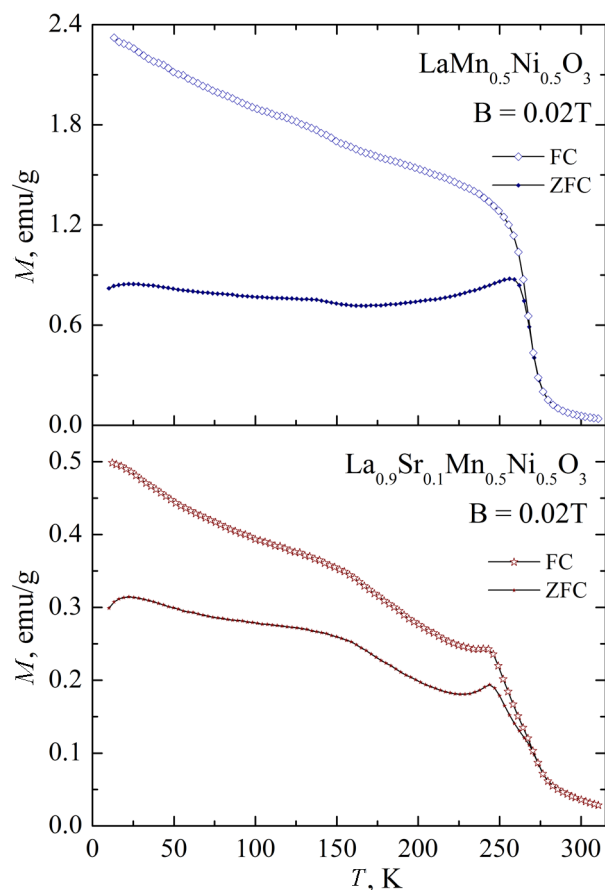


Рис. 1. ZFC- и FC-намагниченности составов $x = 0$ и $x = 0,1$ в зависимости от температуры

Fig. 1. ZFC- and FC-magnetizations of the compositions $x = 0$ and $x = 0.1$ as a function of temperature

La_2O_3 был прокален на воздухе при 1050°C . Затем исходные оксиды смешивались в стехиометрическом соотношении, перемалывались в планетарной мельнице RETCH-100 в течение 30 мин. Предварительный синтез проводился при 1100°C на воздухе. Окончательный – при 1420°C на воздухе в течение 7 ч с последующим охлаждением в течение 12 ч до 300°C . Фазовый состав определялся с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3М в $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении. Нейтронографические исследования проведены на дифрактометре E9 в Helmholtz-Zentrum for Materials and Energy (Берлин). Длина волны нейтронов $\lambda = 1,7982 \text{ \AA}$. Экспериментальные данные были обработаны методом Ритвелда, используя программу FullProf. Магнитные и магниторезистивные измерения выполнены на универсальной измерительной установке физических свойств (Cryogenic Ltd) в магнитных полях до 14 Тл и в интервале температур 5–300 К. При измерении электропроводности 4-зондовым методом в качестве контактов использовался индий, нанесенный с помощью ультразвукового паяльника.

Результаты и их обсуждение. Рентгеновский фазовый анализ в образцах $0 \leq x \leq 0,15$ не выявил наличия примесей других фаз, тог-

обходимо отметить, что разные методы исследования структурного упорядочения ионов дают противоречивые результаты. Так, согласно нейтронографическим исследованиям составов с высокой точкой Кюри (T_c), наблюдается достаточно высокая степень упорядочения разновалентных ионов [11], тогда как исследования методом электронной спектроскопии высокого разрешения позволили только в небольшом количестве зерен выявить несовершенную кристаллическую структуру, обусловленную корреляциями в расположении ионов [12].

При замещении части ионов La^{3+} ионами Sr^{2+} должен произойти сдвиг баланса зарядовых состояний от Ni^{2+} к Ni^{3+} при условии сохранения стехиометрии. При этом можно предположить, что зарядовое упорядочение должно разрушиться вследствие появления ионов Ni^{3+} . Ожидается, что такой метод замещения позволит выявить роль кристаллоструктурного упорядочения ионов никеля и марганца в магнетизме этих соединений, а также установить знак и оценить величину обменных взаимодействий между ионами Ni и Mn.

Материалы и методы исследования. Твердые растворы $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x(\text{Mn}_{0,5}\text{Ni}_{0,5})\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 0,2$) получены из оксидов и карбонатов высокой чистоты La_2O_3 , SrCO_3 , NiO и Mn_2O_3 методом твердофазных реакций. Для удаления влаги

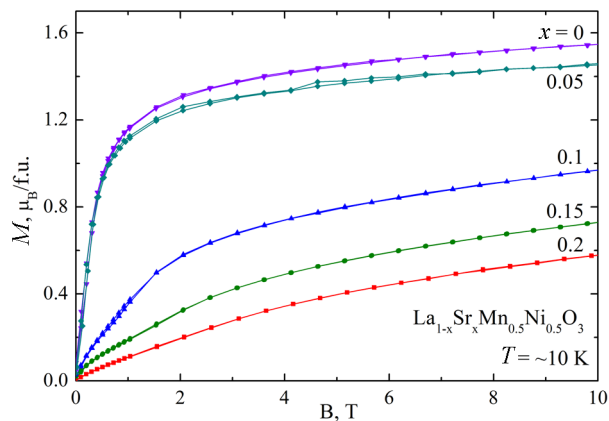


Рис. 2. Полевые зависимости намагниченности
Fig. 2. Field magnetization dependences

да как в образце $x = 0,2$ обнаружено небольшое количество примесной фазы NiO. Параметры элементарной ячейки всех образцов в интервале $0 \leq x \leq 0,2$ были рассчитаны, предполагая ромбоэдрическую структуру (пространственная группа $R\bar{3}c$). Объем элементарной ячейки уменьшался с ростом содержания Sr^{2+} . Это свидетельствует о повышении окислительного состояния ионов никеля, так как ионный радиус La^{3+} значительно меньше, чем ионный радиус Sr^{2+} , тогда как ионный радиус Ni^{3+} значительно меньше ионного радиуса Ni^{2+} .

На рис. 1 показана температурная зависимость FC (охлаждение в поле) и ZFC (охлаждение без поля) намагниченностей образцов $x = 0$ и $x = 0,1$, измеренных в малых магнитных полях. Полученный нами $LaMn_{0,5}Ni_{0,5}O_3$ является ферромагнетиком с T_c около 270 К (рис. 1). Неожиданно оказалось, что критическая температура перехода в парамагнитное состояние не уменьшалась по мере роста содержания стронция (рис. 1). Этот факт находится в контрасте с резким уменьшением по мере роста содержания Sr^{2+} спонтанной намагниченности при низкой температуре. Спонтанная намагниченность практически отсутствует в составах $x \geq 0,15$ (рис. 2). Отсутствие насыщения намагниченности в больших магнитных полях свидетельствует о конкуренции разного знака обменных магнитных взаимодействий, которые при замещении La^{3+} на Sr^{2+} , по-видимому, становятся преимущественно антиферромагнитными.

Согласно исследованиям электрических свойств все составы являются полупроводниковыми с высоким электросопротивлением при относительно низких температурах – 10^7 – 10^8 Ом·см. В точках перехода в магнитоупорядоченное состояние аномалий электропроводности не обнаружено. Магниторезистивный эффект имеет большее значение при низких температурах и постепенно уменьшается с повышением температуры, а также ростом содержания стронция при $x \geq 0,1$ (рис. 3). В точке Кюри увеличения магниторезистивного эффекта не наблюдалось. В отличие от работы [8], мы не обнаружили низкополевого туннельного магниторезистивного эффекта ни при каких температурах. Это можно объяснить тем, что носители заряда относительно слабо поляризованы по спину и магниторезистивный эффект, возможно, связан с кристаллоструктурным и магнитным беспорядком и гибридизацией $3d$ - $O2p$ орбиталей, которая усиливается в магнитном поле.

Нейтроннографические дифракционные исследования составов $x = 0,1$ и $x = 0,2$ были проведены в интервале температур 4–300 К. Нейтронный дифракционный спектр состава $x = 0,1$ приведен на рис. 4 при температурах 4 и 300 К. При температуре 300 К дифракционные пики были успешно проиндексированы на основе ромбоэдрической пространственной группы $R\bar{3}$. Это означает, что ионы марганца и никеля кристаллоструктурно упорядочены. Ниже температуры 300 К наблюдался заметный рост пика (101), вклад в который дает кристаллоструктурное и магнитное упорядочение. Увеличение интенсивности этого пика указывает на антиферромагнитное упорядочение G-типа (шахматный магнитный порядок). Рост интенсивности этого пика практически совпадает с высокотемпературной аномалией магнитных свойств и появлением спонтанной на-

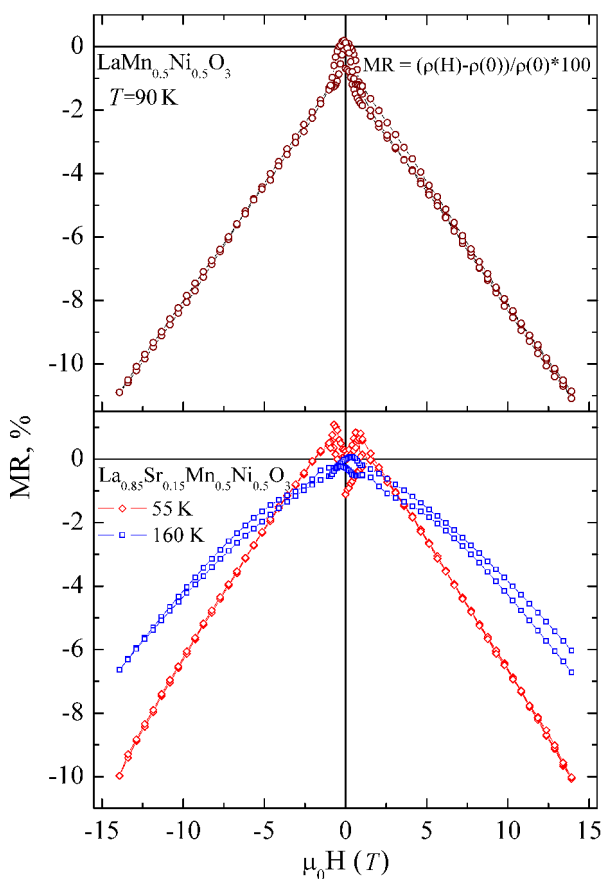


Рис. 3. Полевые зависимости магниторезистивного эффекта составов $x = 0$ и $x = 0,15$

Fig. 3. Field dependences of the magnetoresistance effect of the compositions $x = 0$ and $x = 0,15$

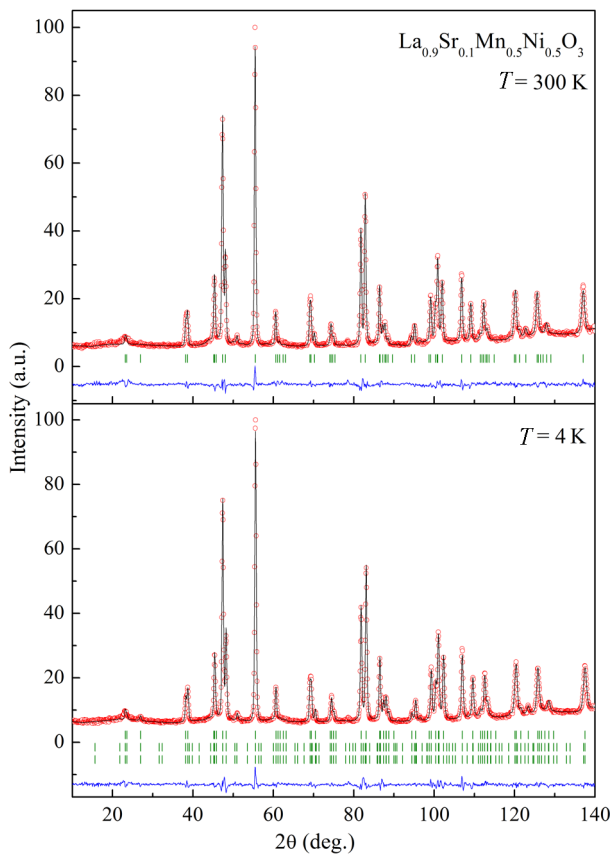


Рис. 4. Рассчитанные и экспериментально определенные дифракционные спектры состава $x = 0,1$ при $T = 4$ и 300 К. Нижняя кривая показывает их разность. Верхние штрихи относятся к кристаллоструктурной фазе, нижние – к антиферромагнитной и ферромагнитной фазам

Fig. 4. Predicted and experimental diffraction spectra of the composition $x = 0.1$ at $T = 4$ and 300 K. The lower curve denotes their difference. The upper primes refer to the crystal-structural phase, the lower ones – the antiferromagnetic and ferromagnetic phases

всегда антиферромагнитны, также как и взаимодействия между ионами $\text{Ni}^{2+}\text{--O--Ni}^{2+}$ [13]. Поэтому считается, что ферромагнетизм $\text{LaMn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_3$ возникает вследствие положительного обменного взаимодействия между Ni^{2+} и Mn^{4+} . Однако магнитный момент синтезированного нами соединения с $x = 0$ существенно ниже рассчитанного в ионной модели. Наиболее вероятная интерпретация этого экспериментального факта заключается в том, что образец состоит не только из структурно упорядоченных областей, где доминируют ионы никеля в состоянии Ni^{2+} и ионы марганца в состоянии Mn^{4+} . В этих областях количество обменных связей оптимально, намагниченность, а также температура Кюри большие. В других областях, где в существенном количестве находятся ионы Ni^{3+} и Mn^{3+} , структурное упорядочение Ni^{3+} и Mn^{3+} разрушается, появляются антиферромагнитные связи и температура Кюри и намагниченность уменьшаются. Ионы Sr^{2+} переводят все ионы марганца в четырехвалентное состояние и тенденция к ионному упорядочению сохраняется несмотря на присутствие ионов Ni^{3+} , которые, по-видимому, антиферромагнитно взаимодействуют с ионами Mn^{4+} . В случае, когда величина части положительного обменного взаимодействия $\text{Ni}^{2+}\text{--O--Mn}^{4+}$ близка к величине части антиферромагнитного обмена $\text{Ni}^{2+}\text{--O--Mn}^{4+}$, может реализоваться суммарная антиферромагнитная структура приблизительно с такой же температурой перехода в парамагнитное состояние, как и в ферромагнитно упорядоченном образце, не замещенном ионами Sr^{2+} , так как кристаллоструктурное упорядочение сохраняется.

магнитности. Следует отметить, что ширина пика (101) намного больше ширины других дифракционных пиков. Это указывает на наноструктурно неоднородный характер упорядочения ионов никеля и марганца и их магнитных моментов. Результаты расчета магнитной и кристаллической структур представлены в таблице. Наблюдалось хорошее соответствие экспериментальных и рассчитанных данных. Уточненное значение содержания анионов кислорода соответствует стехиометрическому значению. Это означает, что часть ионов никеля находится в трехвалентном состоянии, а весь марганец является четырехвалентным. Антиферромагнитный момент при 4 К равен $\pm 0,4\mu_B$ на формульную единицу, что значительно меньше, чем можно ожидать в однородной магнитной структуре. Структурные параметры соединения $x = 0,2$ близки к параметрам состава $x = 0,1$, однако антиферромагнитный момент несколько больше – $0,7\mu_B$, тогда как объем элементарной ячейки меньше.

В составе $x = 0,1$ был обнаружен магнитный вклад в рефлекс (102). Это означает наличие ферромагнитной компоненты. Оцененная величина ферромагнитной компоненты равна $0,9\mu_B$ на формульную единицу (таблица).

Для того чтобы понять изменение магнитных свойств этой системы при замещении La^{3+} на Sr^{2+} , необходимо знать знак и величину обменных взаимодействий между $3d$ -ионами, входящими в решетку структуры перовскита. Взаимодействия между ионами $\text{Mn}^{4+}\text{--O--Mn}^{4+}$

Кристаллоструктурные и магнитные параметры состава $x = 0,1$, определенные из дифракции нейтронов по методу Ритвельда

Crystal-structural and magnetic parameters of the composition $x = 0.1$ determined from the neutron diffraction by the Rietveld method

Temperature (K)	4	300
Space group	<i>R</i> -3	<i>R</i> -3
<i>a</i> (Å)	5,4911(1)	5,4950(1)
<i>c</i> (Å)	13,2014(2)	13,2437(2)
<i>V</i> (Å ³)	344,728(6)	346,317(7)
La/Sr: <i>x</i>	0	0
<i>y</i>	0	0
<i>z</i>	0,2509(3)	0,2519(4)
<i>Biso</i> (Å ²)	0,12(4)	0,55(4)
*Mn: (<i>x y z</i>)	(0 0 ½)	(0 0 ½)
<i>Biso</i> (Å ²)	0,43(7)	0,53(7)
*Ni: (<i>x y z</i>)	(0 0 0)	(0 0 0)
<i>Biso</i> (Å ²)	0,43(7)	0,53(7)
O: <i>x</i>	0,5501(5)	0,5468(5)
<i>y</i>	-0,0018(9)	-0,0049(8)
<i>z</i>	0,2506(3)	0,2508(3)
<i>Biso</i> (Å ²)	0,44(3)	0,81(3)
μ_F (μ _B)	0,9	–
μ_{AF} (μ _B)	0,4	–
χ^2/R_{wp} (%)	2,30/4,12	2,65/4,37
R_{Bragg} (%) / R_{mag} (%)	2,68/47,4	5,47/–

Пр и м е ч а н и е. * – уточненное количество антисайтовских дефектов составляет 34 %.

N o t e. * – the refined number of anti-site defects is 34 %.

Заключение. Проведено исследование магнитных и транспортных свойств соединения $\text{LaMn}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}\text{O}_3$ с замещением ионов La^{3+} на ионы Sr^{2+} , используя методы измерения дифракции нейтронов, намагниченности и магниторезистивного эффекта. Показано, что легирование ионами Sr^{2+} ведет к изменению основного магнитного состояния из ферромагнитного к антиферромагнитному даже при небольшом замещении ионов La^{3+} на ионы Sr^{2+} . При этом температура Кюри нелегированных составов совпадает с температурой Нееля составов, легированных ионами Sr^{2+} . Магниторезистивный эффект уменьшается с ростом температуры и увеличением содержания Sr^{2+} . Результаты объясняются в модели, согласно которой положительная часть обменного взаимодействия $\text{Ni}^{2+}-\text{O}-\text{Mn}^{4+}$ близка по величине к отрицательной части обменного взаимодействия $\text{Ni}^{2+}-\text{O}-\text{Mn}^{4+}$, тогда как обменное взаимодействие $\text{Ni}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{4+}$ является отрицательным. Большой отрицательный магниторезистивный эффект связан с наличием структурного и магнитного беспорядка и относительно большой гибридизацией 3d-O_{2p} состояний, усиливающейся во внешнем магнитном поле.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Ф15Д-002).

Acknowledgement. The work has been financially supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Grant no. Ф15Д-002).

Список использованных источников

1. Raccah, P. First-Order Localized-Electron \rightleftharpoons Collective-Electron Transition in LaCoO_3 / P. M. Raccah, J. B. Goodenough // *Phys. Rev.* – 1967. – Vol. 155, N 3. – P. 932–943. doi.org/10.1103/physrev.155.932.
2. Señaris-Rodríguez, M. A. Magnetic and Transport Properties of the System $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_{3-\delta}$ ($0 < x \leq 0.50$) / M. A. Señaris-Rodríguez, J. B. Goodenough // *J. Solid State Chem.* – 1995. – Vol. 118, N 2. – P. 323–336. doi.org/10.1006/jssc.1995.1351.

3. Zhou, J.-S. Paramagnetic phase in single-crystal LaMnO_3 / J.-S. Zhou, J. B. Goodenough // *Phys. Rev. B.* – 1999. – Vol. 60, N 22. – P. 15002–15004. doi.org/10.1103/physrevb.60.r15002.
4. Tokura, Y. Critical features of colossal magnetoresistive manganites / Y. Tokura // *Rep. Prog. Phys.* – 2006. – Vol. 69, N 3. – P. 797–851. doi.org/10.1088/0034-4885/69/3/r06.
5. Magnetic phase diagrams of the $\text{Ln}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)\text{O}_3$ (Ln=Eu, Nd, Y) systems / I. O. Troyanchuk [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2000. – Vol. 88, N 1. – P. 360–367. doi.org/10.1063/1.373668.
6. Local electronic structure and magnetic properties of $\text{LaMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ studied by *x*-ray absorption and magnetic circular dichroism spectroscopy / T. Burnus [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2008. – Vol. 77, N 12. – P. 125124. doi.org/10.1103/physrevb.77.125124.
7. Valence states and metamagnetic phase transition in partially *B*-site-disordered perovskite $\text{EuMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ / A. N. Vasiliev [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2008. – Vol. 77, N 10. – P. 104442. doi.org/10.1103/physrevb.77.104442.
8. Near room-temperature magnetoresistance effect in double perovskite $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$ / Yuqiao Guo [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2013. – Vol. 102, N 22. – P. 222401. doi.org/10.1063/1.4808437.
9. Tunable exchange bias effect in Sr-doped double perovskite $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$ / Yuqiao Guo [et al.] // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2013. – Vol. 46, N 17. – P. 175302. doi.org/10.1088/0022-3727/46/17/175302.
10. Joseph Joly, V. L. Effect of R on the magnetic transition temperature of $\text{RMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ / V. L. Joseph Joly, P. A. Joy, S. K. Date // *Solid State Com.* – 2002. – Vol. 121, N 4. – P. 219–222. doi.org/10.1016/s0038-1098(01)00456-2.
11. Colossal magnetoresistance without $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ double exchange in the stoichiometric pyrochlore $\text{Ti}_2\text{Mn}_2\text{O}_7$ / M. A. Subramanian [et al.] // *Science.* – 1996. – Vol. 273, N 5271. – P. 81–84. doi.org/10.1126/science.273.5271.81.
12. Giant frequency dependence of dynamic freezing in nanocrystalline ferromagnetic $\text{LaCo}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$ / R. Mahendiran [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2003. – Vol. 68, N 10. – P. 104402. doi.org/10.1103/physrevb.68.104402.
13. Goodenough, J. B. Theory of the Role of Covalence in the Perovskite-Type Manganites $[\text{La}, \text{M}(\text{II})]\text{MnO}_3$ / J. B. Goodenough // *Phys. Rev.* – 1955. – Vol. 100, N 2. – P. 564–573. doi.org/10.1103/physrev.100.564.

References

1. Raccah P., Goodenough J. B. First-Order Localized-Electron \rightleftharpoons Collective-Electron Transition in LaCoO_3 . *Physical Review*, 1967, vol. 155, no. 3, pp. 932–943. doi.org/10.1103/physrev.155.932.
2. Señaris-Rodríguez M. A., Goodenough J. B. Magnetic and Transport Properties of the System $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_{3-\delta}$ ($0 < x \leq 0.50$). *Journal of Solid State Chemistry*, 1995, vol. 118, no. 2, pp. 323–336. doi.org/10.1006/jssc.1995.1351.
3. Zhou J.-S., Goodenough J. B. Paramagnetic phase in single-crystal LaMnO_3 . *Physical Review B*, 1999, vol. 60, no. 22, pp. 15002–15004. doi.org/10.1103/physrevb.60.r15002.
4. Tokura Y. Critical features of colossal magnetoresistive manganites. *Reports on Progress in Physics*, 2006, vol. 69, no. 3, pp. 797–851. doi.org/10.1088/0034-4885/69/3/r06.
5. Troyanchuk I. O., Khalyavin D. D., Lynn J. W., Erwin R. W., Huang Q., Szymczak H., Szymczak R., Baran M. Magnetic phase diagrams of the $\text{Ln}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)\text{O}_3$ (Ln=Eu, Nd, Y) systems. *Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 88, no. 1, pp. 360–367. doi.org/10.1063/1.373668.
6. Burnus T., Hu Z., Hsieh H. H., Joly V. L. J., Joy P. A., Haverkort M. W., Hua Wu, Tanaka A., Lin H.-J., Chen C. T., Tjeng L. H. Local electronic structure and magnetic properties of $\text{LaMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ studied by *x*-ray absorption and magnetic circular dichroism spectroscopy. *Physical Review B*, 2008, vol. 77, no. 12, pp. 125124. doi.org/10.1103/physrevb.77.125124.
7. Vasiliev A. N., Volkova O. S., Lobanovskii L. S., Troyanchuk I. O., Hu Z., Tjeng L. H., Khomskii D. I., Lin H.-J., Chen C. T., Tristan N., Kretzschmar F., Klingeler R., Büchner B. Valence states and metamagnetic phase transition in partially *B*-site-disordered perovskite $\text{EuMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$. *Physical Review B*, 2008, vol. 77, no. 10, pp. 104442. doi.org/10.1103/physrevb.77.104442.
8. Yuqiao Guo, Lei Shi, Shiming Zhou, Jiyin Zhao, Wenjie Liu. Near room-temperature magnetoresistance effect in double perovskite $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$. *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 102, no. 22, pp. 222401. doi.org/10.1063/1.4808437.
9. Yuqiao Guo, Lei Shi, Shiming Zhou, Jiyin Zhao, Cailin Wang, Wenjie Liu, Shiqiang Wei. Tunable exchange bias effect in Sr-doped double perovskite $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, vol. 46, no. 17, pp. 175302. doi.org/10.1088/0022-3727/46/17/175302.
10. Joseph Joly V. L., Joy P. A., Date S. K. Effect of R on the magnetic transition temperature of $\text{RMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$. *Solid State Communications*, 2002, vol. 121, no. 4, pp. 219–222. doi.org/10.1016/s0038-1098(01)00456-2.
11. Subramanian M. A., Toby B. H., Ramirez A. P., Marshall W. J., Sleight A. W., Kwei G. H. Colossal magnetoresistance without $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ double exchange in the stoichiometric pyrochlore $\text{Ti}_2\text{Mn}_2\text{O}_7$. *Science*, 1996, vol. 273, no. 5271, pp. 81–84. doi.org/10.1126/science.273.5271.81.
12. Mahendiran R., Bréard Y., Hervieu M., Raveau B., Schiffer P. Giant frequency dependence of dynamic freezing in nanocrystalline ferromagnetic $\text{LaCo}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$. *Physical Review B*, 2003, vol. 68, no. 10, pp. 104402. doi.org/10.1103/physrevb.68.104402.
13. Goodenough J. B. Theory of the Role of Covalence in the Perovskite-Type Manganites $[\text{La}, \text{M}(\text{II})]\text{MnO}_3$. *Physical Review*, 1955, vol. 100, no. 2, pp. 564–573. doi.org/10.1103/physrev.100.564.

Информация об авторах

Троянчук Игорь Олегович – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: troyan@physics.by.

Бушинский Максим Владиславович – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: byshinsky@physics.by.

Чобот Геннадий Михайлович – канд. физ.-мат. наук, доцент, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: g.m.chobot@tut.by.

Никитин Александр Владимирович – мл. науч. сотрудник, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shyrik_n@tut.by.

Для цитирования

Магнитные фазовые превращения в перовскитах $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 0.2$) / И. О. Троянчук [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 25–31.

Information about the authors

Troyanchuk Igor Olegovich – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Laboratory, Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: troyan@physics.by.

Bushinsky Maksim Vladislavovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior researcher, Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: byshinsky@physics.by.

Chobot Henadz Mikhailovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: g.m.chobot@tut.by.

Nikitin Alajaksandr Vladimirovich – Junior researcher, Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shyrik_n@tut.by.

For citation

Troyanchuk I. O., Bushinsky M. V., Chobot G. M., Nikitin A. V. Magnetic phase transitions in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Mn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 0.2$) perovskites. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 25–31 (in Russian).

ХИМИЯ
CHEMISTRY

УДК 678.643.42.5:667.6.620.18

Поступило в редакцию 30.01.2017

Received 30.01.2017

В. Д. Кошевар*Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ОБЛАСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ УСТОЙЧИВЫХ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ
ЭПОКСИДНЫХ ЭМУЛЬСИЙ «МАСЛО В ВОДЕ»***(Представлено членом-корреспондентом Н. Р. Прокопчуком)*

Определены области существования устойчивых концентрированных эмульсий «масло в воде» эпоксидного олигомера в зависимости от его концентрации, размеров и локализации капель дисперсной фазы. Эмульсии с концентрацией смолы ниже 50 % относятся к системам «вода в масле» низкой агрегативной устойчивости. Оптимальными по коллоидно-химическим свойствам являются эмульсии с содержанием олигомера в диапазоне 60–70 масс. %. При ДФ = 90 % уже при небольших сдвиговых нагрузках эмульсии претерпевают локальные разрывы сплошности структуры, что не позволяет им выполнять функции качественных пленкообразующих систем, несмотря на удовлетворительную кинетическую устойчивость.

Ключевые слова: эмульсия, эпоксиолигомер, дисперсная фаза, устойчивость, реология, вязкость, напряжение сдвига, скорость деформации, структура.

V. D. Koshevar*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***AREAS OF EXISTENCE OF OIL/WATER STABLE CONCENTRATED EPOXY EMULSIONS***(Communicated by Corresponding Member N. P. Prokopchuk)*

With the application of the methods of viscometry, fotosenditometry and optical microscopy, the areas of existence of steady concentrated and high-concentrated emulsions of an epoxy oligomer depending on its concentration, sizes and localization of disperse phase drops are defined.

Keywords: emulsion, epoxy oligomer, disperse phase, stability, rheology, viscosity, shear stress, strain rate, structure.

Введение. Концентрированные и высококонцентрированные эмульсии, являющиеся представителями дисперсных систем с подвижными границами фаз, представляют собой один из наиболее ярких объектов фундаментальной коллоидной химии. Повышенный интерес к ним обусловлен не только особенностью физикохимии поверхностных явлений, но и также широкой возможностью получения таких эмульсий самого различного состава, с разнообразнейшими свойствами [1–3]. Особое внимание к концентрированным эмульсиям, или, как их иногда называют, «эмульсиям-гелям» вызвано также широким их применением в промышленности, косметологии, медицине и быту, при синтезе мезо- и микропористых материалов, пенопластов, взрывных веществ. Известно их использование в качестве альтернативной реакционной среды при химическом и ферментативном каталитическом синтезе различных соединений, в том числе и с применением нанотехнологий.

Водные эмульсии готовых полимеров (эпоксидных, полиуретановых и другие так называемые искусственные латексы) – новое в мировой практике поколение водно-дисперсионных материалов, образующих покрытия с превосходными защитными свойствами. Так, известны технические решения, позволяющие получать устойчивые искусственные латексы на основе эпокси-

дов с применением в качестве эмульгаторов различного типа поверхностно-активных веществ (ПАВ), твердых органических и минеральных частиц [4–7]. Однако несмотря на многочисленные публикации, посвященные изучению устойчивости и структурообразованию данных систем, до настоящего времени не установлены границы существования концентрированных эмульсий этих высокомолекулярных соединений в зависимости от химической природы, концентрации, размеров капель дисперсной фазы и их локализации. В отличие от композиций, состоящих из низкомолекулярных компонентов, представляющих собой вязкие жидкости, дисперсная фаза в полимерных эмульсиях формируется из компонентов с вязкоупругими свойствами, что будет несомненно сказываться на их реологическом поведении. Необходимо также заметить, что именно реологические свойства эмульсий полимеров во многом определяют возможность и их практического применения.

Цель исследования – установление границ существования седиментационно и агрегативно устойчивых концентрированных водных эпоксидных эмульсий (ВЭЭ) 1-рода в зависимости от концентрации и размеров дисперсной фазы (ДФ).

Материалы и методы исследования. ВЭЭ получали путем эмульгирования эпоксидной смолы (ЭС) ЭД-20 (ГОСТ 10587–84) на основе бисфенола-А (содержание эпоксидных групп 21,3 %, эпоксиэквивалент – $202 \text{ г} \cdot \text{экв}^{-1}$) в присутствии эмульгатора на лабораторной диспергирующей установке ЛДУ-3МПП (Россия) (режим бисерной мельницы с применением стеклянных шариков диаметром 4 мм) при частоте скорости вращения мешалки $20 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и времени диспергирования 20 мин. В качестве эмульгатора использовали неионогенный полимерный ПАВ Emulsogen LCN-287 (алкил полиэтиленгликолевый эфир с 28 оксиэтиленовыми группами) производства Clariant, Германия. В качестве стабилизирующего агента применяли акриловый латекс марки PLEXTOL 540 (Германия).

Полученные ВЭ во всех случаях имели следующий состав (масс. %): дисперсная фаза (ДФ) – 30–90, эмульгатор – 4, стабилизатор – 1, вода – остальное.

Гранулометрический состав ВЭ определяли на автоматическом фотометрическом седиментометре ФСХ-4 (Россия) с программным обеспечением, который предназначен для измерения гранулометрического состава дисперсных материалов с размерами частиц в диапазоне 0,5–300 мкм. Для высоковязкой эмульсии (содержание ДФ = 90 %) распределение частиц по размеру определяли методом лазерной дифракции на лазерном анализаторе размера частиц «Analysette 22» производства Fritsch GmbH.

Реологические свойства исследуемых систем определяли на реометре «Physika MCR 101» с воздушными подшипниками (Anton Paar, Австрия) с программным обеспечением «Rheoplus» при использовании системы пластина–пластина с зазором между ними 0,05 мм. Измерение производили при температуре $(20 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$ в области скоростей деформации на сдвиг $(0,1\text{--}300) \text{ с}^{-1}$, охватывающей диапазоны гидродинамического воздействия, испытываемого системами при хранении и транспортировании $(0,1\text{--}5,0) \text{ с}^{-1}$ и перемешивании в ламинарном режиме $(10\text{--}300) \text{ с}^{-1}$. Экспериментальным путем были получены кривые вязкости $\eta_{\text{эфф}} = f(\dot{\gamma})$ и течения $\tau = f(\dot{\gamma})$, где $\dot{\gamma}$ – скорость деформации, с^{-1} ; τ – напряжение сдвига, Па; $\eta_{\text{эфф}}$ – эффективная вязкость, Па · с. При этом соблюдали стационарный режим в диапазоне установившихся скоростей сдвига. Использовали методику измерения при $\dot{\gamma} = \text{const}$ (деформирование в каждом опыте с заданной $\dot{\gamma}$, поддерживаемой для всего данного опыта постоянной: равновесные условия стационарного потока).

Фотоснимки морфологии капель дисперсной фазы были получены с применением оптического микроскопа A. Kruss Optronic GmbH MMB2300 (Германия) при увеличении 400 крат.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены результаты исследования реологического поведения ВЭЭ с различной концентрацией эпоксидного олигомера. Из рис. 1 (обр. 2) следует, что 40 %-ная эмульсия представляет собой жидкообразную систему с вязкостью (η) инвариантной по отношению к изменению скорости деформации. При более высоких концентрациях смолы эмульсии ведут себя как неньютоновские жидкости. Из более ранних данных установлено, при эмульгировании олигомера ЭД-20 в водной среде с содержанием смолы менее 40 % в аналогичных условиях образуются эмульсии «вода в масле» с весьма низкой устойчивостью [4].

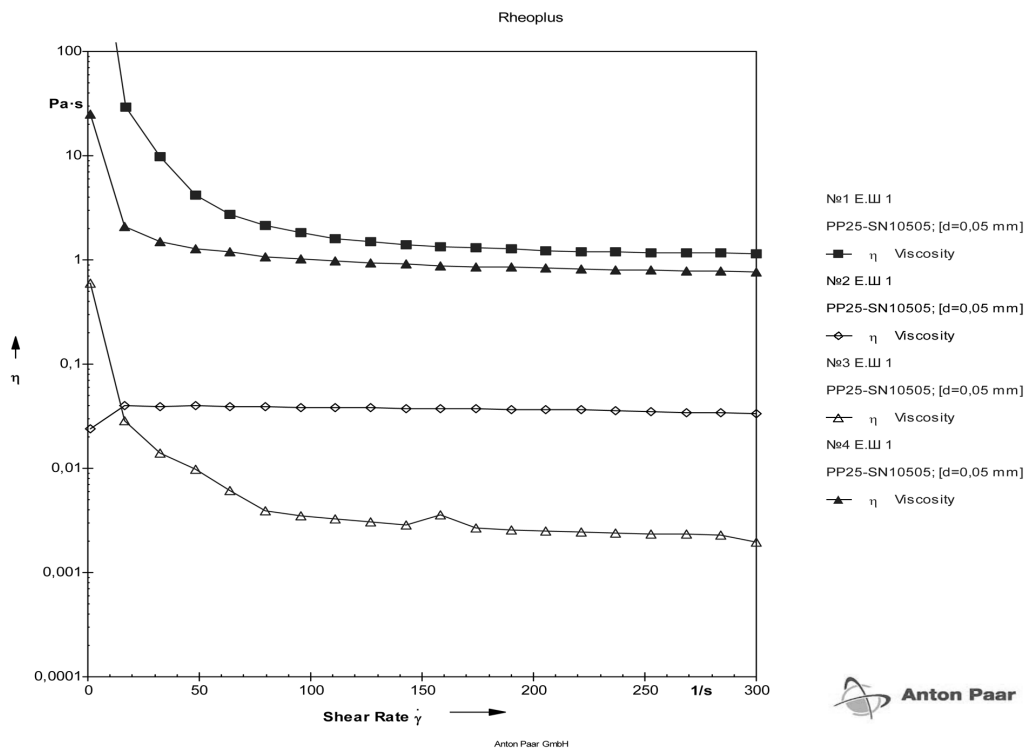


Рис. 1. Зависимость эффективной вязкости от скорости деформации эпоксидных эмульсий с различным содержанием дисперсной фазы в масс. %: 1 – 90, 2 – 40, 3 – 60, 4 – 70

Fig. 1. Effective viscosity as a function of deformation rate of epoxy emulsions with different dispersion phase content, mass. %: 1 – 90, 2 – 40, 3 – 60, 4 – 70

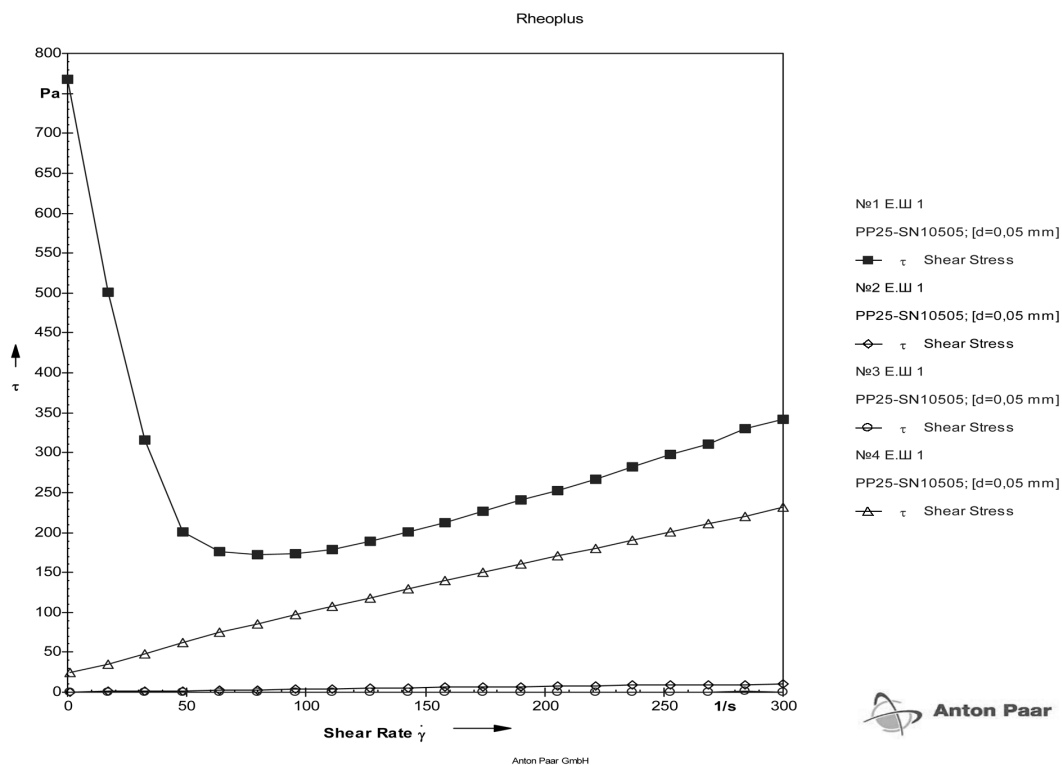


Рис. 2. Реологические кривые течения эпоксидных эмульсий масло/вода с различным содержанием дисперсной фазы, в масс. %: 1 – 90, 2 – 60, 3 – 40, 4 – 70

Fig. 2. Rheological flow curves for oil/water epoxy emulsions with different dispersion phase content, mass. %: 1 – 90, 2 – 60, 3 – 40, 4 – 70

При достижении ДФ 50 % наблюдали изменения типа эмульсий. Зафиксировано значительное (от 0,04 до 46 Па · с) возрастание эффективной вязкости условно неразрушенной структуры. В образующихся 40–50 %-ных эмульсиях масло/вода через несколько часов наблюдали расслоение фаз. С увеличением скорости деформации наблюдается значительное падение этой вязкости с выходом зависимости на плато при $\dot{\gamma}$ равном 150 c^{-1} , что свидетельствует о разрушении ранее образовавшейся относительно невысокой прочности структурной сетки в результате проявляющегося межфазного взаимодействия капель смолы, разделенных прослойками дисперсионной среды, эмульгатора, микроглобул латекса и, возможно, капелек микроэмульсий. Зависимость напряжения сдвига τ от задаваемой скорости деформации $\dot{\gamma}$ для образцов с содержанием дисперсной фазы 40–60 % выражается прямыми линиями, выходящими из нулевой точки координат с очень небольшим ростом τ (Па) при увеличении $\dot{\gamma}$ (рис. 2, обр. 2, 3). С увеличением концентрации олигомера в эмульсии до 70 % ее течение приобретает вязкопластичный характер с появлением статического предела текучести τ_k , равного 25 Па (рис. 2, обр. 4). Прямопропорциональная зависимость между напряжением и скоростью сдвиговой деформации с небольшим статическим пределом текучести (ползучести) свидетельствует о невысокой прочности образуемой при данной концентрации ДФ структуры (рис. 2, обр. 4) с некоторыми элементами упругости.

Совершенно иной характер реологического поведения эмульсии наблюдали при содержании ДФ 90 %. Условная вязкость практически неразрушенной структуры такой системы возрастает на несколько порядков (рис. 1, обр. 1), а кривая зависимости τ от $\dot{\gamma}$ носит аномальный вид с выраженным минимумом при $\tau = 63 \text{ Па}$. Очень высокое значение статического предела текучести (рис. 3, обр. 1), равное 770 Па, свидетельствует о высокой прочности образующегося структурного каркаса в результате уменьшения свободного объема дисперсионной среды, сближения микро- и макрокапель, усиления их притяжения. Такая система приобретает уже заметную упру-

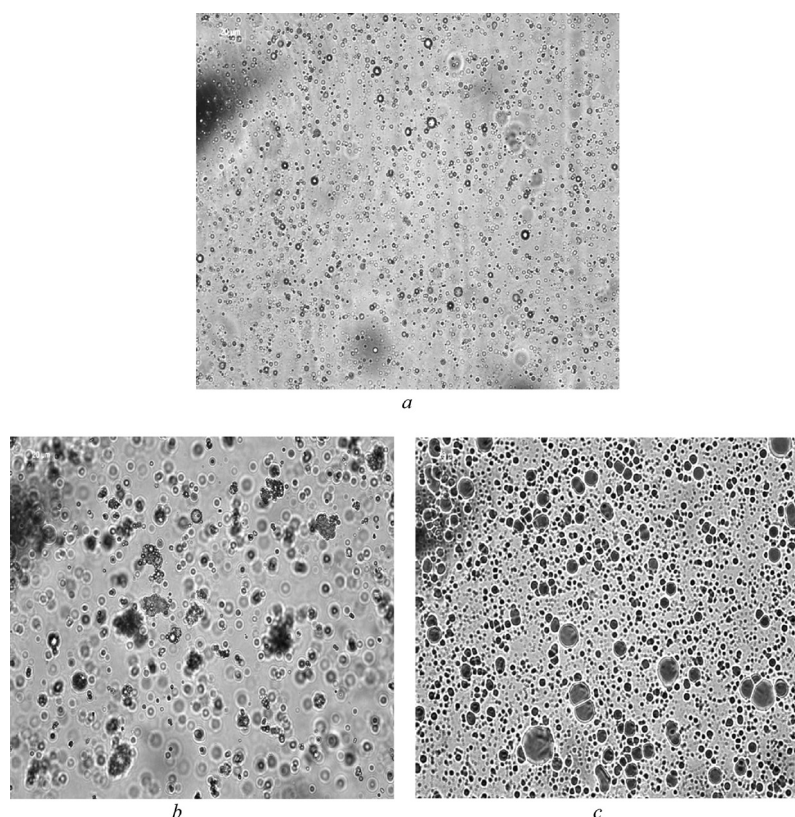


Рис. 3. Микрофотографии эмульсий масло/вода олигомера ЭД-20 с различной концентрацией дисперсной фазы (в масс. %): *a* – 60, *b* – 70, *c* – 90

Fig. 3. Microphotograph of oil/water oligomer ED-20 emulsions with different dispersion phase concentration, mass. %: *a* – 60, *b* – 70, *c* – 90

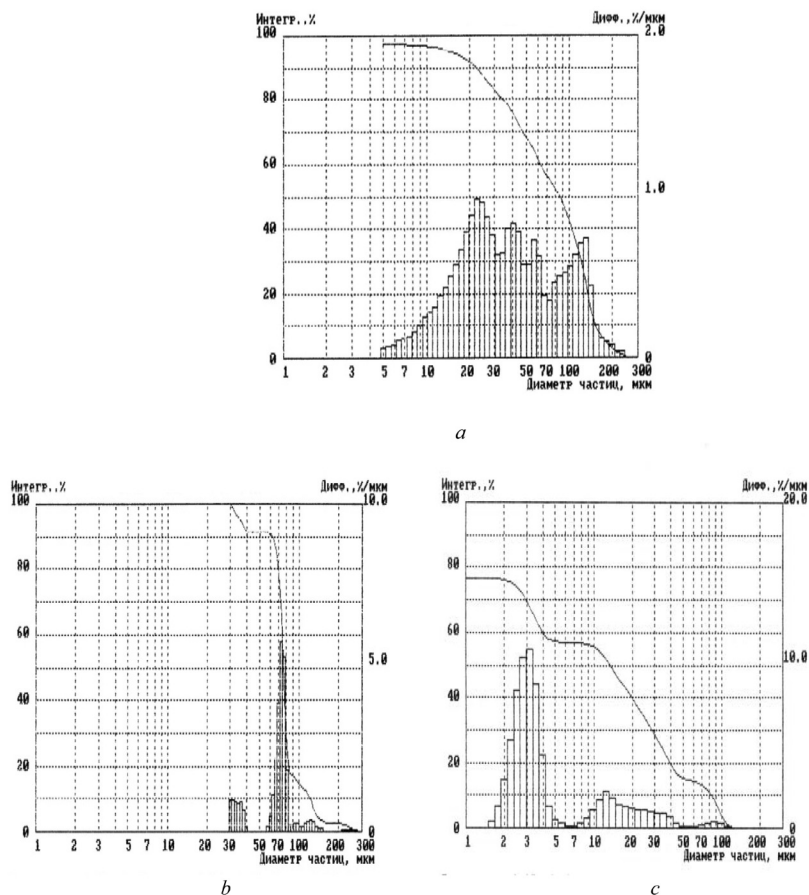


Рис. 4. Кривые распределения масс капель по размерам эмульсий ЭД-20, полученных при разной концентрации смолы, масс. %: 40 (а), 50 (б), 60 (с)

Fig. 4. Curves for the size drop mass distribution of oligomer ED-20 emulsions obtained at different resin concentration, mass. %: 40 (a), 50 (b), 60 (c)

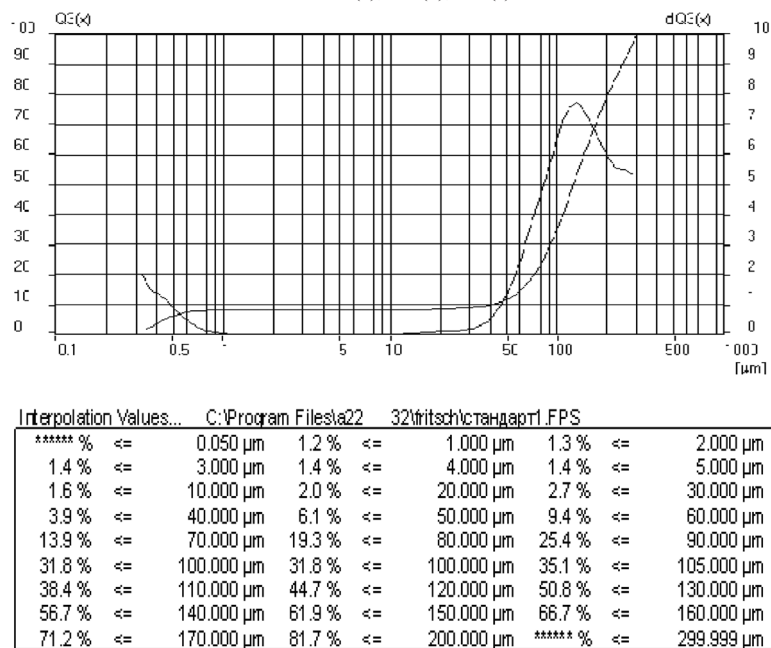


Рис. 5. Кривые распределения частиц по размерам и гранулометрический состав эмульсий эпоксиного олигомера с концентрацией 90 масс. %

Fig. 5. Curves for the size particle distribution and the granulometric composition of oligomer epoxy emulsions with a concentration of 90 mass. %

гость и твердообразность. Вид кривой течения в условиях непрерывного сдвигового деформирования такой высококонцентрированной дисперсии можно объяснить разрывом сплошности структурной сетки, обнаруживаемым при малой скорости деформации (минимум на кривой течения, рис. 2, обр. 3) и невозможностью достигнуть предельного разрушения ее структурного каркаса с выходом на ньютоновское течение. Появление такого разрыва сплошности означает, что деформация структуры носит не объемный (изотропный), а местный, локальный характер (накапливается и релаксирует преимущественно в зоне границы разрыва). Эмульсия с такой концентрацией олигомера не может быть использована в качестве пленкообразующего вещества, так как при таких условиях сдвига не удается достигнуть ее оптимального динамического (изотропного) состояния, необходимого, например, при проведении процесса ее пигментирования.

Анализ фотоснимков на рис. 3 позволяет объяснить причины такого реологического поведения эмульсий эпоксидной смолы в зависимости от размеров и морфологии капель дисперсной фазы. Так, на микрофотографии эмульсии с содержанием олигомера 60 % (рис. 3, *a*) наблюдаются округлой формы капли смолы с размером 1–5 мкм, локализованные равномерно по всему объему без видимого их непосредственного контакта. При такой морфологии капель (отсутствие видимой агрегации и контакта) нельзя ожидать заметного структурообразования, что и обуславливает инвариантность системы к различным скоростям сдвига (эмульсия течет как ньютоновская жидкость). С увеличением концентрации дисперсной фазы до 70 % (рис. 3, *b*) фиксируется рост размеров капель до 7–20 мкм, сближение отдельных капель до состояния контакта, что приводит к росту межчастичного взаимодействия и появлению первых признаков структурообразования, приводящего к аномалии вязкости в виде вязко-пластичного течения.

Прочность образующейся структуры возрастает при дальнейшем повышении концентрации ЭД-20 (наблюдается существенный рост условной вязкости практически неразрушенного каркаса) (рис. 2, обр. 3), что обусловлено слиянием отдельных капель с формированием агрегатов неправильной формы. Такие образования, достигающие размеров 10–150 мкм, требуют дополнительных затрат механической энергии для их разрушения.

Ярко выраженная аномалия реологического течения 90 %-ной эмульсии, сопровождающегося нарушением сплошности структуры, обусловлена, как это вытекает из анализа рис. 3, *c*, образованием пространственного структурного каркаса, состоящего из взаимосвязанных в различных направлениях цепочек контактирующих микро- и макрокапель, и значительным ростом их числа в единице объема эмульсии. Однако несмотря на такие изменения система сохраняет относительно высокую седиментационную устойчивость (отсутствие разделения фаз), что, по-видимому, можно объяснить образованием относительно прочной структурной сетки, которая фиксирует в своих узлах макрокапли смолы, препятствуя их коалесценции. Все это свидетельствует о значительной роли структурно-механического барьера в обеспечении устойчивости таких эмульсий.

На рис. 4 приведены кривые распределения масс капель по размерам, а на рис. 5 – кривые распределения капель по размерам и гранулометрический состав эмульсий. Из рис. 4, *a* следует, что невысокая седиментационная устойчивость эмульсий масло/вода с концентрацией 40 % объясняется наличием полимодального распределения масс капель, имеющих размеры от 5 до 200 мкм. В результате крупные капли служат центрами быстрого образования коагулима. С дальнейшим увеличением содержания ЭД-20 полидисперсность эмульсии заметно снижается. Так, при концентрации 60 % (рис. 4, *b*) преобладают уже капли размером 1–5 мкм. Для 90 %-ных эмульсий наблюдается уже заметное преобладание более крупных фракций ДФ размером 50–150 мкм. Следовательно, данные фотосендитометрического анализа находятся в удовлетворительном соответствии с результатами, полученными с применением вискозиметрии и оптической микроскопии.

Заключение. Таким образом, использование методов вискозиметрии, фотосендитометрии и оптической микроскопии с большим увеличением позволило определить границы кинетически устойчивого существования концентрированных и высококонцентрированных эмульсий эпоксидного олигомера в зависимости от его концентрации, размеров и локализации капель дисперсной фазы.

Установлено, что нижняя граница существования относительно устойчивых концентрированных эпоксидных эмульсий «масло в воде» определяется содержанием дисперсной фазы (ДФ) 50 %. При уменьшении концентрации ДФ ниже 40 % получают нестабильные эмульсии «вода в масле». Оптимальными по устойчивости и реологическим свойствам являются высококонцен-

трированные дисперсные системы с содержанием олигомера в диапазоне 60–70 масс. %. Верхней границей относительно устойчивых высококонцентрированных эмульсий данного типа является их концентрация 90 масс. %. Однако такие эмульсии даже при небольших сдвиговых нагрузках претерпевают нарушение сплошности структуры, не достигая при стационарном деформировании в ламинарном режиме изотропного состояния. По этим причинам они не в состоянии выполнять функции качественных пленкообразующих систем, несмотря на их удовлетворительную кинетическую устойчивость.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X14-012).

Acknowledgement. The work has been financially supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project no. X14-012).

Список использованных источников

1. Бабак, В. Г. Высококонцентрированные эмульсии. Физико-химические принципы получения и устойчивость / В. Г. Бабак // Успехи химии. – 2008. – Т. 77, № 8. – С. 729–755.
2. Малкин, А. Я. Высококонцентрированные эмульсии. Особенности реологических свойств и течения. Роль концентрации и размера капель / А. Я. Малкин // Коллоид. журн. – 2007. – Т. 69, № 2. – С. 206–219.
3. Неньютоновское поведение концентрированных эмульсий, стабилизированных глобулярным белком в присутствии неионного ПАВ / С. Р. Деркач [и др.] // Коллоид. журн. – 2006. – Т. 68, № 6. – С. 769–776.
4. Кошевар, В. Д. Свойства и применение водных дисперсий эпоксидного олигомера, полученных в присутствии эмульгаторов различного типа / В. Д. Кошевар // ЖПХ. – 2013. – Т. 86, № 7. – С. 1148–1154.
5. Шинкарева, Е. В. Влияние адсорбции неионных поверхностно-активных веществ на стабилизирующую способность латексов при получении эпоксидных эмульсий / Е. В. Шинкарева, В. Д. Кошевар, О. А. Пликус // ЖПХ. – 2012. – Т. 85, № 8. – С. 1348–1355.
6. Кошевар, В. Д. Процессы эмульгирования промышленного олигомера и отверждения его водной дисперсии с целью получения защитных покрытий / В. Д. Кошевар // Химическая промышленность. – 2014. – Т. 91, № 3. – С. 131–138.
7. Кошевар, В. Д. Стабилизация водной дисперсии эпоксидного олигомера микрочастицами органической природы / В. Д. Кошевар // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 6. – С. 68–73.

References

1. Babak V. G. Highly concentrated emulsions. Physicochemical principles of the preparation and stability. *Russian Chemical Reviews*, 2008, vol. 77, no. 8, pp. 683–708. doi.org/10.1070/rc2008v077n08abeh003794.
2. Masalova I., Malkin A. Ya. Peculiarities of rheological properties and flow of highly concentrated emulsions: the role of concentration and droplet size. *Colloid Journal*, 2007, vol. 69, no. 2, pp. 185–197. doi.org/10.1134/s1061933x0702007x.
3. Derkach S. R., Levachev S. M., Kukushkina A. N., Novoselova N. V., Kharlov A. E., Matveenko V. N. Non-Newtonian behavior of concentrated emulsions stabilized with globular protein in the presence of nonionic surfactant. *Colloid Journal*, 2006, vol. 68, no. 6, pp. 700–706. doi.org/10.1134/s1061933x06060056.
4. Koshevar V. D. Properties and use of aqueous dispersions of an epoxy oligomer, prepared in the presence of various emulsifiers. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2013, vol. 86, no. 7, pp. 1081–1087. doi.org/10.1134/s1070427213070227.
5. Shinkareva E. V., Koshevar V. D., Plikus O. A. Effect of adsorption of nonionic surfactants on the stabilizing ability of latexes in preparation of epoxy emulsions. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2012, vol. 85, no. 8, pp. 1282–1288. doi.org/10.1134/s1070427212080241.
6. Koshevar V. D. Processes of emulsification of industrial oligomer and solidification of its aqueous dispersion for the purpose of obtaining protective coatings. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Industry & Chemistry], 2014, vol. 91, no. 3, pp. 131–138 (in Russian).
7. Koshevar V. D. Stabilization of water dispersion of an epoxy oligomer by microparticles of the organic nature. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2014, vol. 58, no. 6, pp. 68–73 (in Russian).

Информация об авторах

Кошевар Василий Дмитриевич – д-р хим. наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9, корп. 1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: koshevar@igic.bas-net.by.

Information about the authors

Koshevar Vasilii Dmitrievich – D. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Laboratory, Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9, Bld. 1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: koshevar@igic.bas-net.by.

Для цитирования

Кошевар, В. Д. Области существования устойчивых концентрированных эпоксидных эмульсий «масло в воде» / В. Д. Кошевар // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 32–38.

For citation

Koshevar V. D. Areas of existence of oil/water stable concentrated epoxy emulsions. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 32–38 (in Russian).

ISSN 0002–354X (print)

УДК 577.112

Поступило в редакцию 03.02.2017

Received 03.02.2017

Е. В. Панкратова, В. В. Бритиков, член-корреспондент С. А. Усанов*Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСМЕМБРАННОГО БЕЛКА CD79B МЕТОДОМ
МНОГОМЕРНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ЯМР СПЕКТРОСКОПИИ**

В настоящей работе с использованием системы бесклеточной экспрессии получены меченые стабильными изотопами углерода-13 и азота-15 белки CD79A/CD79B. Установлено, что целевые белки обнаруживаются в осадке бесклеточной системы экспрессии, что согласуется с их мембранной природой и наличием трансмембранного домена в их составе. Определены физико-химические параметры образцов CD79A/CD79B с целью получения многомерных корреляционных ЯМР спектров высокого разрешения. Анализ полученных корреляционных спектров свидетельствует, что CD79B при выбранных условиях находится в неупорядоченном состоянии. Расщепление сигнала от NH-группы боковой цепи единственного остатка триптофана указывает на наличие медленных конформационных превращений в этой области полипептидной цепи. Добавление трифторуксусной кислоты к раствору CD79B в диметилсульфоксиде приводит к разрушению межмолекулярных связей «белковой мицеллы» и образованию его мономерной формы, хорошо детектируемой ЯМР спектроскопией.

Ключевые слова: неупорядоченные белки, вспомогательный белковый гетеродимер b-клеточного рецептора CD79A/CD79B, система бесклеточной экспрессии белков, пространственная структура белка, ЯМР спектроскопия белков.

E. V. Pankratova, V. V. Britikov, Corresponding Member S. A. Usanov*Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***STUDY OF THE TRANSMEMBRANE PROTEIN CD79B BY MULTIDIMENSIONAL
PULSE NMR SPECTROSCOPY**

In the present work, using the cell-free expression system, we prepared the proteins CD79A/CD79B labeled by stable isotopes of carbon-13 and nitrogen-15. It is shown that target proteins are mostly localized in the pellet of the cell-free expression system, which is consistent with their membrane nature and the presence of a transmembrane domain in their structure. Physicochemical parameters of the CD79A/CD79B samples were defined to obtain the multidimensional correlation NMR spectra of high resolution. The analysis of the obtained correlation spectra shows that under experimental conditions, CD79B exists in the disordered state. The splitting of the signal from the NH-group of single tryptophan residue indicates the presence of slow conformational transitions in this region of the polypeptide chain. The addition of the trifluoroacetic acid to the solution of CD79B in DMSO leads to the destruction of the intermolecular bonds of “protein micelles” and the formation of its monomeric form that is well detectable by NMR.

Keywords: the disordered proteins, auxiliary heterodimeric protein of the B-cell receptor CD79A/CD79B, the cell-free protein expression system, the spatial structure of a protein, protein NMR spectroscopy.

Введение. Начиная с 2000-х годов было обнаружено, что некоторые белки выполняют свои функции в неупорядоченном состоянии. Это показано на примере существования истинно неупорядоченных белков (ИНБ) или неупорядоченных участков полипептидной цепи. Такие белки широко представлены в природе и сильно отличаются от структурированных на различных уровнях организации, а также имеют хорошо узнаваемые композиции аминокислотных последовательностей. Характерным свойством этих белков является их исключительная структурная гетерогенность, где различные участки полипептидной цепи могут быть структурированы (или не структурированы) в разной степени, в результате чего они обладают способностью к множественным потенциальным способам укладки. Распределение конформеров постоянно изменяется во времени, а также в ответ на изменения условий окружающей среды [1]. Мозаичная структура организации таких белков имеет решающее значение для их функционирования, они вовлечены в биологические процессы, которые полагаются на конформационную гибкость, недоступную

для структурированных белков. Подсчитано, что ИНБ составляют около 30 % от общего числа белков человека и выполняют важные регуляторные функции в ключевых клеточных процессах [2–4].

Было отмечено, что низкое содержание гидрофобных аминокислотных остатков и пролина, изменяющего пространственное направление полипептидной цепи, в комбинации с высоким содержанием заряженных аминокислот представляет собой характерную особенность большинства ИНБ [5; 6]. Тот факт, что последовательности структурированных и неупорядоченных белков значительно отличаются, делает возможным выделить ИНБ в отдельный класс внутри «царства белковых» молекул и предсказать с использованием различных вычислительных средств с большой вероятностью их принадлежность [7; 8]. Из-за свойств полипептидной последовательности очищенные ИНБ обычно хорошо растворимы и спонтанно не агрегируют, в отличие от их тенденции формировать патологические фибриллы в клетке [9]. Большое количество белков являются гибридами между структурированными и неструктурированными доменами, такая организация имеет решающее значение для их функционирования [10].

CD79A и CD79B являются передающими сигнал трансмембранными белками В-клеточного рецептора. Эти два белка нековалентно связываются с тяжелыми цепями иммуноглобулина М (IgM) через их трансмембранные участки и формируют гетеродимерный комплекс. Ассоциация CD79A/В гетеродимера с тяжелыми цепями иммуноглобулина требуется для поверхностной экспрессии В-клеточного рецептора. CD79A и CD79B имеют экстраклеточный иммуноглобулиновый домен, трансмембранный и короткий, истинно неструктурированный, цитоплазматический домен (ИНБ домен). Цитоплазматический домен CD79A состоит из 61 аминокислоты, CD79B – из 48. Цитоплазматические домены этих белков имеют множественные сайты фосфорилирования, а также консервативную последовательность сигнального мотива (ITAM). В условиях *in vivo* тирозины ITAM мотива CD79A синергируют с ITAM мотивами CD79B в процессе опосредованного перехода от про- к пре-В-клеткам, что было предположено на основе анализа мышей с направленными мутациями ITAM мотива CD79A и CD79B [11; 12].

До момента открытия гетеродимера CD79A/CD79B, иммунологи терялись в догадках, как IgM передает сигнал внутрь клетки, не имея достаточно протяженного цитоплазматического «хвоста». Открытие CD79A/CD79B гетеродимера и его ключевой роли в передаче сигнала внутрь клетки Майклом Ретом в начале 1990-х значительно расширило понимание механизмов активации В-лимфоцита [13]. Молекулярная архитектура IgM и CD79A/CD79B является критической проблемой в понимании, каким образом В-клеточный рецептор проводит сигнал в клетку. Для В-клеточного рецептора только CD79A имеет заряженные аминокислоты в его трансмембранном домене, а IgM и CD79B содержат только две полярные аминокислоты в ТД [14]. Наличие заряженного глутаминового остатка в ТД CD79A позволяет предположить, что взаимодействие между IgM и CD79A/CD79B гетеродимером в основном осуществляется через CD79A. Мутационные исследования подтвердили решающую роль полярных аминокислот в трансмембранном участке IgM и выявили, что мутация YS-VV в μ -цепи препятствует ассоциации с CD79A/CD79B гетеродимером.

Структура экстраклеточного домена CD79B определена методом рентгеноструктурного анализа. Его точная роль в сборке В-клеточного рецептора и передаче сигнала до сих пор остается не выясненной [15]. В свою очередь структуру остальной части белка, в состав которой входят цитоплазматический и трансмембранный домены при помощи рентгеноструктурного анализа установить не удастся из-за невозможности получения кристаллического состояния. Считается, что взаимодействие трансмембранных участков CD79A с CD79B играет важную роль в дальнейшей передаче сигнала через их цитоплазматические домены. Поэтому установление структуры и конформационных превращений для этих областей позволит понять полный молекулярный механизм передачи сигнала В-клеточным рецептором. Установление структуры в данном случае возможно только при помощи методов ЯМР спектроскопии.

ЯМР спектроскопия является первичной экспериментальной техникой для характеристики структурных ансамблей и переходных взаимодействий между истинно неупорядоченными белками и их партнерами в растворе. Однако традиционный биомолекулярный ЯМР инструмента-

рий, который был разработан в последние три десятилетия для исследования структурированных глобулярных белков, требует адаптации для истинно неупорядоченных белков.

Стабильная локальная трехмерная структура или частично населенная вторичная структура создают уникальное локальное электронное окружение и поэтому вносят свой вклад в химический сдвиг, меняя изотропное экранирование для каждого ядерного спина. Отсутствие стабильной структуры в ИНБ приводит к усреднению большей части вкладов от локального химического окружения в химические сдвиги и это является причиной низкой дисперсии сигналов в ЯМР спектрах.

Конформационная динамика и переходные структуры ИНБ высоко чувствительны к экспериментальным условиям, таким как pH, состав буферной среды, концентрация солей и температура. При определенных условиях некоторые участки ИНБ могут испытывать конформационную динамику во временном масштабе, что ведет к интенсивному уширению спектральных линий и исчезновению корреляционных пиков. Оптимизация условий измерений образца, таким образом, является более важным фактором, чем для глобулярных белков. Дальнейшие проблемы появляются из-за высокого содержания пролиновых остатков в аминокислотной последовательности ИНБ. Так как пролины не имеют амидных протонов, они не детектируются при помощи протонных ЯМР спектров.

Цель работы – получение меченных стабильными изотопами белков CD79A и CD79B и определение условий для получения высококачественных многомерных корреляционных ЯМР спектров с целью дальнейшего их использования для определения пространственной структуры мембран-связанного состояния белков.

Материалы и методы исследования. *Внеклеточная экспрессия белков CD79A и CD79B.* Плазмидный вектор экспрессии с T7 промотором, кодирующий белки CD79A и CD79B, нарабатывали в клетках *E. coli* штамма BL21(DE3). Плазмидная ДНК выделялась с использованием реактивов из коммерческого набора PlasmidPlusMidiKit фирмы QIAGEN (Германия).

Концентрацию плазмидной ДНК определяли спектрофотометрически с использованием спектрофотометра NanoDrop 2000 фирмы ThermoScientific (США). **Коррекцию базовой линии** выполняли по поглощению при 340 нм. Концентрацию рассчитывали по оптическому поглощению на длине волны 260 нм с использованием коэффициента молярной экстинкции $0,020 \text{ (мкг/мл)}^{-1}\text{см}^{-1}$.

S12 экстракт для бесклеточной системы экспрессии получали по методике [16] с изменениями. Первоначально растили прекультуру бактерий *E. coli* штамма BL21(DE3) **Rosetta при температуре 37 °C (200 об/мин)** в 2хYTPG среде в присутствии 30 мкг/мл каномидина. Ферментер инокулировали полученной культурой в соотношении 1 : 100. В ферментере клетки растили при 37 °C (800 об/мин) при поддержании постоянного pH 7,0 путем добавления 2M NaOH с постоянной аэрацией со скоростью 8 л/мин. Оптическая плотность среды контролировалась по поглощению при 600 нм (OD_{600}) каждые 3 ч. При достижении OD_{600} 3,5 единиц, температура опускалась до 10 °C и сбор клеток проводился путем пропускания культурального раствора через нержавеющую металлическую катушку, предварительно охлажденную водой со льдом (для поддержания температуры 10–15 °C). Клеточную суспензию центрифугировали 15 мин при 4000g, затем ресуспендировали в 3 л экстракционного буфера. Полученный раствор клеток замораживали в жидком азоте и хранили при –80 °C до момента получения S12 экстракта.

Для получения S12 экстракта размораживали подготовленные клетки, добавляли DTT до концентрации 1 mM и раствор ингибитора протеаз (Complete EDTA-free, SigmaAldrich). Клетки разрушали с использованием френч-пресса под давлением в 24000 psi. **Полученный лизат** центрифугировали 10 мин при 12000g (4 °C). Супернатант инкубировали 120 мин при температуре 30 °C. Диализ экстракта проводили против диализного буфера в соотношении 1 : 40 с использованием мембран 6–8 кДа в течение 4 ч. Раствор полученного экстракта быстро замораживали в жидком азоте, используя криопробирки, и хранили их при температуре –80 °C.

Экспрессия выполнялась по методике из работы [16] с изменениями. Реакционная среда для внеклеточной экспрессии состояла из S12 экстракта, смеси низкомолекулярных соединений, смеси 20 аминокислот (стандартные и меченные по углероду-13 и азоту-15), ацетата магния, T7-РНК-полимеразы, креатин киназы и деионизированной воды. К полученной реакционной

смеси добавляли плазмидную ДНК экспрессионного вектора. Конечную реакционную смесь помещали в термостатируемый шейкер и инкубировали 3 ч при температуре 30 °С (800 об/мин). По окончании реакции, смесь центрифугировали 10 мин при 20000g (4 °С) для осаждения липидной фракции. Осадок и супернатант хранили отдельно при температуре –20 °С, предварительно отобрав аликвоты для последующего анализа наличия целевого белка. В качестве отрицательного контроля реакции использовали реакционную смесь, не содержащую плазмидной ДНК.

Детекция продуктов реакции внеклеточной экспрессии. Для определения наличия целевых белков использовали электрофоретическое разделение в полиакриламидном геле в присутствии додецилсульфата натрия, а также Вестерн-блоттинг. Использовались электрофорезная камера Mini-PROTEAN TetraCell и Mini-PROTEAN сборные гели (7,2 × 8,6 см) фирмы BioRad (США), предназначенные для выполнения электрофореза в полиакриламидном геле (PAGE). Электрофоретическое разделение проводили при постоянном напряжении 100 В в течение 40 мин. Белковые полосы проявляли методом коллоидного окрашивания с использованием реагента SimplyBlue ThermoScientific (США).

Вестерн-блоттинг проводился с использованием набора реагентов ONE-HOUR Western фирмы QIAGEN (Германия). Для переноса белка с полиакриламидного геля использовали нитроцеллюлозную бумагу. Перенесенные белковые полосы детектировали по хемилюминесценции. Использовали реагенты LumiSensor фирмы GenScript (США). Хемилюминесцентный HRP субстрат смешивали с 1,5 мл реагента А и 1,5 мл реагента В, перемешивали в течение нескольких секунд. 0,05 мл рабочего раствора достаточно для покрытия 1 см² мембраны.

Масс-спектрометрический анализ меченых белков CD79A и CD79B. Анализ молекулярной массы меченого образца проводили с помощью МАЛДИ масс-спектрометрии на приборе MicroFlex (Bruker, Германия). Осадок бесклеточной системы экспрессии после завершения реакции растворяли 20 мин в диметилсульфоксиде (ДМСО) при температуре 65 °С и тщательном перемешивании. К полученному образцу добавляли этиловый спирт в соотношении 1 : 10. Прecipитированные под воздействием спирта белки из образца осаждали центрифугированием. Полученный осадок растворяли в 80 %-ной муравьиной кислоте. Далее смешивали 1 мкл образца с 1 мкл насыщенного раствора синапиновой кислоты и наносили на металлическую подложку. Сокристаллизацию проводили до полного высыхания капли. Масс-спектр измеряли с использованием линейного детектора в режиме положительно заряженных ионов.

Подготовка образцов раствора белка для ЯМР спектроскопии. После центрифугирования реакционной смеси бесклеточной системы экспрессии отбирали осадок, содержащий меченный стабильными изотопами искомым белок. Осадок растворяли при температуре 50 °С 2–4 ч при тщательном перемешивании в ДМСО требуемого объема в зависимости от массы осадка. Остаток не растворившегося осадка осаждали центрифугированием. К супернатанту добавляли воду и трифторуксусную кислоту различных концентраций. Полученные образцы растворов переносили в ЯМР-ампулу Шигеми типа диаметром в 5 мм.

Эксперименты по ЯМР спектроскопии. Измерения ЯМР спектров проводили 12 ч с использованием ЯМР спектрометра фирмы Varian с рабочей частотой 600 МГц, оснащенного четырехканальным криодатчиком (температура 19 К) тройного резонанса (¹H/¹³C/¹⁵N). Программирование используемых импульсных последовательностей, сбор и анализ полученных данных проводили, используя программное обеспечение VnmrJ 3.2.

Сигнал стабилизации поля (сигнал лока) захватывали по сигналу дейтерия от ДМСО. Калибровку длительности 90-градусного импульса для ¹H/¹³C/¹⁵N ядер проводили по изменению сигнала воды. Для измерения двумерного корреляционного спектра N15-HSQC использовали импульсную программу gNhsqc, входящую в VnmrJ 3.2. Количество комплексных точек для H1 и N15 измерения составило 2048 и 188 соответственно. Для экспериментов по тройному резонансу использовали импульсную последовательность HNCO спектра.

Полученный двумерный массив данных в виде набора временного затухания сигнала (спад свободной индукции) преобразовывался в двумерный частотный спектр при помощи программы NMRpipe [17] с использованием преобразования Фурье, аподизации и фазовой коррекции спектра. Визуализацию и сохранение спрессированных спектров осуществляли в программе NMRDraw, которая поставляется вместе с NMRpipe.

Результаты и их обсуждение. Синтез CD79A и CD79B с использованием бесклеточной системы экспрессии. Оптимизацию внеклеточной экспрессии CD79A и CD79B осуществляли с использованием стандартных аминокислот. Чистота полученной плазмидной ДНК для экспрессии целевых белков была оценена спектрофотометрически по поглощению на длине волны 260 нм. Отношение поглощения при 260/280 нм составляет 1,91 и 1,92, для отношения 260/230 нм – 2,32 и 2,31 для pCD79a и pCD79b соответственно. Данные значения соответствуют высокой степени очистки плазмидной ДНК и свидетельствуют об отсутствии загрязнения белками и липидами.

С учетом аминокислотной последовательности исследуемых белков можно предположить, что они будут преимущественно концентрироваться в осадочной фракции среды бесклеточной системы экспрессии. Данное предположение было нами подтверждено в результате анализа полученных образцов методом вестерн-блоттинга (рис. 1).

По экспериментальным данным, в отличие от CD79A, CD79B преимущественно концентрируется в осадочной фракции. Это можно связать с большей гидрофобностью CD79B. Нами была определена теоретическая гидрофобность аминокислотной последовательности по индексу гидрофобности с использованием онлайн-программы GPMW lite [18].

Для CD79B и CD79A рассчитанные индексы гидрофобности составили $-0,26$ и $-0,50$ соответственно. Для сравнения, индексы гидрофобности, рассчитанные для мембранного белка аквапорина и водорастворимого бычьего сывороточного альбумина, составляют $0,49$ и $-0,43$ соответственно.

Для получения меченных стабильными изотопами белков CD79A и CD79B заменяли стандартные аминокислоты в инкубационной среде на их полностью меченные по атомам углерода-13 и азота-15 аналоги. В данной работе использовали полное мечение по всем 20 аминокислотам (неселективное мечение) в целях получения спектральных сигналов от всех остатков полипептидной цепи исследуемых белков. Концентрации аминокислот были подобраны с учетом их встречаемости в синтезируемых последовательностях и эффективности их встраивания в синтезируемую полипептидную цепь [19]. Образование меченных белков также определили при помощи вестерн-блоттинга (рис. 2). Количество синтезированного CD79B в осадочной фракции, определенное по вестерн-блоттингу, превышает количество CD79A. Такую разницу в концентрациях можно объяснить разницей аминокислотного состава двух исследуемых белков. Концентрационное соотношение для меченных аминокислот отличалось от соотношения для стандартных, поэтому скорость синтеза для CD79A меньше, чем для CD79B. Дальнейшие эксперименты на данном этапе проводили только с CD79B, так как его количество значительно превышало количество CD79A.

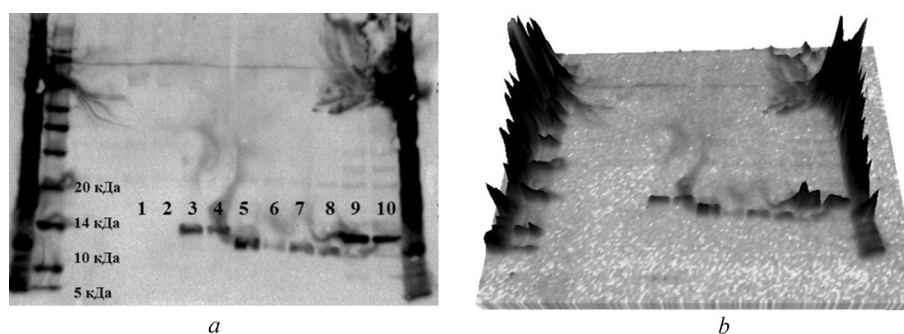


Рис. 1. *a* – Вестерн-блоттинг образцов, содержащих белки CD79A и CD79B, полученные методом внеклеточной белковой экспрессии с использованием стандартных немеченных аминокислот. Вторая дорожка слева соответствует стандартным белкам с известной массой (стандарты молекулярной массы). 1, 2 – отрицательный контроль; 3, 4, 9, 10 – CD79A; 5–8 – CD79B. Нечетные номера соответствуют образцам осадочной фракции, а четные – образцам надосадочной фракции (супернатант); *b* – трехмерное представление полученного вестерн-блоттинга для полуколичественного анализа

Fig. 1. *a* – Western-blotting of the samples containing the proteins CD79A and CD79B obtained by the cell-free protein expression system with the use of standard non-labeled amino acids. The track on the left corresponds to the standard proteins of known mass (standard molecular mass). 1, 2 – negative test; 3, 4, 9, 10 – CD79A; 5–8 – CD79B. Odd numbers denote the samples of sedimentary fraction, even numbers – samples of supernatant fraction (supernatant); *b* – three-dimensional representation of the obtained western-blotting for the semi-quantitative analysis

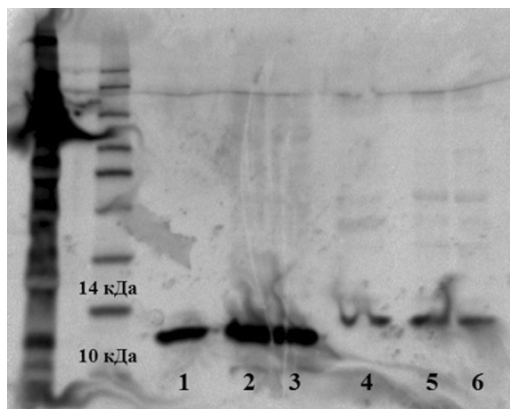


Рис. 2. Вестерн-блоттинг образцов, содержащих меченные по углероду-13 и азоту-15 белки CD79A и CD79B, полученные методом внеклеточной белковой экспрессии. Вторая дорожка слева соответствует стандартным белкам с известной массой (стандарты молекулярной массы). 1–3 – меченный CD79B; 4–6 – CD79A

Fig. 2. Western-blotting of the samples containing the proteins CD79A and CD79B labeled by carbon-13 and nitrogen-15 obtained by the cell-free protein expression system. The second track on the left corresponds to the standard proteins of known mass (standard molecular mass). 1–3 – labeled CD79B; 4–6 – CD79A

групп полипептидной цепи CD79B, поэтому мы предположили, что белок находится в частично растворенной форме, формирует межмолекулярные комплексы, вероятно через связывание между трансмембранными участками полипептидной цепи. Из-за этого на спектре появляются только пики, относящиеся к цитозольной неупорядоченной части, которая имеет большую степень подвижности. Подвижность цитозольной части позволяет ядерным спином, входящим в ее состав, медленно релаксировать и проявляться в спектре в виде узких сигналов. Сигналы трансмембранной части в свою очередь сильно уширяются из-за быстрой спин-спиновой релаксации и не обнаруживаются в спектре.

После добавления воды к образцу до концентрации 5 % не происходит видимых спектральных изменений (рис. 5) по сравнению с образцом без воды. На полученном спектре имеется арте-

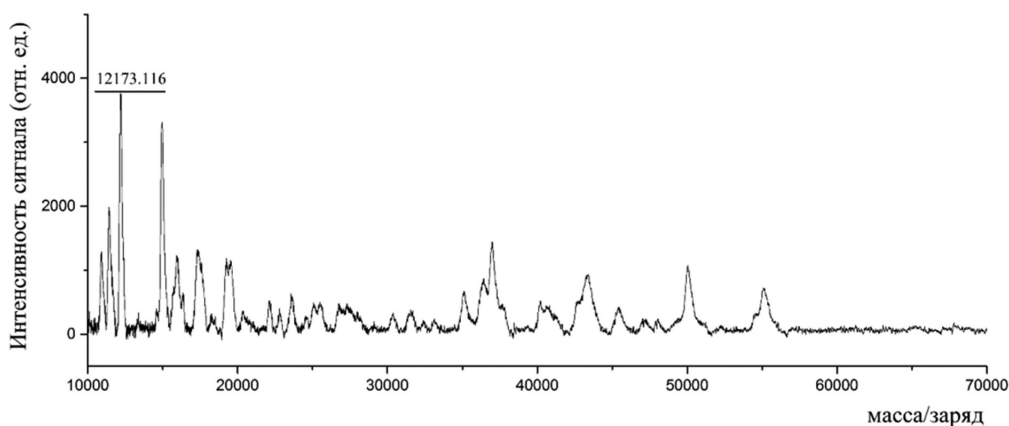


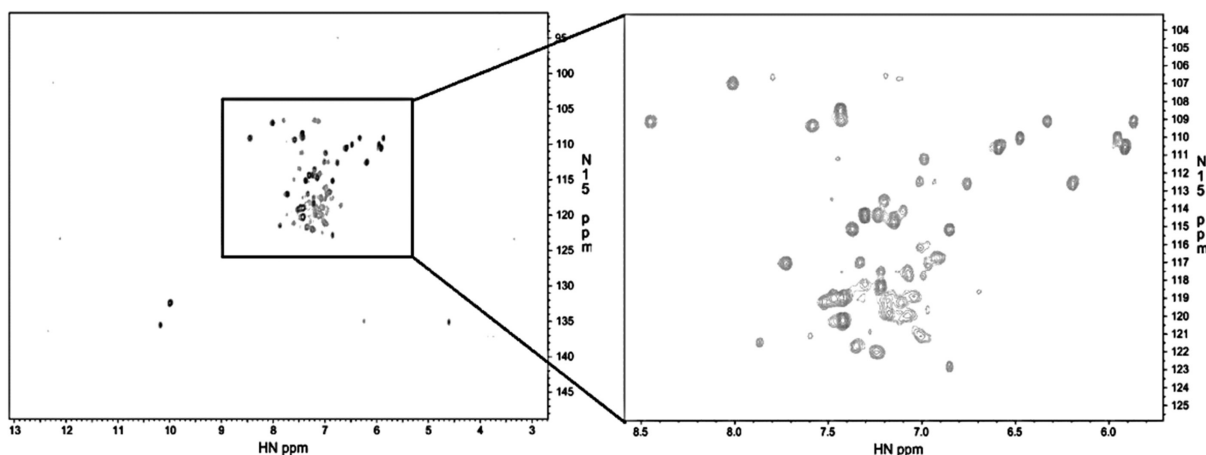
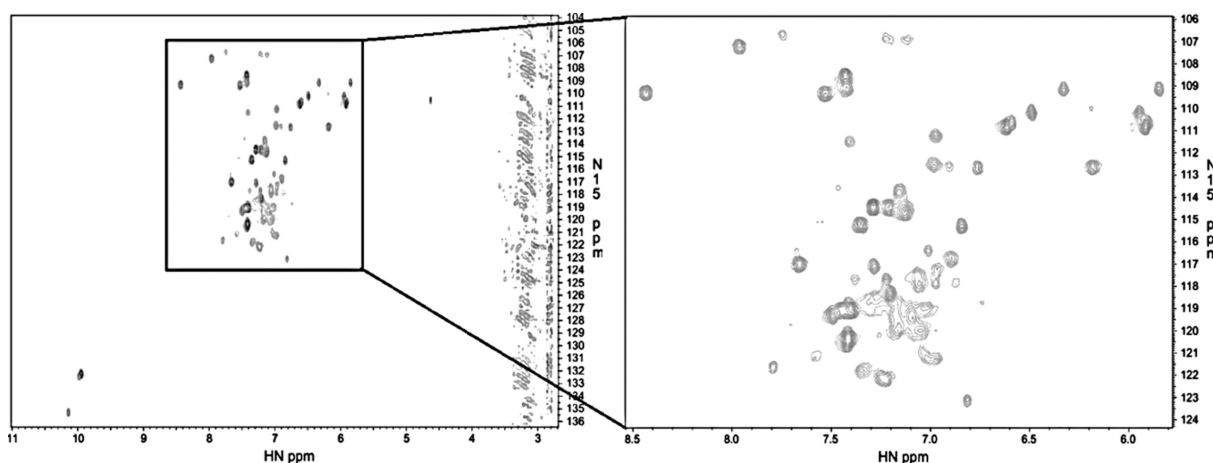
Рис. 3. MALDI масс-спектр образца осадка после внеклеточной экспрессии CD79B. Отмеченный сигнал на спектре соответствует однозарядному положительному иону CD79B, полностью меченному по углероду-13 и азоту-15

Fig. 3. MALDI mass-spectrum of the residue after the cell-free expression of CD79B. The marked signal on the spectrum denotes a single-charged positive ion of CD79B fully labeled by carbon-13 and nitrogen-15

Для подтверждения молекулярной массы CD79B, меченного стабильными изотопами, полученные образцы анализировали с использованием MALDI масс-спектрометрии (рис. 3). Теоретически ожидаемая молекулярная масса для данного белка в полностью меченном углеродом-13 и азотом-15 состоянии составляет 12173,190 Да. Результаты сравнения теоретической массы с массой, определенной экспериментально (12173,116 Да) с учетом погрешности измерения ($\pm 0,5$ Да), указывают на соответствие полученного нами белка полностью меченному CD79B по углероду-13 и азоту-15.

Получение и анализ ЯМР спектров CD79B. Первый двумерный ^{15}N -HSQC корреляционный ЯМР спектр был получен при растворении осадка, содержащего CD79B в DMSO-d_6 и инкубации в течение 2 ч при температуре 65 °C при постоянном перемешивании (рис. 4). Температура в 65 °C не должна оказывать разрушающего воздействия на CD79B, так как этот белок является термостабильным из-за своей неупорядоченной природы [20]. Данный спектр позволяет получить информацию о протонах, непосредственно связанных с атомами азота амидных групп полипептидной цепи, по корреляции их химических сдвигов.

^{15}N -HSQC спектр (рис. 4) беден сигналами от NH-

Рис. 4. ^{15}N -HSQC корреляционный ЯМР спектр CD79B в ДМСО-d6Fig. 4. ^{15}N -HSQC correlation NMR spectrum of CD79B in DMSO-d6Рис. 5. ^{15}N -HSQC корреляционный ЯМР спектр CD79B в ДМСО-d6 при добавлении 5 % H_2O Fig. 5. ^{15}N -HSQC correlation NMR spectrum of CD79B in DMSO-d6 added with 5 % H_2O

фактный шум от подавленного сигнала воды в правой его части. На основании данного спектра можно заключить, что возможное протонирование CD79B не приводит к распаду комплекса (мицеллы, состоящей из множества CD79B) и изменению его конформации. Каждый раз перед и по окончании накопления длительного HSQC спектра записывали контрольные «короткие» спектры (длительность 40 мин). Данные спектры измерялись для подтверждения стабильности белка в растворе за все время эксперимента (общее время накопления трех спектров приблизительно 14 ч).

Существенного изменения ^{15}N -HSQC спектра в сторону его улучшения удалось достичь при добавлении в образец трифторуксусной кислоты (ТФК) до концентрации 0,3 % (рис. 6). В данном случае положение большинства сигналов и их химических сдвигов изменилось, количество сигналов возросло приблизительно в 2 раза, увеличилась их интенсивность. Расположение сигналов в данном спектре указывает на состояние белка, близкое к денатурированному, что равносильно разупорядоченности полипептидной цепи и ее распрямлению, где химическое окружение для NH-групп теперь варьирует в меньшей степени. Наблюдаемая плохая дисперсия сигналов (кросс-пиков) указывает на принадлежность данного белка к истинно неупорядоченным. Появление новых сигналов и рост интенсивностей указывает на переход белка в мономерное состояние. Предполагается, что ТФК, в силу своего химического строения, связывается с гидрофобными аминокислотами трансмембранных доменов и препятствует их взаимодействию из-за электростатического отталкивания.

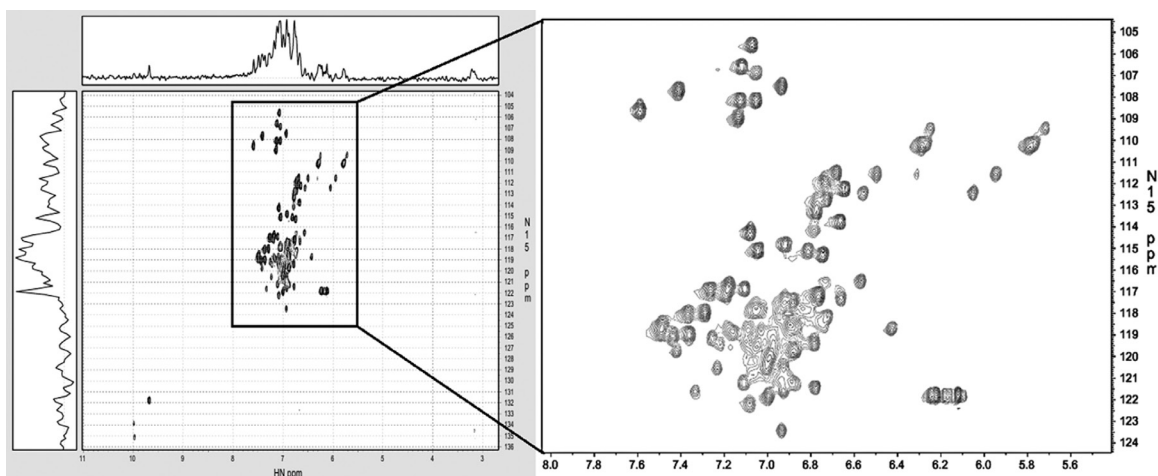


Рис. 6. ^{15}N -HSQC корреляционный ЯМР спектр CD79B в ДМСО-d6 при добавлении 5 % H_2O и 0,3 % ТФК
 Fig. 6. ^{15}N -HSQC correlation NRM spectrum of CD79B in DMSO-d6 added with 5 % H_2O and 0.3 % trifluoroacetic acid

Анализ полученного спектра (рис. 7) выявил наличие разных состояний единственного остатка триптофана, сигналы NH-группы (один мажорный и два минорных пика) которого располагаются в нижней левой части спектра, так как протон амидной группы его боковой цепи сильно дезэкранирован воздействием кольцевого тока ароматической электронной системы. Расщепление сигнала от NH-группы боковой цепи единственного триптофана указывает на наличие медленных конформационных превращений в этой области полипептидной цепи для минорной фракции белка из общего пула. Данный триптофан располагается вблизи С-концевой части аминокислотной последовательности. При интегрировании сигналов в программе CARA [21] (рис. 7) было установлено, что доля мажорного пика составляет 0,64, а двух минорных в сумме 0,36. Данные сигналы отражают два возможных конформационных состояния минорной доли CD79B. Соотношение двух минорных пиков составляет 0,45 и 0,55.

Также нами был получен трехмерный HNCO спектр (рис. 8) по корреляции химических сдвигов между протонами амидной группы, атомом азота-15 и углеродом-13 карбонильной группы. При подсчете числа пиков в данном спектре установлено, что количество пиков меньше общего числа аминокислот в полипептидной последовательности. Из 100 аминокислот, которые теоретически могут давать сигналы от CO-групп, за исключением пролиновых аминокислотных остатков, было выявлено 60 сигналов. Вероятно, такое поведение связано с определенной локальной структурой в области взаимодействия ТФК с боковыми группами некоторых аминокислот. Из-за кето-енольной таутомеризации пептидной группы и делокализации протона NH-группы на боковую цепь аминокислот происходит исчезновение возможных сигналов (это равносильно быстрому обмену протона с окружением и значительному уширению его резонансной линии).

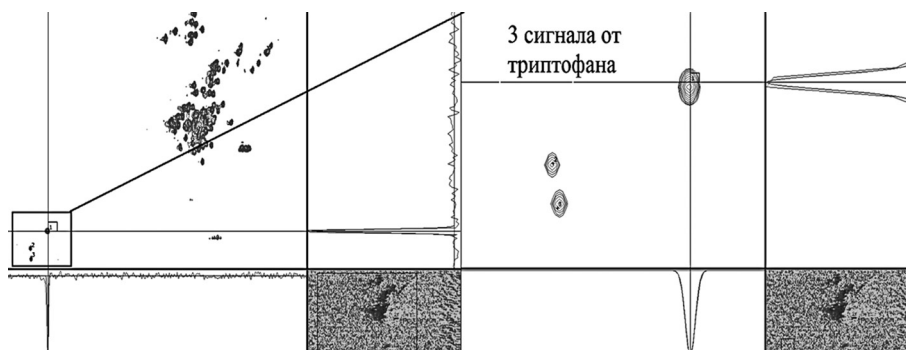


Рис. 7. Визуализация участка ^{15}N -HSQC спектра CD79B, содержащего сигналы от триптофанового аминокислотного остатка, в программе CARA для определения интегральной интенсивности пиков

Fig. 7. Visualization of the section of ^{15}N -HSQC spectrum of CD79B containing the signal of tryptophan amino acid residue, in the CARA program for definition of the integral intensity of peaks

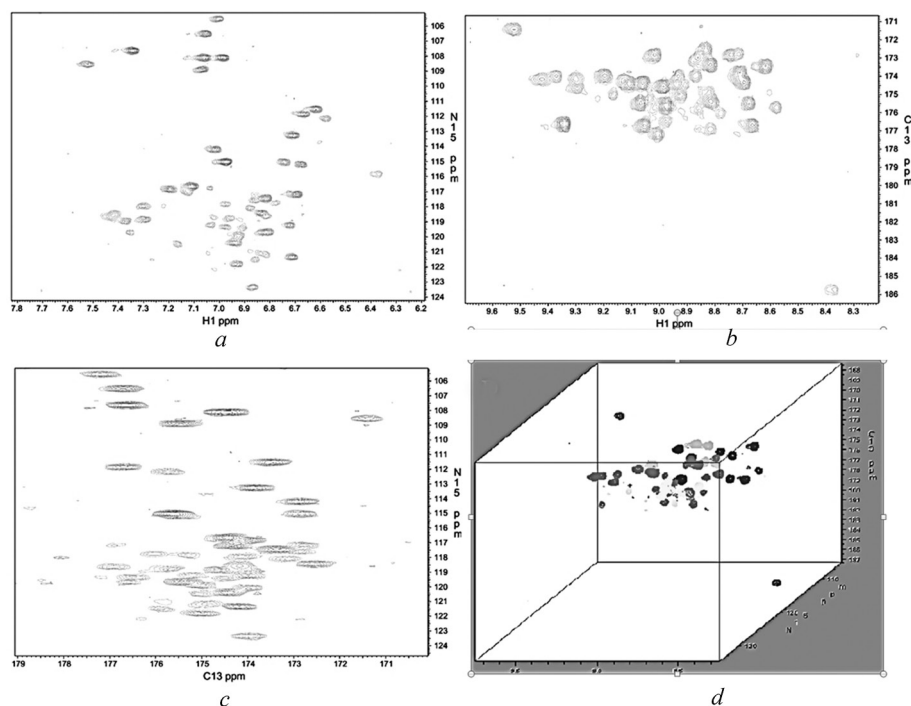


Рис. 8. Трехмерный HNCO корреляционный ЯМР спектр CD79B в ДМСО-d6 при добавлении 5 % H₂O и 0,3 % ТФК: *a* – двухмерная проекция – ¹H/¹⁵N, *b* – ¹H/¹³C, *c* – ¹³C/¹⁵N, *d* – трехмерное представление

Fig. 8. Three-dimensional HNCO correlation NMR spectrum of CD79B in DMSO-d₆ with 5 % H₂O and 0.3 % trifluoroacetic acid: *a* – two-dimensional projection – ¹H/¹⁵N, *b* – ¹H/¹³C, *c* – ¹³C/¹⁵N, *d* – three-dimensional representation

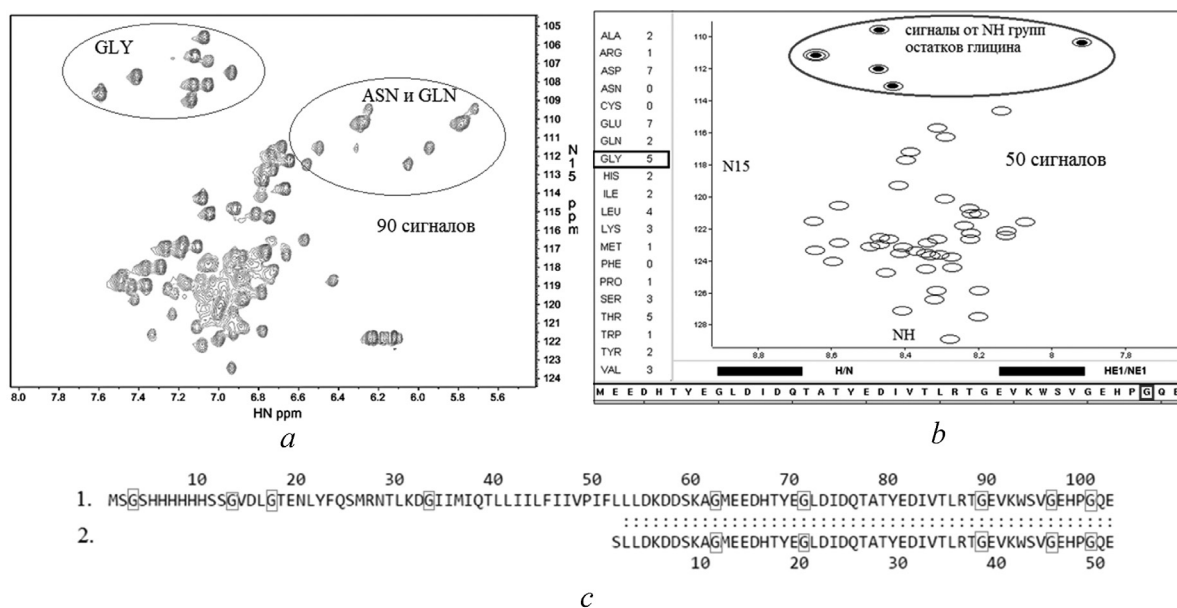


Рис. 9. Сравнение сигналов полученного ¹⁵N-HSQC спектра CD79B (*a*) с данными ¹⁵N-HSQC спектра цитозольного домена CD79B (*b*) из работы [22]. Спектр на рис. *b* смоделирован на основе значений химических сдвигов из базы данных ЯМР спектров белков и нуклеиновых кислот (<http://www.bmrb.wisc.edu>), *c* – выравнивание аминокислотных последовательностей: *1* – полученного в данной работе CD79B, состоящего из части экстраклеточного, трансмембранного и цитозольного доменов; *2* – цитозольного домена CD79B из работы [22]. Оранжевым цветом в последовательностях выделены глициновые аминокислотные остатки

Fig. 9. Comparison of the signals of the obtained ¹⁵N-HSQC spectrum of CD79B (*a*) with the data of the ¹⁵N-HSQC spectrum of the cytosol domain of CD79B (*b*) [22]. The spectrum in Fig. 9*b* is modeled using the chemical shift values from the database of the NMR spectra of proteins and nucleic acids (<http://www.bmrb.wisc.edu>), *c* – sequence alignment: *1* – present work, CD79B consisting of some part of extracell, transmembrane and cytosol domains; *2* – cytosol domain of CD79B [22]. Orange color shows the glycine amino acid pellets in the sequences

Для дополнительного анализа полученный спектр ^{15}N -HSQC для CD79B сравнивали со спектральными данными для цитозольного домена CD79B из работы [22], состоящего из 51 аминокислотного остатка (рис. 9). Полученный нами спектр содержит девять сигналов от NH-групп глициновых (Gly) аминокислотных остатков, которые распределены по всей цепи, в свою очередь цитозольный домен имеет только пять остатков глицина (рис. 9, b). Это согласуется с имеющимися аминокислотными последовательностями (рис. 9, c). Таким образом, можно сказать, что нами получен спектр для CD79B, в состав которого входит часть экстраклеточного, трансмембранный и цитозольный домен, в отличие от результатов работы [22]. Положение сигналов для общих аминокислот сильно различается, химические сдвиги сигналов в спектре смещены в область сильного поля. Это указывает на значительную разницу в структуре CD79B в ДМСО по сравнению с водным окружением.

Заключение. В результате настоящей работы нами получены меченные стабильными изотопами белки CD79A и CD79B с использованием бесклеточной системы экспрессии и подобраны физико-химические условия для получения высококачественных многомерных корреляционных ЯМР спектров (^{15}N -HSQC, HNCО) для CD79B. Добавление трифторуксусной кислоты (TFA) до концентрации 0,3 % к белку, растворенному в ДМСО с добавлением 5 % H_2O , приводит к значительному улучшению ЯМР спектров. Такое спектральное поведение белка, по-видимому, связано с взаимодействием гидрофобной части трифторуксусной кислоты с гидрофобными аминокислотными остатками CD79B, находящимися в его трансмембранном домене. После растворения в ДМСО вероятно белок все еще находится в агрегированном состоянии (в виде мицеллы), где трансмембранные участки связаны между собой, а цитозольные – находятся в свободном подвижном состоянии. Из-за роста времени вращательной корреляции агрегатов (из-за большой молекулярной массы), т. е. увеличения скорости ядерной спин-спиновой релаксации (R_2), происходит существенное уширение ЯМР сигналов, которые невозможно детектировать. Добавление TFA приводит к разрушению межмолекулярных связей в мицелле и образованию мономерной формы CD79B, хорошо детектируемой ЯМР спектроскопией.

Анализ полученных корреляционных спектров для CD79B позволил установить, основываясь на низкой дисперсии сигналов в спектре, что данный белок при выбранных условиях находится в неупорядоченном состоянии. Расщепление сигнала от NH-группы боковой цепи единственного триптофана указывает на наличие медленных конформационных превращений в этой области полипептидной цепи.

Разработанный способ получения корреляционных ЯМР спектров для CD79B в ДМСО может быть использован для последующего исследования его пространственной структуры методом дейтерообмена амидных групп с детекцией ЯМР спектроскопией.

Список использованных источников

1. Amino-acid-type selective isotope labeling of proteins expressed in Baculovirus-infected insect cells useful for NMR studies / A. Strauss [et al.] // *Journal of Biomolecular NMR*. – 2003. – Vol. 26, N 4. – P. 367–372. doi.org/10.1023/a:1024013111478.
2. Uversky, V. N. Natively unfolded proteins: a point where biology waits for physics / V. N. Uversky // *Protein science*. – 2002. – Vol. 11, N 4. – P. 739–756. doi.org/10.1110/ps.4210102.
3. Protein disorder and the evolution of molecular recognition: theory, predictions and observations / A. K. Dunker [et al.] // *Proc. Symp. Biocomput.* – 1998. – Vol. 3. – P. 473–484.
4. Uversky, V. N. Why are “natively unfolded” proteins unstructured under physiologic conditions? / V. N. Uversky, J. R. Gillespie, A. L. Fink // *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*. – 2000. – Vol. 41, N 3. – P. 415–427. doi.org/10.1002/1097-0134(20001115)41:3%3C415::aid-prot130%3E3.3.co;2-z.
5. Predicting disordered regions from amino acid sequence / E. Garner [et al.] // *Genome Informatics*. – 1998. – Vol. 9. – P. 201–213.
6. TOP-IDP-scale: a new amino acid scale measuring propensity for intrinsic disorder / A. Campen [et al.] // *Protein and Peptide letters*. – 2008. – Vol. 15, N 9. – P. 956–963. doi.org/10.2174/092986608785849164.
7. Uversky, V. N. A decade and a half of protein intrinsic disorder: biology still waits for physics / V. N. Uversky // *Protein Science*. – 2013. – Vol. 22, N 6. – P. 693–724. doi.org/10.1002/pro.2261.
8. Predicting intrinsic disorder from amino acid sequence / Z. Obradovic [et al.] // *Proteins: Structure, Function, and Genetics*. – 2003. – Vol. 53, N S6. – P. 566–572. doi.org/10.1002/prot.10532.
9. Uversky, V. N. What does it mean to be natively unfolded? / V. N. Uversky // *European Journal of Biochemistry*. – 2002. – Vol. 269, N 1. – P. 2–12. doi.org/10.1046/j.0014-2956.2001.02649.x.

10. Dunker, A. K. The protein trinity – linking function and disorder / A. K. Dunker, Z. Obradovic // *Nature Biotechnology*. – 2001. – Vol. 19, N 9. – P. 805–806. doi.org/10.1038/nbt0901-805.
11. Gazumyan, A. Ig β tyrosine residues contribute to the control of B cell receptor signaling by regulating receptor internalization / A. Gazumyan, A. Reichlin, M. C. Nussenzweig // *The Journal of Experimental Medicine*. – 2006. – Vol. 203, N 7. – P. 1785–1794. doi.org/10.1084/jem.20060221.
12. Cytoplasmic Ig α Serine/Threonines Fine-Tune Ig α Tyrosine Phosphorylation and Limit Bone Marrow Plasma Cell Formation / H. C. Patterson [et al.] // *The Journal of Immunology*. – 2011. – Vol. 187, N 6. – P. 2853–2858. doi.org/10.4049/jimmunol.1101143.
13. *Immunology* / R. A. Goldsby [et al.]. – New York: W. H. Freeman and Company, 2003. – 603 p.
14. Lanier, L. L. NK cell recognition / L. L. Lanier // *Annu. Rev. Immunol.* – 2005. – Vol. 23, N 1. – P. 225–274. doi.org/10.1146/annurev.immunol.23.021704.115526.
15. Structural and functional studies of Ig $\alpha\beta$ and its assembly with the B cell antigen receptor / S. Radaev [et al.] // *Structure*. – 2010. – Vol. 18, N 8. – P. 934–943. doi.org/10.1016/j.str.2010.04.019.
16. Rational improvement of cell-free protein synthesis / A. Pedersen [et al.] // *New biotechnology*. – 2011. – Vol. 28, N 3. – P. 218–224. doi.org/10.1016/j.nbt.2010.06.015.
17. NMRPipe: a multidimensional spectral processing system based on UNIX pipes / F. Delaglio [et al.] // *Journal of Biomolecular NMR*. – 1995. – Vol. 6, N 3. – P. 277–293. doi.org/10.1007/bf00197809.
18. Peri, S. GPMW – a software tool for analyzing proteins and peptides / S. Peri, H. Steen, A. Pandey // *Trends in Biochemical Sciences*. – 2001. – Vol. 26, N 11. – P. 687–689. doi.org/10.1016/s0968-0004(01)01954-5.
19. Thermal stability and folding kinetics analysis of disordered protein, securin / H. L. Chu [et al.] // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2014. – Vol. 115, N 3. – P. 2171–2178. doi.org/10.1007/s10973-013-3598-x.
20. Keller, R. Computer-aided resonance assignment (CARA) / R. Keller, K. Wuthrich. – Cantina, Switzerland: Verlag Goldau, 2004. – 81 p.
21. Highly efficient NMR assignment of intrinsically disordered proteins: application to B- and T-cell receptor domains / L. Isaksson [et al.] // *PloS One*. – 2013. – Vol. 8, N 5. – P. e62947. doi.org/10.1371/journal.pone.0062947.

References

1. Strauss A., Bitsch F., Cutting B., Fendrich G., Graff P., Liebetanz J., Zurini M., Jahnke W. Amino-acid-type selective isotope labeling of proteins expressed in Baculovirus-infected insect cells useful for NMR studies. *Journal of biomolecular NMR*, 2003, vol. 26, no. 4, pp. 367–372. doi.org/10.1023/a:1024013111478.
2. Uversky V. N. Natively unfolded proteins: a point where biology waits for physics. *Protein science*, 2002, vol. 11, no. 4, pp. 739–756. doi.org/10.1110/ps.4210102.
3. Dunker A. K., Garner E., Guillot S., Romero P., Albrecht K. Protein disorder and the evolution of molecular recognition: theory, predictions and observations. *Pacific Symposium on Biocomputing*, 1998, vol. 3, pp. 473–484.
4. Uversky V. N., Gillespie J. R., Fink A. L. Why are “natively unfolded” proteins unstructured under physiologic conditions? *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*, 2000, vol. 41, no. 3, pp. 415–427. doi.org/10.1002/1097-0134(20001115)41:3%3C415::aid-prot130%3E3.3.co;2-z.
5. Garner E., Cannon P., Romero P., Obradović Z., Dunker A. K. Predicting disordered regions from amino acid sequence. *Genome Informatics*, 1998, vol. 9, pp. 201–213.
6. Campen A., Williams R., Brown C., Meng J., Uversky V., Dunker A. TOP-IDP-scale: a new amino acid scale measuring propensity for intrinsic disorder. *Protein and Peptide letters*, 2008, vol. 15, no. 9, pp. 956. doi.org/10.2174/092986608785849164.
7. Uversky V. N. A decade and a half of protein intrinsic disorder: biology still waits for physics. *Protein Science*, 2013, vol. 22, no. 6, pp. 693–724. doi.org/10.1002/pro.2261.
8. Obradovic Z., Peng K., Vucetic S., Radivojac P., Brown C. J., Dunker A. K. Predicting intrinsic disorder from amino acid sequence. *Proteins: Structure, Function, and Genetics*, 2003, vol. 53, no. S6, pp. 566–572. doi.org/10.1002/prot.10532.
9. Uversky V. N. What does it mean to be natively unfolded? *European Journal of Biochemistry*, 2002, vol. 269, no. 1, pp. 2–12. doi.org/10.1046/j.0014-2956.2001.02649.x.
10. Dunker A. K., Obradovic Z. The protein trinity – linking function and disorder. *Nature Biotechnology*, 2001, vol. 19, no. 9, pp. 805–806. doi.org/10.1038/nbt0901-805.
11. Gazumyan A., Reichlin A., Nussenzweig M. C. Ig β tyrosine residues contribute to the control of B cell receptor signaling by regulating receptor internalization. *The Journal of Experimental Medicine*, 2006, vol. 203, no. 7, pp. 1785–1794. doi.org/10.1084/jem.20060221.
12. Patterson H. C., Kraus M., Wang D., Shahsafaei A., Henderson J. M., Seagal J., Otipoby K. L., Thai T.-H., Rajewsky K. Cytoplasmic Ig α Serine/Threonines Fine-Tune Ig α Tyrosine Phosphorylation and Limit Bone Marrow Plasma Cell Formation. *The Journal of Immunology*, 2011, vol. 187, no. 6, pp. 2853–2858. doi.org/10.4049/jimmunol.1101143.
13. Goldsby R. A., Kindt T. J., Osborne B. A., Kuby J. *Immunology*. New York, W. H. Freeman and Company, 2003. 603 p.
14. Lanier L. L. NK cell recognition. *Annual Review of Immunology*, 2005, vol. 23, no. 1, pp. 225–274. doi.org/10.1146/annurev.immunol.23.021704.115526.
15. Radaev S., Zhongcheng Z., Tolar P., Nguyen K., Nguyen A., Krueger P. D., Stutzman N., Pierce S., Sun P. D. Structural and functional studies of Ig $\alpha\beta$ and its assembly with the B cell antigen receptor. *Structure*, 2010, vol. 18, no. 8, pp. 934–943. doi.org/10.1016/j.str.2010.04.019.
16. Pedersen A., Hellberg K., Enberg J., Karlsson B. G. Rational improvement of cell-free protein synthesis. *New biotechnology*, 2011, vol. 28, no. 3, pp. 218–224. doi.org/10.1016/j.nbt.2010.06.015.

17. Delaglio F., Grzesiek S., Vuister G. W., Zhu G., Pfeifer J., Bax A. NMRPipe: a multidimensional spectral processing system based on UNIX pipes. *Journal of Biomolecular NMR*, 1995, vol. 6, no. 3, pp. 277–293. doi.org/10.1007/bf00197809.
18. Peri S., Steen H., Pandey A. GPMW – a software tool for analyzing proteins and peptides. *Trends in Biochemical Sciences*, 2001, vol. 26, no. 11, pp. 687–689. doi.org/10.1016/s0968-0004(01)01954-5.
19. Chu H. L., Chen T.-H., Wu C.-Y., Yang Y.-C., Tseng S.-H., Cheng T.-M., Ho L.-P., Tsai L.-Y., Li H.-Y., Chang C.-S., Chang C.-C. Thermal stability and folding kinetics analysis of disordered protein, securin. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2014, vol. 115, no. 3, pp. 2171–2178. doi.org/10.1007/s10973-013-3598-x.
20. Keller R., Wuthrich K. *Computer-aided resonance assignment (CARA)*. Cantina, Switzerland, Verlag Goldau, 2004. 81 p.
21. Isaksson L., Mayzel M., Saline M., Pedersen A., Rosenl w J., Brutscher B., Karlsson B. G., Orekhov V. Y. Highly efficient NMR assignment of intrinsically disordered proteins: application to B- and T-cell receptor domains. *PLoS One*, 2013, vol. 8, no. 5, pp. e62947. doi.org/10.1371/journal.pone.0062947.

Информация об авторах

Панкратова Елена Вячеславовна – мл. науч. сотрудник, Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Купревича, 5/2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pankratovaelena3@gmail.com.

Бритиков Владимир Владимирович – науч. сотрудник, Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Купревича, 5/2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vvbritikov@gmail.com.

Усанов Сергей Александрович – член-корреспондент, д-р хим. наук, профессор, Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Купревича, 5/2, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: usanov@iboch.bas-net.by.

Для цитирования

Панкратова, Е. В. Исследование трансмембранного белка CD79B методом многомерной импульсной ЯМР спектроскопии / Е. В. Панкратова, В. В. Бритиков, С. А. Усанов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 39–50.

Information about the authors

Pankratova Elena Vyacheslavovna – Junior researcher, Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pankratovaelena3@gmail.com.

Britikov Vladimir Vladimirovich – Researcher, Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vvbritikov@gmail.com.

Usanov Sergei Aleksandrovich – Corresponding Member, D. Sc. (Chemistry), Professor, Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: usanov@iboch.bas-net.by.

For citation

Pankratova E. V., Britikov V. V., Usanov S. A. Study of the transmembrane protein CD79B by multidimensional pulse NMR spectroscopy. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 39–50 (in Russian).

ISSN 0002–354X (print)

БИОЛОГИЯ
BIOLOGY

УДК 57.043

Поступило в редакцию 21.11.2016

Received 21.11.2016

Р. К. Спилов, А. Н. Никитин, И. А. Чешик, Р. А. Король*Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь***АККУМУЛЯЦИЯ ТРАНСУРАНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НАДЗЕМНЫМИ
И ПОДЗЕМНЫМИ ОРГАНАМИ СОСУДИСТЫХ РАСТЕНИЙ***(Представлено членом-корреспондентом А. В. Кильчевским)*

Наличие трансураниевых элементов (ТУЭ) в составе радиоактивных выпадений, особенно при их вовлечении в биологический круговорот, определяет весьма продолжительный срок радиозэкологических последствий чернобыльской катастрофы. Без знания закономерностей поступления и распределения ТУЭ в растениях невозможна корректная оценка радиационной обстановки на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению. В работе представлены коэффициенты накопления ТУЭ для надземных и подземных органов травянистых и кустарничковых растений разных экологических групп. Показано, что коэффициенты накопления ТУЭ подземными органами сосудистых растений значительно выше таковых для надземных органов.

Ключевые слова: трансураниевые элементы, америций-241, плутоний-238, плутоний-239,240, чернобыльская катастрофа, сосудистые растения.

R. K. Spirov, A. N. Nikitin, I. A. Cheshik, R. A. Korol*Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus***ACCUMULATION OF TRANSURANIUM ELEMENTS BY UNDERGROUND
AND ABOVEGROUND ORGANS OF TRACHEOPHYTES***(Communicated by Corresponding Member A. V. Kilchevsky)*

The presence of transuranic elements in the Chernobyl fallout determines the longevity of radioecological consequences, especially with their possible involvement in the biological cycle. Without knowledge of transfer and distribution patterns of transuranic elements in plants we cannot make a correct assessment of the radiological situation in the areas affected by radioactive contamination from the Chernobyl accident. The article presents the accumulation factors for the aboveground and underground organs of herbaceous and shrub plants of different ecological groups. It is shown that the accumulation factors of transuranic elements in the underground organs of vascular plants are much higher than their accumulation factors in aboveground biomass.

Keywords: transuranic elements, americium-241, plutonium-238, plutonium-239,240, the Chernobyl catastrophe, tracheophytes.

Введение. Расширение техногенной деятельности человека является причиной постоянного увеличения негативного воздействия на биосферу и ее компоненты. Одним из опаснейших факторов техногенного воздействия является радиационная нагрузка, возникающая при попадании в окружающую среду искусственных радионуклидов. Контаминация биосферы трансураниевыми элементами (ТУЭ) привлекает особое внимание радиозэкологов в силу того, что данные элементы являются ксенобиотиками для всех живых организмов. Они имеют искусственное происхождение и отсутствовали на протяжении практически всей эволюции жизни на Земле. Кроме того, многие изотопы ТУЭ обладают высокой радиотоксичностью и длительным периодом полураспада. Отсутствие стабильных изотопов делает их наименее предсказуемыми компонентами смесей искусственных радиоактивных веществ, поступающих в природную среду в составе

аварийных выбросов или при ядерных взрывах [1]. Отсутствие биологических функций, специфических механизмов поглощения и выведения в организмах животных и растений, длительный период удержания в биологических тканях подчеркивают радиобиологическую опасность ТУЭ.

На сегодняшний день основными источниками поступления ТУЭ в окружающую среду являются испытания ядерного оружия и аварии на предприятиях ядерно-топливного цикла. Авария на Чернобыльской АЭС привела к загрязнению ТУЭ значительной части территории Республики Беларусь. Спектр долгоживущих изотопов ТУЭ чернобыльского выброса преимущественно представлен ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu . Последний имеет период полураспада 14,4 года и при бета-распаде образует ^{241}Am . В первые месяцы после катастрофы площадь с плотностью загрязнения изотопами плутония выше 0,1 Ки/км² составила около 400 км². В результате трансформации ^{241}Pu в ^{241}Am территория с плотностью загрязнения альфа-излучающими изотопами выше 0,1 Ки/км² к 2060 г. увеличится в несколько раз – до 1800 км² [2]. Из-за ТУЭ радиоактивное загрязнение экосистем в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС сохранится на протяжении сотен и тысяч лет [3].

В результате многолетних исследований распределения форм нахождения ТУЭ в почвах на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ) Белорусским государственным университетом и Институтом радиобиологии показано, что плутоний и америций находятся в основном в малоподвижном состоянии. Доля радионуклидов в доступных для растений формах составляет 1,1–9,4 % от полного содержания в почвах. В области ризосферы растений в почвенные растворы может переходить не более 29 % радионуклидов [4].

В живых организмах метаболизм плутония и америция имеет заметные различия. Америций образует более устойчивые комплексы с цитратными и нитратными ионами, чем плутоний и интенсивнее всасывается из желудочно-кишечного тракта в кровяное русло. Как отмечают В. С. Аверин и соавт., несмотря на приобретенные знания, достигнутые в области изучения поведения ТУЭ в различных средах, остается достаточно много вопросов, требующих дальнейших исследований [5].

Цель исследования – оценить аккумуляцию трансурановых элементов сосудистыми растениями доминантами и субдоминантами экосистем, характерных для ПГРЭЗ.

Материалы и методы исследования. Объектами исследования являлись типичные для экосистем ПГРЭЗ виды травянистых и кустарниковых растений различных экологических групп. Травянистые ксерофиты: полынь горькая (*Artemisia absinthium* L.), семейство Астровые (*Asteraceae*), булавоносец седой (*Corynephorus canescens* (L.) P. Beauv.), семейство Мятликовые (*Poaceae*). Мезофиты: кустарник крушина ломкая (*Frangula alnus* Mill.), семейство Крушиновые (*Rhamnaceae*), кустарничек черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L.), семейство Вересковые (*Ericaceae*). Травянистые гигрофиты: ирис ложноаировый (*Iris pseudacorus* L.), семейство Ирисовые (*Iridaceae*), осока пузырчатая (*Carex vesicaria* L.), семейство Осоковые (*Cyperaceae*), тростник обыкновенный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), семейство Мятликовые (*Poaceae*).

Отбор почвенных и растительных образцов проводили по общепринятым методикам [6] в июне 2015 г. на четырех пробных площадках (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Радиационная характеристика пробных площадок

Table 1. Radiation characteristic of test areas

Пробная площадка Test area	Плотность загрязнения, кБк · м ⁻² Contamination density, kBq · m ⁻²			
	¹³⁷ Cs	²³⁸ Pu	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Am
I	4332,36 ± 338,81	15,79 ± 2,37	38,03 ± 5,71	96,82 ± 14,52
II	3500,00 ± 285,19	11,44 ± 1,72	22,85 ± 3,43	79,89 ± 11,98
III	2498,17 ± 64,95	7,22 ± 0,64	16,03 ± 1,40	48,58 ± 10,14
IV	707,58 ± 40,33	1,35 ± 0,18	2,27 ± 0,27	7,93 ± 2,07

Для определения удельной активности ТУЭ в растительных образцах отбирали надземные и подземные части растений. Отбирали смешанную пробу, состоящую из трех индивидуальных,

в количестве, необходимом для радиохимического анализа с учетом того, что растительные образцы будут подвергнуты высушиванию и озолению. Надземные части растений отделяли секатором, корни тщательно отмывали от почвы. Растительные образцы измельчали секатором и взвешивали на месте на переносных весах, фасовали в полиэтиленовые пакеты и маркировали. Образцы почвы отбирались модифицированным буром Малькова внутренним диаметром 4 см на глубину 20 см (5 уколов с площадки).

Растительные и почвенные образцы высушивали до абсолютно сухого состояния при 80 °С. После этого пробы измельчали на мельнице для последующего определения ^{137}Cs и ТУЭ.

Радиохимический анализ включал в себя кислотное вскрытие пробы, соосаждение трансурановых элементов с гидроксидом железа (III), нейтрализацию безугольным аммиаком и фильтрование. После этого осадок растворяли в азотной кислоте и стабилизировали плутоний до четырехвалентного состояния нитритом натрия. Раствор пропускали через колонки с анионитом АВ-17 в азотнокислой форме. Плутоний элюировали 0,3 М HNO_3 – 0,1 М HF . Америций очищали от железа и урана на колонках с анионитом АВ-17, затем пропускали через колонки с катионитом ФИБАН.

Содержание изотопов плутония и америция в элюате определяли методом α -спектрометрии. Для этого к порции элюата добавляли раствор азотнокислого церия в количестве, содержащем 50 мкг церия (в пересчете на металл). Раствор нейтрализовали аммиаком, не содержащим растворенный CO_2 , до pH 6–7. Образовавшийся осадок гидроксида четырехвалентного церия с осажденными ТУЭ фильтровали под вакуумом через ядерный фильтр с диаметром пор 0,15 мкм. Осадок на фильтре высушивали на воздухе и наклеивали на подложку из нержавеющей стали [7].

Содержание ТУЭ измеряли на альфа-спектрометрической системе Alpha Analyst, Canberra (США) с полупроводниковыми PIPS-детекторами из сверхчистого кремния. Площадь детектора 300 мм², эффективность регистрации в области энергий 3–8 МэВ составляет (20 ± 2) %. Время измерения содержания изотопов плутония – 24 ч, время измерения содержания ^{244}Am – 12 ч. Математическую обработку спектров осуществляли при помощи программного обеспечения Apex Alpha. Расчет неопределенности измерения проводили согласно общепринятым методикам [8] с коэффициентом охвата равным двум.

Коэффициент накопления рассчитывался как отношение удельной активности радионуклида в надземных или подземных органах растений (Бк/кг, абсолютно сухой вес) к удельной активности верхнего 20-сантиметрового слоя почвы (Бк/кг : Бк/кг).

Результаты и их обсуждение. Коэффициенты накопления изотопов плутония в подземных органах растений преимущественно варьируют в пределах 0,1–1,2 (табл. 2). Стоит отметить, что почти для всех растений коэффициент накопления ^{238}Pu подземными органами не имеет достоверных отличий от коэффициента накопления $^{239,240}\text{Pu}$. Исключение составил тростник обыкновенный, корни которого достоверно сильнее аккумулируют изотопы $^{239,240}\text{Pu}$ по сравнению с ^{238}Pu . Наибольшим коэффициентом накопления ^{238}Pu характеризуются корни булавоносца седого – $1,19 \pm 0,25$, наименьшим – корни крушины ломкой – $(1,11 \pm 0,14) \cdot 10^{-1}$.

Как и в случае с ^{238}Pu , наибольшим коэффициентом накопления $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am характеризуются корни булавоносца седого $(9,72 \pm 1,95) \cdot 10^{-1}$ и $1,14 \pm 0,20$ соответственно, наименьшим – корни крушины ломкой – $(1,12 \pm 0,13) \cdot 10^{-1}$ и $(7,34 \pm 1,34) \cdot 10^{-2}$ соответственно.

При анализе видовых особенностей коэффициентов накопления $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am можно выделить три группы растений. К первой группе относятся полынь горькая и булавоносец седой, характеризующиеся тем, что коэффициент накопления $^{239,240}\text{Pu}$ не отличается достоверно от коэффициента накопления ^{241}Am . Вторую группу составляют крушина ломкая, ирис ложноаировый и осока пузырчатая. В этой группе значение коэффициентов накопления $^{239,240}\text{Pu}$ корнями растений превышает значение данного показателя для ^{241}Am . К третьей группе относятся черника обыкновенная и тростник обыкновенный, эти виды характеризуются более высокими коэффициентами накопления ^{241}Am по сравнению с изотопами плутония.

Целесообразно сравнить накопление ТУЭ подземными органами сосудистых растений с аналогичным показателем для надземных частей. Накопление плутония и америция надземными органами травянистых и кустарничковых растений, как правило, существенно ниже, чем подземными (табл. 3).

Т а б л и ц а 2. Коэффициенты накопления (Кн) изотопов плутония и америция подземными органами отдельных видов растений

T a b l e 2. Accumulation coefficients (Ac) of plutonium and americium isotopes by underground organs of separate plant species

Пробная площадка Test area	Вид Species	Кн ²³⁸ Pu Ac ²³⁸ Pu	Кн ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu Ac ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	Кн ²⁴¹ Am Ac ²⁴¹ Am
<i>Ксерофиты</i> <i>Xerophytes</i>				
I	Полынь горькая <i>Artemisia absinthium</i>	$(4,45 \pm 0,71) \cdot 10^{-1}$	$(4,41 \pm 0,51) \cdot 10^{-1}$	$(5,05 \pm 1,18) \cdot 10^{-1}$
I	Булавоносец седой <i>Corynephorus canescens</i>	$1,19 \pm 0,25$	$(9,72 \pm 1,95) \cdot 10^{-1}$	$1,14 \pm 0,20$
<i>Мезофиты</i> <i>Mesophytes</i>				
II	Крушина ломкая <i>Frangula alnus</i>	$(1,11 \pm 0,14) \cdot 10^{-1}$	$(1,12 \pm 0,13) \cdot 10^{-1}$	$(7,34 \pm 1,34) \cdot 10^{-2}$
III	Черника обыкновенная <i>Vaccinium myrtillus</i>	$(2,59 \pm 0,43) \cdot 10^{-1}$	$(2,32 \pm 0,27) \cdot 10^{-1}$	$(4,74 \pm 1,29) \cdot 10^{-1}$
<i>Гигрофиты</i> <i>Hygrophytes</i>				
IV	Ирис ложноаировый <i>Iris pseudacorus</i>	$(6,11 \pm 0,73) \cdot 10^{-1}$	$(5,93 \pm 0,68) \cdot 10^{-1}$	$(3,90 \pm 0,76) \cdot 10^{-1}$
IV	Осока пузырчатая <i>Carex vesicaria</i>	$(8,43 \pm 1,00) \cdot 10^{-1}$	$(9,16 \pm 1,11) \cdot 10^{-1}$	$(4,51 \pm 0,78) \cdot 10^{-1}$
IV	Тростник обыкновенный <i>Phragmites australis</i>	$(2,50 \pm 0,38) \cdot 10^{-1}$	$(3,78 \pm 0,48) \cdot 10^{-1}$	$(5,98 \pm 1,20) \cdot 10^{-1}$

Т а б л и ц а 3. Коэффициенты накопления (Кн) изотопов плутония и америция надземными органами отдельных видов растений

T a b l e 3. Accumulation coefficients (Ac) of plutonium and americium isotopes by aboveground organs of separate plant species

Пробная площадка Test area	Вид Species	Кн ²³⁸ Pu Ac ²³⁸ Pu	Кн ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu Ac ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	Кн ²⁴¹ Am Ac ²⁴¹ Am
<i>Ксерофиты</i> <i>Xerophytes</i>				
I	Полынь горькая <i>Artemisia absinthium</i>	$(1,51 \pm 0,22) \cdot 10^{-2}$	$(1,11 \pm 0,15) \cdot 10^{-2}$	$(1,06 \pm 0,19) \cdot 10^{-2}$
I	Булавоносец седой <i>Corynephorus canescens</i>	$(5,91 \pm 1,71) \cdot 10^{-2}$	$(7,86 \pm 4,28) \cdot 10^{-3}$	$(9,74 \pm 1,96) \cdot 10^{-3}$
<i>Мезофиты</i> <i>Mesophytes</i>				
II	Крушина ломкая <i>Frangula alnus</i> (лист)	$(2,87 \pm 0,41) \cdot 10^{-2}$	$(4,16 \pm 0,66) \cdot 10^{-3}$	$(3,47 \pm 0,67) \cdot 10^{-3}$
II	Крушина ломкая <i>Frangula alnus</i> (стебель)	$(9,27 \pm 1,37) \cdot 10^{-3}$	$(1,68 \pm 0,24) \cdot 10^{-3}$	$(1,23 \pm 0,25) \cdot 10^{-3}$
III	Черника обыкновенная <i>Vaccinium myrtillus</i>	$(7,41 \pm 0,91) \cdot 10^{-2}$	$(2,81 \pm 0,37) \cdot 10^{-2}$	$(4,38 \pm 0,82) \cdot 10^{-2}$
<i>Гигрофиты</i> <i>Hygrophytes</i>				
IV	Ирис ложноаировый <i>Iris pseudacorus</i>	$(3,37 \pm 0,41) \cdot 10^{-1}$	$(8,12 \pm 1,55) \cdot 10^{-2}$	$(6,11 \pm 1,18) \cdot 10^{-2}$
IV	Осока пузырчатая <i>Carex vesicaria</i>	$(1,20 \pm 0,15) \cdot 10^{-1}$	$(2,19 \pm 0,46) \cdot 10^{-2}$	$(1,28 \pm 0,32) \cdot 10^{-2}$
IV	Тростник обыкновенный <i>Phragmites australis</i>	$(7,85 \pm 1,26) \cdot 10^{-2}$	$(3,69 \pm 0,49) \cdot 10^{-2}$	$(3,21 \pm 0,60) \cdot 10^{-2}$

Самые высокие значения коэффициентов накопления для надземных органов рассмотренных видов растений присущи ^{238}Pu . Если для полыни равнинной накопление данного изотопа достоверно не отличается от аккумуляции других изотопов ТУЭ, то для надземных органов булавоносца седого, ириса ложноаирового, осоки пузырчатой и листьев крушины ломкой коэффициент накопления ^{238}Pu может отличаться на порядок. Для черники обыкновенной и тростника обыкновенного значение коэффициента накопления ^{238}Pu также превышает значение коэффициентов накопления $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am . Наименьшим коэффициентом накопления ^{238}Pu и $^{239,240}\text{Pu}$ характеризуются стебли крушины ломкой – $(9,27 \pm 1,37) \cdot 10^{-3}$ и $(1,68 \pm 0,24) \cdot 10^{-3}$ соответственно, наибольшим – надземные органы ириса ложноаирового – $(3,37 \pm 0,41) \cdot 10^{-1}$ и $(8,12 \pm 1,55) \cdot 10^{-2}$ соответственно.

Минимальные значения коэффициента накопления ^{241}Am выявлены у стеблей крушины ломкой – $(1,23 \pm 0,25) \cdot 10^{-3}$, максимальные – у надземных органов ириса ложноаирового – $(6,11 \pm 1,18) \cdot 10^{-2}$.

При рассмотрении особенностей накопления различных изотопов плутония и ^{241}Am надземными органами можно выделить три группы растений. Первую представляет полынь горькая, в надземных органах которой коэффициент накопления изотопов $^{239,240}\text{Pu}$ не отличается достоверно от коэффициентов накопления ^{238}Pu и ^{241}Am . Во вторую группу входят растения, у которых значения коэффициентов накопления $^{239,240}\text{Pu}$ надземными органами не имеют достоверных отличий от значений коэффициентов накопления ^{241}Am , но меньше таковых по сравнению с ^{238}Pu . К этой группе относятся булавоносец седой, крушина ломкая, ирис ложноаировый, тростник обыкновенный. Третья группа растений отличается тем, что коэффициенты накопления изотопов $^{239,240}\text{Pu}$ надземными органами меньше, чем коэффициенты накопления ^{238}Pu и ^{241}Am . Сюда относятся осока пузырчатая и черника обыкновенная.

Анализ данных показывает, что наибольшими коэффициентами накопления ТУЭ в надземных органах характеризуются гигрофиты, произрастающие на пробной площадке IV. Несмотря на то что данная пробная площадка имеет наименьшую плотность загрязнения ТУЭ, влияние водного режима и других характеристик почвы обусловило относительно высокую доступность трансурановых элементов для растений. Стоит также иметь в виду и физиологические особенности самих гигрофитов по сравнению с мезофитами и ксерофитами.

Согласно результатам выполненных ранее исследований, биологическая доступность ^{241}Am в чернобыльских выпадениях выше по сравнению с изотопами плутония. В частности, G. A. Sokolik и соавт. [9] установили, что биологическая доступность америция в 1,5–4,4 раза выше по сравнению с плутонием. Авторы объясняют это склонностью последнего образовывать в почве органические и органо-минеральные комплексы. По результатам исследований О. А. Шуранковой и В. П. Кудряшова [10], коэффициенты накопления ^{241}Am в луговой растительности зоны отчуждения Чернобыльской АЭС могут на 1–2 порядка превышать коэффициенты накопления $^{239,240}\text{Pu}$. Такое расхождение приведенных выше результатов с данными, полученными другими исследователями 10 и более лет назад, может быть объяснено медленными физико-химическими процессами в почве, обуславливающими снижение биологической доступности ^{241}Am либо засушливым характером первой половины вегетационного сезона в год отбора образцов. Для решения этого вопроса требуется проведение долговременных наблюдений за физико-химическими изменениями радионуклидов чернобыльского происхождения в почвенной среде и влиянием на них экстремальных погодных факторов.

Следует обратить внимание на то, что корни булавоносца седого имеют коэффициенты накопления ^{238}Pu и ^{241}Am выше единицы. Это говорит о том, что подземные органы растения выступают в качестве аккумуляторов вышеназванных изотопов. Потенциально эту особенность можно использовать для биоремедиации земель, загрязненных ТУЭ. С учетом продолжительных периодов полураспада ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am данная мера может оказаться экономически целесообразной и позволит ускорить возвращение отчужденных земель в хозяйственный оборот.

Заключение. Установлено, что значения коэффициентов накопления изотопов ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am для подземных органов сосудистых растений всех экологических групп значительно выше, чем для надземных органов. Спустя 30 лет после выброса ТУЭ в окружающую среду ко-

эффиценты их накопления в подземных органах находятся в диапазоне от $(7,34 \pm 1,34) \cdot 10^{-2}$ по ^{241}Am до $1,19 \pm 0,25$ по ^{238}Pu . Коэффициенты накопления ТУЭ в надземных органах варьируют от $(1,23 \pm 0,25) \cdot 10^{-3}$ по ^{241}Am до $(3,37 \pm 0,41) \cdot 10^{-1}$ по ^{238}Pu .

С учетом длительного периода полураспада ряда изотопов ТУЭ имеет смысл рассмотреть возможность фиторемедиации загрязненных территорий, опираясь на высокую аккумулярующую способность корневых систем некоторых видов сосудистых растений по отношению к этим элементам.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта на выполнение научно-исследовательских работ докторантами, аспирантами и соискателями Национальной академии наук Беларуси.

Acknowledgment. This work was supported by a grant to perform research work by doctoral students of the National Academy of Sciences of Belarus.

Список использованных источников

1. Трансурановые элементы в окружающей среде / под ред. У. С. Хэнсона; пер. с англ. Г. Н. Романова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 344 с.
2. A prognostic estimation of the area contaminated with alpha-emitting transuranium isotopes in Belarus following the Chernobyl accident / V. A. Knatko [et al.] // J. Envir. Radioactivity. – 2005. – Vol. 83, N 1. – P. 49–59. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.07.005.
3. Чернобыль: последствия катастрофы для человека и природы / А. В. Яблоков [и др.]. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. – 826 с.
4. Состояние плутония и америция в почвах ПГРЭС / Г. А. Соколик [и др.] // VI Съезд по радиационным исследованиям (радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность): тез. докл., Москва, 25–28 окт. 2010 г. – М., 2010. – Т. II. – С. 69–70.
5. Америций и плутоний в агроэкосистемах. Чернобыльская катастрофа 1986 года / под общ. ред. В. С. Аверина. – Гомель: Полеспечать, 2014. – 176 с.
6. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб = Nature protection. Soils. General requirements for sampling: ГОСТ 17.4.3.01–83. – Введ. 01.07.84. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 8 с.
7. Методика определения активности стронция-90 и трансурановых элементов в биологических объектах: МВИ. МН 1892–2003. – Минск, 2003. – 17 с.
8. Шошина, Р. Р. Анализ неопределенностей при оценке доз на биоту в условиях хронического радиационного воздействия / Р. Р. Шошина, Г. В. Лаврентьева // Радиобиология: «Маяк», Чернобыль, Фукусима: материалы междунар. науч. конф. (Гомель, 24–25 сент. 2015 г.). – Минск, 2015. – С. 270–273.
9. Soil-plant transfer of plutonium and americium in contaminated regions of Belarus after the Chernobyl catastrophe / Sokolik G. A. [et al.] // Environment International. – 2004. – Vol. 30, N 7. – P. 939–947. doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.003.
10. Шуранкова, О. А. Поступление трансурановых элементов ($^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am) чернобыльского происхождения в луговую растительность / О. А. Шуранкова, В. П. Кудряшов // Проблемы здоровья и экологии. – 2006. – Т. 7, № 1. – С. 67–71.

References

1. Hanson W. C. (ed.) *Transuranic elements in the environment*. Springfield, Virginia, Technical Information Center / U. S. Department of Energy, 1980. 764 p.
2. Knatko V. A., Asimova V. D., Yanush A. E., Golikov Yu. N., Ivashkevich I. I., Kouzmina L. A., Bondar Yu. I. A prognostic estimation of the area contaminated with alpha-emitting transuranium isotopes in Belarus following the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2005, vol. 83, no. 1, pp. 49–59. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.07.005.
3. Yablokov A. V., Nesterenko V. B., Nesterenko A. V., Preobrazhenskaya N. E. *Chernobyl: Consequences disaster for man and nature*. Moscow, Partnership of scientific publications of KMC, 2016. 826 p. (in Russian).
4. Sokolik G. A., Ovsyannikova S. V., Popenya M. V., Voinikova E. V., Svirshhevskii S. F. State of plutonium and americium in soil PSRER. *VI S'ezd po radiatsionnym issledovaniiam (radiobiologiya, radioekologiya, radiatsionnaia bezopasnost'): tezisy dokladov, Moskva, 25–28 oktiabria 2010 g.* [Proceedings VI Congress on radiation studies (radiobiology, radioecology, radiation safety)]. Moscow, 2010, vol. II, pp. 69–70 (in Russian).
5. Averin V. S. (ed.), Podolyak A. G., Tagai S. A., Kukhtevich A. B., Buzdalkin K. N., Tsarenok A. A., Nilova E. K. *Americium and plutonium in agro-ecosystems. The Chernobyl disaster in 1986*. Gomel, Polespechat' Publ., 2014. 176 p. (in Russian).
6. State standard 17.4.3.01–83. *Nature protection. Soils. General requirements for sampling*. Moscow, Publishing house of standards, 1984. 8 p. (in Russian).
7. MVI. MN 1892–2003. *Methods of determining the activity of strontium-90 and transuranic elements in biological objects*. Minsk, 2003. 17 p. (in Russian).
8. Shoshina R. R., Lavrent'eva G. V. Analysis of uncertainties in the assessment of doses to biota in chronic radiation exposure. *Radiobiologiya: «Maiak», Chernobyl', Fukusima: materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Gomel',*

24–25 *sentiabria* 2015 g.) [Radiobiology: “Mayak”, Chernobyl, Fukushima. Proceedings of the international scientific conference (Gomel, 24–25 Sept. 2015)]. Minsk, 2015, pp. 270–273 (in Russian).

9. Sokolik G. A., Ovsyannikova S. V., Ivanova T. G., Leinova S. Soil-plant transfer of plutonium and americium in contaminated regions of Belarus after the Chernobyl catastrophe. *Environment International*, 2004, vol. 30, no. 7, pp. 939–947. doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.003.

10. Shurankova O. A., Kudryashov V. P. The transuranium elements ($^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am) of the Chernobyl parentage entering in a meadow plants. *Problemy zdorov'ya i ekologii* [Problems of health and the environment], 2006, vol. 7, no. 1, pp. 67–71.

Информация об авторах

Спиров Руслан Ковсарович – мл. науч. сотрудник, Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: ruslan.spirov@yandex.ru.

Никитин Александр Николаевич – канд. сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией, Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: nikitinale@gmail.com.

Чешик Игорь Анатольевич – канд. мед. наук, директор, Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: igor.cheshik@gmail.com.

Король Раиса Александровна – ст. науч. сотрудник, Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: irb@mail.gomel.by.

Для цитирования

Аккумуляция трансураниевых элементов надземными и подземными органами сосудистых растений / Р. К. Спиров [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 51–57.

Information about the authors

Spirov Ruslan Kovsarovich – Junior researcher, Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninskii Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: ruslan.spirov@yandex.ru.

Nikitin Alexander Nikolaevich – Ph. D. (Agrarian), Head of the Laboratory, Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninskii Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: nikitinale@gmail.com.

Cheshik Igor Anatolyevich – Ph. D. (Medicine), Director, Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninskii Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: igor.cheshik@gmail.com.

Korol Raisa Aleksandrovna – Senior researcher, Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninskii Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: irb@mail.gomel.by.

For citation

Spirov R. K., Nikitin A. N., Cheshik I. A., Korol R. A. Accumulation of transuranium elements by underground and aboveground organs of tracheophytes. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 51–57 (in Russian).

МЕДИЦИНА**MEDICINE**

УДК 612.616:616-003.725

Поступило в редакцию 27.10.2016

Received 27.10.2016

Ю. А. Рудниченко, В. С. Лукашевич, член-корреспондент И. В. Залуцкий*Институт физиологии НАН Беларуси, Минск, Беларусь***ВЛИЯНИЕ РЕКОМБИНАНТНОГО ЛАКТОФЕРРИНА ЧЕЛОВЕКА
НА УРОВЕНЬ ПОЛОВЫХ ГОРМОНОВ У САМЦОВ КРЫС РАЗНОГО ВОЗРАСТА**

Системное введение рекомбинантного лактоферрина человека молодым (2 мес.) крысам-самцам вызывало увеличение уровня общего тестостерона в сыворотке крови на 200 %. После завершения курсового введения содержание тестостерона оставалось повышенным ($p < 0,05$) в течение семи недель, постепенно возвращаясь до значений контрольной группы без угнетения биосинтеза эндогенного тестостерона.

В модели возрастного гипогонадизма системное влияние *per os* рекомбинантного лактоферрина человека экспериментальным животным оказывало значительное стимулирующее действие на биосинтез тестостерона у 2-летних особей, нормализуя его уровень до физиологических значений молодых крыс.

Ключевые слова: рекомбинантный человеческий лактоферрин, половые гормоны, возрастной гипогонадизм.

Ju. A. Rudnichenko, U. S. Lukashevich, Corresponding Member I. V. Zalutsky*Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***INFLUENCE OF HUMAN RECOMBINANT LACTOFERRIN ON THE LEVEL OF SEX HORMONES
IN MALE RATS OF DIFFERENT AGE**

A systemic administration of human recombinant lactoferrin to male rats caused an increase in a total testosterone level by 200 % in blood serum, the estradiol concentration decreased significantly by 16.7 %. Upon completion of administration, testosterone was still increased ($p < 0.05$) for 7 weeks, gradually returning to the control group values without inhibition of endogenous testosterone synthesis. In contrast, the level of estradiol returned to control values.

Our study of the rat model of age-related hypogonadism revealed that a systemic *per os* administration of human recombinant lactoferrin to experimental animals had a significant stimulatory effect on testosterone biosynthesis in 2-year-olds, restoring it to the level of physiological values in young rats.

Keywords: recombinant human lactoferrin, sex hormones, age-related hypogonadism.

Введение. Развитие андрогенного дефицита у мужчин является актуальной медицинской проблемой. Основным методом лечения такой патологии остается заместительная андрогенная терапия [1]. Главным ее недостатком является угнетение собственного синтеза эндогенного тестостерона или полное его прекращение в организме после отмены заместительной андрогенной терапии [2].

В рамках выполнения программы Союзного государства «БелРосТрансген-2» из молока трансгенных коз получен рекомбинантный лактоферрин человека (рчЛФ) – один из основных белковых компонентов молока, негемовый железосвязывающий гликопротеин, относимый к семейству трансферринов [3]. Он обладает антиоксидантной активностью, противоопухолевыми и противовоспалительными свойствами, участвует в регуляции роста и дифференцировки клеток и др. [4]. Особого внимания заслуживает его влияние на гормональный статус организма, а точнее, продемонстрированная способность увеличивать уровень тестостерона в крови [5]. При этом в доступной литературе отсутствуют сведения о механизме влияния рчЛФ на метабо-

лизм стероидных гормонов в организме. Перспективными являются исследования, направленные на изучение возможности коррекции эндогенного уровня тестостерона в рамках профилактических мероприятий или при комплексной терапии гипогонадизма различной этиологии. Не изученным остается также вопрос, угнетается ли синтез эндогенного тестостерона после завершения системного воздействия рчЛФ, как это происходит при традиционной гормональной терапии.

Цель исследования – изучение влияния рчЛФ на биосинтез тестостерона у молодых крыс-самцов, а также на компенсацию возрастного гипогонадизма у этих животных.

Материалы и методы исследования. На I этапе исследований проводили изучение отсроченного влияния рчЛФ на молодых (2 мес.) крысах-самцах ($n = 116$) массой 250 ± 20 г. Крысы-самцы были разделены на две группы. Первая группа (контрольная) получала *per os* ежедневно изотонический раствор NaCl в объеме 0,1 мл. Особям второй группы (экспериментальная) ежедневно вводили *per os* рчЛФ в дозе 100 мг/кг массы тела животного в течение 2,5 месяцев. Животных выводили из опыта декапитацией под эфирным наркозом через 1, 3, 7, 11 недель, получали сыворотку крови.

На II этапе исследований проводили изучение влияния рчЛФ в экспериментальной модели возрастного гипогонадизма крыс-самцов ($n = 61$). В качестве экспериментальной модели возрастного гипогонадизма были использованы особи возрастом 2 года массой 480 ± 30 г, что примерно соответствует 60-летнему возрасту человека [6]. Было сформировано пять групп. Первая группа – половозрелые крысы-самцы (2 мес.) массой 250 ± 30 г, которые получали ежедневно *per os* изотонический раствор NaCl. Вторая и четвертая группы – особи возрастом 2 года, которые находились в опыте 1 и 2,5 месяца получали ежедневно *per os* изотонический раствор NaCl (возрастной гипогонадизм). Третья и пятая группы – крысы-самцы возрастом 2 года, которые ежедневно получали *per os* рчЛФ в дозе 100 мг/кг массы тела животного на протяжении 1 и 2,5 месяца. После снятия животных с опыта получали сыворотку крови.

Содержание общего и свободного тестостерона, эстрадиола, прогестерона и 17-ОН прогестерона в сыворотке крови определяли методом иммуноферментного анализа с использованием диагностических наборов фирмы «Хема» (РФ).

Экспериментальные данные обработаны с помощью MS Excel, Origin 6.1 и представлены в виде медианы (Me) и интерквартильного размаха (25-й процентиль – 75-й процентиль) – (25 %; 75 %).

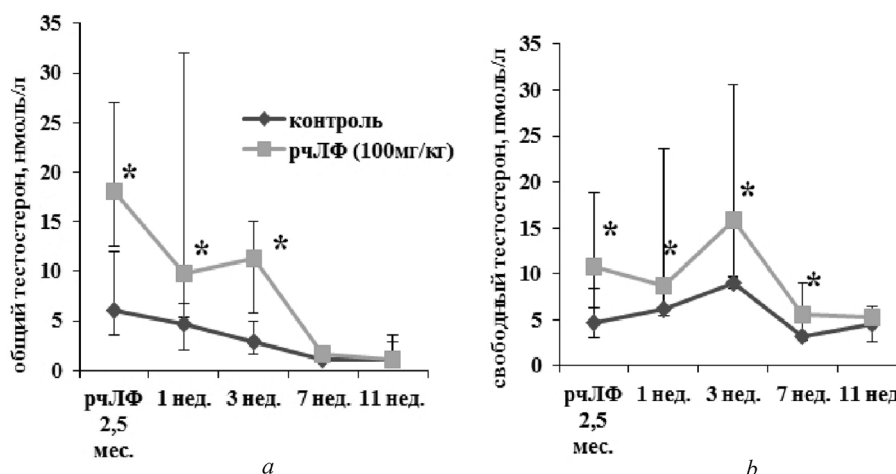


Рис. 1. Уровень общего (a) и свободного тестостерона (b) в сыворотке крови крыс после завершения системного введения рекомбинантного лактоферрина человека в течение 2,5 месяца: * – достоверные отличия от контрольной группы ($p < 0,05$, Me 25 %–75 %, $n = 8–14$); рчЛФ 2,5 мес. – группа, получавшая *per os* рчЛФ (100 мг/кг) на протяжении 2,5 мес., 1 нед., 3 нед., 7 нед., 11 нед. – период после завершения системного введения рчЛФ

Fig. 1. Level of total (a) and free testosterone (b) in the rat blood serum upon completion of a systemic administration of human recombinant lactoferrin during 2.5 months: * – reliable differences from the control group ($p < 0.05$, Me 25 %–75 %, $n = 8–14$); human recombinant lactoferrin during 2.5 months – the group taking *per os* human recombinant lactoferrin (100 mg/kg) during 2.5 months, 1 week, 3 weeks, 7 weeks, 11 weeks – period upon completion of a systemic administration of human recombinant lactoferrin

Для сравнения групп по одному признаку применяли *U*-критерий Манна–Уитни для независимых выборок с использованием пакета программ Statistica 6.0. Достоверным считали уровень значимости $p \leq 0,05$.

Установлено, что при введении *per os* рчЛФ на протяжении 2,5 месяца уровень общего и свободного тестостерона в сыворотке крови крыс достоверно повышался на 200 и 128,8 % соответственно (рис. 1, *a, b*).

После завершения курсового потребления рчЛФ содержание общего тестостерона в сыворотке крови на протяжении трех недель было достоверно увеличено в 2,1 и 4 раза (1-я и 3-я неделя соответственно), а к 7-й неделе – восстанавливалось до уровня контрольных значений. Концентрация свободного тестостерона была также статистически значимо повышена в течение семи недель в 1,4, 1,8 и 1,8 раза (1-я, 3-я и 7-я неделя соответственно).

Уровень прогестерона в сыворотке крови не имел существенных отличий от контрольной группы на всех сроках исследования (табл. 1). Концентрация 17-ОН прогестерона достоверно увеличивалась на 45,6 % (1-я неделя), а на 3-й неделе был отмечен незначительный рост на 17,8 %.

Т а б л и ц а 1. Уровень предшественников тестостерона и эстрадиола в сыворотке крови крыс после завершения системного введения рекомбинантного лактоферрина человека в течение 2,5 месяца

Table 1. Level of testosterone and estradiol precursors in the rat blood serum upon completion of a systemic administration of human recombinant lactoferrin during 2.5 months

Показатель Index	Группа Group	+ЛФ +Lactoferrin	–ЛФ –Lactoferrin			
			1 нед. 1 week	3 нед. 3 weeks	7 нед. 7 weeks	11 нед. 11 weeks
Прогестерон, нмоль/л Progesterone, nmol/l	контроль control	4,00 (3,00; 4,50)	4,05 (3,20; 5,99)	7,38 (4,45; 9,10)	4,05 (2,65; 4,47)	3,10 (2,56; 4,25)
	рчЛФ (100 мг/кг) human recombinant lactoferrin (100 mg/kg)	3,50 (2,60; 4,46)	5,20 (2,90; 8,35)	4,70 (2,97; 12,00)	2,45 (2,13; 3,23)	2,47 (2,28; 2,81)
17-ОН прогестерон, нмоль/л 17-OH progesterone, nmol/l	контроль control	0,47 (0,40; 0,72)	1,49 (1,40; 1,80)	1,87 (1,82; 2,10)	1,21 (0,94; 1,31)	1,18 (0,88; 1,30)
	рчЛФ (100 мг/кг) human recombinant lactoferrin (100 mg/kg)	0,61 (0,50; 0,69)	2,17 (1,97; 2,54)*	2,20 (1,91; 2,83)	1,13 (0,88; 1,27)	0,74 (0,63; 0,95)
Эстрадиол, нмоль/л Estradiol, nmol/l	контроль control	0,22 (0,18; 0,24)	0,22 (0,21; 0,23)	0,25 (0,23; 0,27)	0,21 (0,19; 0,23)	0,22 (0,21; 0,24)
	рчЛФ (100 мг/кг) human recombinant lactoferrin (100 mg/kg)	0,18 (0,15; 0,21)*	0,23 (0,22; 0,25)	0,26 (0,24; 0,28)	0,23 (0,19; 0,24)	0,21 (0,19; 0,24)

П р и м е ч а н и е: * – достоверные отличия от контрольной группы ($p < 0,05$, Me; 25 %–75 %, $n = 9–10$). +ЛФ – группа, получавшая *per os* рчЛФ (100 мг/кг) на протяжении 2,5 месяца; –ЛФ – после завершения системного введения рчЛФ.

N o t e: * – reliable differences from the control group ($p < 0.05$, Me; 25 %–75 %, $n = 9–10$). +Lactoferrin – group taking *per os* human recombinant lactoferrin (100 mg/kg) during 2.5 months; –Lactoferrin – upon completion of a systemic administration of human recombinant lactoferrin.

Пероральное введение рчЛФ в течение 2,5 месяца приводило к достоверному уменьшению концентрации эстрадиола в сыворотке крови крыс на 16,7 %. Отмена потребления лактоферрина привела к восстановлению уровня эстрадиола до контрольных значений.

Анализ результатов по системному влиянию рчЛФ в экспериментальной модели возрастного гипогонадизма крыс-самцов показал, что уровень общего тестостерона в сыворотке крови контрольной группы 2-летних крыс был достоверно ниже через 1 и 2,5 месяца на 88 и 70,9 % соответственно по отношению к 2-месячным особям (рис. 2, *a*).

Содержание общего тестостерона в сыворотке крови 2-летних крыс спустя 1 и 2,5 месяца потребления рчЛФ достоверно возрастало в 3,4 и 5,1 раза по сравнению с контролем «возрастных» особей. Аналогичные изменения происходили и с уровнем свободного тестостерона в сыворотке

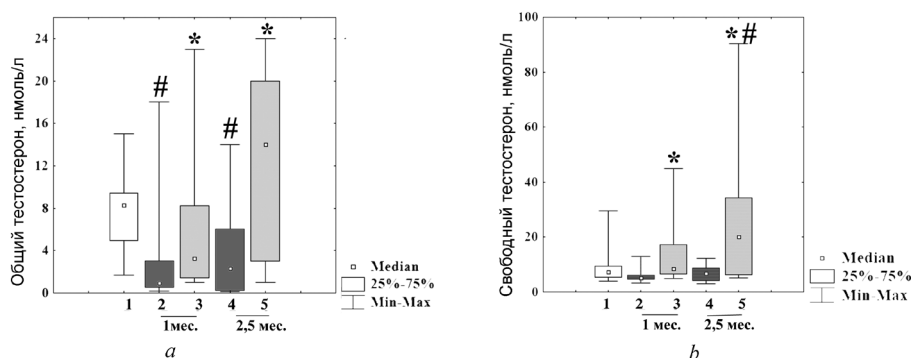


Рис. 2. Уровень общего (а) и свободного тестостерона (b) в сыворотке крови крыс после перорального введения рекомбинантного лактоферрина человека в экспериментальной модели возрастного гипогонадизма: 1 – контрольная группа (2-месячные крысы), 2 и 4 – контрольная группа (2-летние крысы); 3 и 5 – группа (2-летние крысы), получавшие рчЛФ *per os* в концентрации 100 мг/кг на протяжении 1 и 2,5 месяца соответственно; # – достоверные отличия от контрольной группы 2-месячных крыс; * – достоверные отличия от контрольной группы 2-летних крыс ($p < 0,05$, Me 25 %–75 %, $n = 10-14$)

Fig. 2. Level of total (a) and free testosterone (b) in the rat blood serum upon oral administration of human recombinant lactoferrin in the experimental model of age hypogonadism: 1 – control group (2-month rats), 2 and 4 – control group (2-year rats); 3 and 5 – group (2-year rats) taking *per os* human recombinant lactoferrin in a concentration of 100 mg/kg during 1 and 2.5 months, respectively; # – reliable differences from the control group of 2-month rats; * – reliable differences from the control group of 2-year rats ($p < 0.05$, Me 25 %–75 %, $n = 10-14$)

крови. Концентрация анализируемого показателя статистически значимо увеличивалась во всех опытных группах на 61,2 и 119,1 % (3-я и 5-я группы соответственно) по отношению к контрольной группе 2-летних животных, что указывает на возрастающую долю биологически активного андрогена (рис. 2, b). Курсовое кормление рчЛФ на протяжении 2,5 месяца стимулировало значительный рост концентрации свободного тестостерона (на 171,3 %) в сыворотке крови по отношению к молодым особям.

Содержание прогестерона и 17-ОН прогестерона в сыворотке крови 2-летних крыс (4-я группа) значимо снижалось на 60,7 и 21,8 % соответственно по отношению к контрольной группе

Т а б л и ц а 2. Содержание предшественников тестостерона и эстрадиола в сыворотке крови крыс после перорального введения рекомбинантного лактоферрина человека в экспериментальной модели возрастного гипогонадизма

Table 2. Content of the testosterone and estradiol precursors in the rat blood serum upon oral administration of human recombinant lactoferrin in the experimental model of age hypogonadism

Гормон Hormone	Контроль, 2-месячные крысы (1-я группа) Control, 2-month rats (1 st group)	Экспериментальная модель возрастного гипогонадизма (2-летние крысы) Experimental model of age hypogonadism (2-year rats)			
		через 1 месяц in 1 month		через 2,5 месяца in 2.5 months	
		Контроль (2-я группа) Control (2 nd group)	рчЛФ (100 мг/кг) (3-я группа) Human recombinant lactoferrin (100 mg/kg) (3 rd group)	Контроль (4-я группа) Control (4 th group)	рчЛФ (100 мг/кг) (5-я группа) Human recombinant lactoferrin (100 mg/kg) (5 th group)
Прогестерон, (ммоль/л) Progesterone, nmol/l	7,00 (4,45; 8,60)	3,10 (2,90; 3,70)	3,10 (2,40; 3,95) [#]	2,75 (2,55; 3,60) [#]	2,80 (2,60; 3,70) [#]
17-ОН прогестерон, (ммоль/л) 17-OH progesterone, nmol/l	0,63 (0,57; 0,68)	0,65 (0,53; 0,67)	0,61 (0,43; 0,71)	0,49 (0,34; 0,65) [#]	0,55 (0,50; 0,64)
Эстрадиол, (ммоль/л) Estradiol, nmol/l	0,18 (0,17; 0,18)	0,22 (0,18; 0,23) [#]	0,20 (0,19; 0,24) [#]	0,24 (0,21; 0,27) [#]	0,21 (0,18; 0,24) [#]

П р и м е ч а н и е: # – достоверные отличия от контрольной группы 2-месячных крыс ($p < 0,05$, Me 25 %–75 %, $n = 10-14$).

Note: # – the reliable differences from the control group of 2-month rats ($p < 0.05$, Me 25 %–75 %, $n = 10-14$).

2-месячных крыс (табл. 2), что может происходить из-за уменьшения активности или синтеза соответствующих ферментов метаболического пути образования тестостерона (3 β -гидроксистероиддегидрогеназы и 17 α -гидроксилазы соответственно) в клетках Лейдига с возрастом [7].

После курсового потребления рчЛФ 2-летними особями, не было обнаружено существенных изменений содержания прогестерона и 17-ОН прогестерона в сыворотке крови. Концентрация эстрадиола в сыворотке крови значимо возрастала во всех контрольных группах на 24,7 и 36 % (2-я и 4-я группы соответственно) по сравнению с молодыми особями. Указанные изменения, возможно, связаны с возрастным увеличением активности или синтеза ароматазы, которая конвертирует тестостерон в эстрадиол. При анализе уровня эстрадиола в сыворотке крови экспериментальных животных после 1 и 2,5 месяца перорального введения рчЛФ, показано, что данный показатель имел тенденцию к снижению на 9,1 и 14,6 % соответственно по отношению к контрольной группе 2-летних крыс.

Заключение. Показано, что после завершения курсового введения рекомбинантного лактоферрина человека молодым крысам (2 мес.) уровень тестостерона оставался повышенным ($p < 0,05$) в течение семи недель, постепенно возвращаясь до значений контрольной группы без угнетения эндогенного биосинтеза. При этом наблюдалось восстановление уровня эстрадиола в сыворотке крови до контрольных показателей уже на первой неделе.

В модели возрастного гипогонадизма системное введение *per os* рекомбинантного лактоферрина человека экспериментальным животным оказывало значительное стимулирующее действие на биосинтез тестостерона у 2-летних особей, нормализуя его уровень до физиологических значений молодых крыс.

Таким образом, впервые показана возможность нормализации рекомбинантным лактоферрином человека гормональных изменений, связанных с возрастным андрогенным дефицитом. Это является принципиальным отличием от существующих препаратов для коррекции данной патологии на основе андрогенов (как натуральных, так и синтетических), после приема которых происходит подавление синтеза эндогенного тестостерона.

Зарегистрированные эффекты изучаемого трансферрина являются основанием для проведения дальнейших экспериментальных исследований с целью выяснения механизмов действия лактоферрина, его возможного использования не только для коррекции андрогенного дефицита при возрастном гипогонадизме, но и при других патологиях, связанных с нарушением стероидогенеза.

Список использованных источников

1. Effects of long-term androgen replacement therapy on the physical and mental statuses of aging males with late-onset hypogonadism: a multicenter randomized controlled trial in Japan (EARTH Study) / H. Konaka [et al.] // *Asian J. Androl.* – 2016. – Vol. 18, N 1. – P. 25–34. doi.org/10.4103/1008-682x.148720.
2. Selective androgen receptor modulators for the treatment of late onset male hypogonadism / C. C. Coss [et al.] // *Asian J. Androl.* – 2014. – Vol. 16, N 2. – P. 256–261. doi.org/10.4103/1008-682x.122339.
3. Получение рекомбинантного лактоферрина человека из молока коз-производителей и его физиологические эффекты / В. С. Лукашевич [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2016. – Т. 60, № 1. – С. 72–81.
4. Lactoferrin from Milk: Nutraceutical and Pharmacological Properties / F. Giansanti [et al.] // *Pharmaceuticals.* – 2016. – Vol. 9, N 4. – P. 61. doi.org/10.3390/ph9040061.
5. Рудниченко, Ю. А. Влияние человеческого лактоферрина на уровень тестостерона в гипоталамо-гипофизарно-гонадной системе крыс / Ю. А. Рудниченко // Весті НАН Беларусі. Сер. мед. навук. – 2015. – № 2. – С. 102–104.
6. Rat's age versus human's age: what is the relationship? / N. A. Andreollo [et al.] // *Arq. Bras. Cir. Dig.* – 2012. – Vol. 25, N 1. – P. 49–51. doi.org/10.1590/s0102-67202012000100011.
7. Chen, H. Leydig cells: From stem cells to aging / H. Chen, R. S. Ge, B. R. Zirkin // *Mol. Cell. Endocrinol.* – 2009. – Vol. 306, N 1–2. – P. 9–16. doi.org/10.1016/j.mce.2009.01.023.

References

1. Konaka H., Sugimoto K., Orikasa H., Iwamoto T., Takamura T., Takeda Y., Shigehara K., Iijima M., Koh E., Namiaki M. Effects of long-term androgen replacement therapy on the physical and mental statuses of aging males with late-onset hypogonadism: a multicenter randomized controlled trial in Japan (EARTH Study). *Asian Journal of Andrology*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 25–34. doi.org/10.4103/1008-682x.148720.

2. Coss C. C., Jones A., Hancock M. L., Steiner M. S., Dalton J. T. Selective androgen receptor modulators for the treatment of late onset male hypogonadism. *Asian Journal of Andrology*, 2014, vol. 16, no. 2, pp. 256–261. doi.org/10.4103/1008-682x.122339.

3. Lukashevich V. S., Budevich A. I., Semak I. V., Kuznetsova V. N., Malyushkova E. V., Pyzh A. E., Novakovskaya S. A., Rudnichenko Yu. A., Popkov N. A., Ivashkevich O. A., Zalutsky I. V. Production of recombinant human lactoferrin from the milk of goat-producers and its physiological effects. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2016, vol. 60, no. 1, pp. 72–81 (in Russian).

4. Giansanti F., Panella G., Leboffe L., Antonini G. Lactoferrin from Milk: Nutraceutical and Pharmacological Properties. *Pharmaceuticals*, 2016, vol. 9, no. 4, pp. 61. doi.org/10.3390/ph9040061.

5. Rudnichenko Ju. Impact of human lactoferrin on the testosterone level in the hypothalamic-pituitary-gonadal axis rats. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seryia medytsynskikh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, medical series], 2015, no. 2, pp. 102–104 (in Russian).

6. Andreollo N. A., dos Santos E. F., Araújo M. R., Lopes L. R. Rat's age versus human's age: what is the relationship? *Arquivos Brasileiros de Cirurgia Digestiva*, 2012, vol. 25, no. 1, pp. 49–51. doi.org/10.1590/s0102-67202012000100011.

7. Chen H., Ge R. S., Zirkin B. R. Leydig cells: From stem cells to aging. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 2009, vol. 306, no. 1–2, pp. 9–16. doi.org/10.1016/j.mce.2009.01.023.

Информация об авторах

Рудниченко Юлия Анатольевна – мл. науч. сотрудник, Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: link060619@list.ru.

Лукашевич Владимир Сергеевич – ст. науч. сотрудник, Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lukashvs@rambler.ru.

Залуцкий Иосиф Викторович – член-корреспондент, д-р мед. наук, профессор, директор, Институт физиологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 28, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: IZalutsky@gmail.com.

Для цитирования

Рудниченко, Ю. А. Влияние рекомбинантного лактоферрина человека на уровень половых гормонов у самцов крыс разного возраста / Ю. А. Рудниченко, В. С. Лукашевич, И. В. Залуцкий // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 58–63.

Information about the authors

Rudnichenko Julia Anatolievna – Junior researcher, Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: link060619@list.ru.

Lukashevich Vladimir Sergeevich – Senior researcher, Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lukashvs@rambler.ru.

Zalutsky Iosiph Victorovich – Corresponding Member, D. Sc. (Medicine), Professor, Director, Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: IZalutsky@gmail.com.

For citation

Rudnichenko Ju. A., Lukashevich U. S., Zalutsky I. V. Influence of human recombinant lactoferrin on the level of sex hormones in male rats of different age. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 58–63 (in Russian).

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCES

УДК 517.518.8:519.633:536.2

Поступило в редакцию 21.09.2015

Received 21.09.2015

В. А. Кот*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**МЕТОД ВЗВЕШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ФУНКЦИИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ
НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

(Представлено членом-корреспондентом Н. В. Павлукевичем)

Предложен приближенный интегральный метод решения краевых задач нестационарной теплопроводности, основанный на построении интегральных тождественных равенств относительно взвешенной температурной функции. Метод обладает простотой и, в отличие от других приближенных методов, позволяет получать решения с более высокой точностью.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, весовая функция, приближенный метод, интегральные тождества, собственные значения, фронт возмущения.

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

**WEIGHTED TEMPERATURE FUNCTION METHOD FOR SOLUTION OF UNSTEADY-STATE HEAT
CONDUCTION PROBLEMS**

(Communicated by Corresponding Member N. V. Pavlukevich)

An approximate integral method based on constructing integral identical equalities for the weighted temperature function is proposed for solution of unsteady-state heat conduction boundary-value problems. This method is simple in use and allows one to obtain much more exact solutions as compared to the known approximate methods.

Keywords: heat conduction equation, weight function, approximate method, integral identities, eigenvalues, front of a disturbance.

Введение. Для практических приложений при решении краевых задач наибольший интерес представляют приближенные аналитические методы, позволяющие находить простые по форме решения в пределах допустимой точности [1; 2]. Среди них особое место занимают ортогональные методы взвешенных невязок [3; 4]. В зависимости от выбора весовых функций могут быть получены схемы, отвечающие методам моментов, коллокаций, Галеркина, наименьших квадратов и др. Такие аппроксимационные решения, как правило, содержат неизвестные коэффициенты, определяемые из приближенного решения дифференциального уравнения.

В аналитической теории теплопроводности методы, опирающиеся на понятие фронта температурного возмущения, характеризуются широким спектром подходов (см., напр., [5–9]). Основным недостатком интегральных методов является относительно низкая точность. Получаемые решения, как правило, затрагивают лишь наиболее простые случаи: медленно и монотонно изменяющееся во времени внешнее воздействие, отсутствие нелинейностей и т. д. В настоящей работе представлен приближенный метод взвешенной температурной функции (МВТФ), в основе которого лежат системы уравнений для взвешенной температурной функции, содержащие

значение температурной функции $T(x, t)$ либо ее производной по пространственной координате в одной из граничных точек рассматриваемой области [10]. В приложении к полуограниченному пространству в качестве искомой функции выступает так называемый фронт температурного возмущения.

Постановка и решение задачи для конечномерной области. Представим МВТФ на примере рассмотрения задачи теплопроводности для протяженной пластины с переменным вдоль оси x коэффициентом теплопроводности в следующей математической постановке (в безразмерной форме согласно обозначениям работы [10]):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(x) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad 0 < x < 1, \quad t > 0, \quad (1)$$

$$T(0, t) = \gamma(t), \quad \frac{\partial T(1, t)}{\partial x} = 0, \quad t > 0, \quad (2)$$

$$T(x, 0) = 0. \quad (3)$$

В операторной форме уравнение (1) принимает вид

$$D_t T = LT, \quad (4)$$

где $D_t \equiv \partial / \partial t$, $L \equiv \frac{\partial}{\partial x} \left(k(x) \frac{\partial}{\partial x} \right)$ – дифференциальный оператор, подчиняющийся формуле Грина

$$(Lu, v) - (u, Lv) = \left[k(x) \left(v \frac{du}{dx} - u \frac{dv}{dx} \right) \right]_0^1, \quad (5)$$

где (u, v) – скалярное произведение на отрезке $[0, 1]$ функций $u = u(x)$ и $v = v(x)$.

Введем в рассмотрение последовательность интегральных линейных операторов

$$\mathcal{L}_n(T) \equiv (T, \mathcal{K}_n) = \int_0^1 T \mathcal{K}_n dx, \quad n \in \mathbb{Z}_+,$$

где $\mathcal{K}_n = \mathcal{K}_n(x)$ – весовые функции. Применив оператор \mathcal{L}_n к правой части уравнения (4), воспользовавшись (5), получим

$$\mathcal{L}_n(LT) \equiv (LT, \mathcal{K}_n) = (T, L\mathcal{K}_n) + P_n, \quad (6)$$

$$P_n = k(0) \frac{d\mathcal{K}_n(0)}{dx} \gamma(t) - k(0) \mathcal{K}_n(0) \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} - k(1) T(1, t) \frac{d\mathcal{K}_n(1)}{dx}. \quad (7)$$

Для исключения в функции P_n производной $\frac{\partial T(0, t)}{\partial x}$ либо члена $T(1, t)$ необходимо, соответственно, положить $\mathcal{K}_n(0) = 0 \vee \frac{d\mathcal{K}_n(1)}{dx} = 0$. В случае принятия $\mathcal{K}_n(0) = 0$ мы имеем лишь одну неизвестную температуру в граничной точке $x = 1$ (так называемую граничную функцию): $\varphi(t) = T(1, 0)$.

Применив далее оператор \mathcal{L}_n к левой части уравнения (4), с учетом теоремы Лейбница имеем

$$\mathcal{L}_n \dot{T} = (\dot{T}, \mathcal{K}_n) = (T, \mathcal{K}_n)_t = (\mathcal{L}_x^n T)_t. \quad (8)$$

В итоге, объединив на основе (4) соотношения (6)–(8), получим уравнение

$$(\mathcal{L}_n T)_t = (T, L\mathcal{K}_n) + k(0) \frac{d\mathcal{K}_n(0)}{dx} \gamma(t) - k(1) \frac{d\mathcal{K}_n(1)}{dx} \varphi(t). \quad (9)$$

Чтобы освободиться в (9) от операций дифференцирования (при $n = 1$), положим

$$L\mathcal{K}_1 \equiv \frac{\partial}{\partial x} \left(k(x) \frac{\partial \mathcal{K}_1}{\partial x} \right) = 0 \quad (10)$$

при начальном условии $\mathcal{K}_1(0) = 0$, либо альтернативном условии $\frac{d\mathcal{K}_1(0)}{dx} = \frac{1}{\lambda(0)}$ (здесь отметим, что второе из записанных условий может быть иным, что не является принципиальным). Интегрирование (10) при $\mathcal{K}_1(0) = 0$ дает следующее решение: $\mathcal{K}_1(x) = \int_0^x \frac{dx}{k(x)}$. Тогда вместо (9) приходим к новому уравнению $(\mathcal{L}_1 T)_t = \gamma(t) - \varphi(t)$. Его интегрирование с начальным условием (3) приводит к интегральному тождественному равенству

$$\mathcal{L}_1 T \equiv Y_1(t) - \mathcal{F}_1(t), \quad (11)$$

где $Y_1(t) = \int_0^t \gamma(t) dt$, $\mathcal{F}_1(t) = \int_0^t \varphi(t) dt$. Ядра \mathcal{K}_{n+1} ($n = 1, 2, \dots$) определим из рекуррентного соотношения $\mathcal{K}_{n+1} = \mathcal{K}_n$ с начальным условием $\mathcal{K}_{n+1}(0) = \frac{d\mathcal{K}_{n+1}(0)}{dx} = 0$. Отсюда находим

$$\mathcal{K}_{n+1} = \int_0^x \frac{dx}{k(x)} \int_0^x \mathcal{K}_n dx, \quad n \in \mathbb{Z}_+. \quad (12)$$

В соответствии с (9) запишем уравнение $(n+1)$ -го порядка

$$(\mathcal{L}_{n+1} T)_t = (T, L\mathcal{K}_{n+1}) - k(1) \frac{d\mathcal{K}_{n+1}(1)}{dx} \varphi(t) = (T, \mathcal{K}_n) - \varphi(t) \int_0^1 \mathcal{K}_{n+1} dx = \mathcal{L}_n T - \sigma_{n+1} \varphi(t), \quad (13)$$

где $\sigma_{n+1} = \int_0^1 \mathcal{K}_{n+1} dx$. Из (11)–(13) приходим к последовательности из уравнений

$$\left\{ (\mathcal{L}_n T)_t \equiv Y_{n-1}(t) - \sum_{i=1}^n \sigma_i \mathcal{F}_{n-i}(t) \right\}_n, \quad n \in \mathbb{Z}_+, \quad (14)$$

где $Y_0(t) = \gamma(t)$, $\mathcal{F}_0(t) = \varphi(t)$, $\sigma_1 = 1$.

Введем в рассмотрение *интегральные характеристики* $Y_n(t)$ и $\mathcal{F}_n(t)$, определяемые соответственно как

$$Y_n(t) = \underbrace{\int_0^t dt \dots \int_0^t}_{n} \gamma(t) dt, \quad \mathcal{F}_n(t) = \underbrace{\int_0^t dt \dots \int_0^t}_{n} \varphi(t) dt, \quad n \in \mathbb{Z}_+.$$

Интегрирование уравнений последовательности (14) с начальным условием (3) дает окончательно новую последовательность из тождественных равенств в виде

$$\left\{ \mathcal{L}_n T \equiv Y_n(t) - \sum_{i=1}^n \sigma_i \mathcal{F}_{n+1-i}(t) \right\}_n, \quad n \in \mathbb{Z}_+. \quad (15)$$

Если приближенное решение задачи (1)–(3) представить степенным полиномом

$$T(x, t) = \gamma(t) + \sum_{j=1}^N a_j(t) x^j,$$

то, с учетом граничного условия (2) и условия для граничной функции $T(1, t) = \varphi(t)$, мы приходим к следующей системе уравнений:

$$\sum_i^N a_i(t) = \varphi(t) - \gamma(t), \quad \sum_i^N i a_i(t) = 0, \quad \left\{ \mathcal{L}_n T \equiv Y_n(t) - \sum_{i=1}^n \sigma_i \mathcal{F}_{n+1-i}(t) \right\}_n, \quad n = \overline{1, N-2}. \quad (16)$$

Решение системы (16) дает полиномиальные коэффициенты $a_j(t)$, $j = \overline{1, N}$, которые содержат граничную функцию $\varphi(t)$, а также граничные характеристики $Y_n(t)$ и $\mathcal{F}_n(t)$, $n = \overline{1, N-2}$. Для определения $\varphi(t)$ можно воспользоваться интегралом теплового баланса

$$\frac{d}{dt} \int_0^1 T(x, t) dx = -k(0) \frac{\partial T(0, t)}{\partial x}, \quad (17)$$

что приводит к обыкновенному дифференциальному уравнению

$$\gamma'(t) + \sum_{i=1}^N \frac{a_i'(t)}{i+1} + k(0) a_1(t) = 0. \quad (18)$$

В результате подстановки в (18) найденных коэффициентов $a_j(t)$ ($j = \overline{1, N}$) приходим к определяющему уравнению (записано в общем виде)

$$\sum_{i=0}^{N-1} (p_{i-1} \mathcal{F}_{i-1}(t) - q_{i-1} \Upsilon_{i-1}(t)) = 0, \quad (19)$$

где $\Upsilon_{-1}(t) = \gamma'(t)$; p_{i-1} и q_{i-1} – коэффициенты (с целью сокращения представленного материала коэффициенты не приводятся), $p_{-1} = 1$.

Отметим, что определяющее уравнение для граничной функции $\varphi(t)$ можно также получить из интегрального тождественного равенства (15) $(N-1)$ -го порядка, которое имеет вид

$$\int_0^1 T(x, t) \mathcal{K}_{N-1} dx = \Upsilon_{N-1}(t) - \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_i \mathcal{F}_{N-i}(t).$$

В таком случае, подстановка в (19) полиномиальных коэффициентов $a_j(t)$ ($j = \overline{1, N}$) приводит к следующему интегральному уравнению относительно граничной функции $\varphi(t)$:

$$\sum_{i=0}^{N-1} (v_i \mathcal{F}_i(t) - \omega_i \Upsilon_i(t)) = 0, \quad (20)$$

где v_i и ω_i – коэффициенты (с целью сокращения представленного материала данные коэффициенты не приводятся), $v_0 = 1$.

Далее, продифференцировав одно из уравнений (19) либо (20) соответственно, $(N-2)$ -кратно либо $(N-1)$ -кратно, мы приходим к одному из следующих обыкновенных дифференциальных уравнений $(N-1)$ -го порядка:

$$\varphi^{(N-1)}(t) + p_1 \varphi^{(N-2)}(t) + p_2 \varphi^{(N-3)}(t) + \dots + p_{N-1} \varphi(t) = \sum_{i=0}^{N-1} q_i \gamma^{(N-1-i)}(t), \quad (21)$$

$$\varphi^{(N-1)}(t) + v_1 \varphi^{(N-2)}(t) + v_2 \varphi^{(N-3)}(t) + \dots + v_{N-1} \varphi(t) = \sum_{i=0}^{N-1} v_i \gamma^{(N-1-i)}(t). \quad (22)$$

Начальные условия для уравнений (21) и (22) вытекают, соответственно, из интегральных уравнений (19) и (20), а также из очевидных тождеств

$$\underbrace{\int_0^t dt \dots \int_0^t \varphi(t) dt}_{n} \Big|_{t=0} \equiv 0, \quad \underbrace{\int_0^t dt \dots \int_0^t \gamma(t) dt}_{n} \Big|_{t=0} \equiv 0, \quad n \in \mathbb{Z}_+. \quad (23)$$

Поскольку полученные уравнения (21) и (22) по структуре друг другу идентичны и отличаются лишь коэффициентами, представляется целесообразным ограничиться рассмотрением процесса получения необходимых начальных условий лишь для одного из данных уравнений, например, уравнения (21). При $t = 0$ уравнение (19), с учетом (23) и условия $\varphi(0) = 0$, принимает вид

$$p_{-1} \varphi'(0) = q_{-1} \gamma'(0) + q_0 \gamma(0).$$

Далее продифференцируем (19), что дает уравнение

$$\sum_{i=0}^{N-1} (p_{i-1} \mathcal{F}_{i-2}(t) - q_{i-1} \Upsilon_{i-2}(t)) = 0. \quad (24)$$

Здесь $\mathcal{F}_{-2}(t) = \varphi''(t)$, $\Upsilon_{-2}(t) = \gamma''(t)$. При $t = 0$ из (24), с учетом (23) и условия $\varphi(0) = 0$, имеем

$$p_{-1}\varphi''(t) + \varphi'(t) = q_{-1}\gamma''(0) + q_0\gamma'(0) + q_1\gamma(0).$$

Продолжив последовательное дифференцирование уравнения (19), приходим к системе из $(N-3)$ -линейных алгебраических уравнений

$$\left\{ \sum_{i=0}^n (p_{n-i-1}\varphi^{(i)}(0) - q_{n-i-1}\gamma^{(i)}(0)) = 0 \right\}_n, \quad n = \overline{1, N-3}. \quad (25)$$

Решение системы (25) дает искомые начальные значения $\varphi^{(i)}(0)$ ($i = \overline{1, N-3}$). В таком случае, дифференциальное уравнение (21) и найденные начальные условия $\varphi^{(i)}(0)$ ($i = \overline{0, N-3}$) представляют задачу Коши относительно функции $\varphi(t) = T(1, t)$.

Укажем на другой возможный (альтернативный) вариант решения уравнения (21), что связано с введением в рассмотрение новой функции $S(t) = \mathcal{F}_{N-2}(t)$. Для нее запишем очевидные тождества

$$\mathcal{F}_{N-2-i}(t) \equiv S^{(i)}(t), \quad i = \overline{0, N-1},$$

которые дают возможность перевести интегральное уравнение (19) в обыкновенное дифференциальное уравнение с функцией $S(t)$:

$$\sum_{i=0}^{N-1} (p_{i-1}S^{(N-1-i)}(t) - q_{i-1}\Upsilon_{i-1}(t)) = 0. \quad (26)$$

Учитывая нулевые условия (23), для уравнения (26) имеем начальные условия:

$$S(0) = S'(0) = S''(0) = S^{(3)}(0) = \dots = S^{(N-2)}(0) = 0. \quad (27)$$

Решение задачи (26), (27) дает функцию $S(t)$. Учитывая, что $S(t) = \mathcal{F}_{N-2}(t)$, определение искомой граничной функции $\varphi(t)$ предполагает $(N-2)$ -кратное дифференцирование $S(t)$, т. е. $\varphi(t) = D_t^{N-2}S(t)$.

В виде иллюстративного примера рассмотрим важный случай $\lambda = k(x) = \exp(-mx)$ при $T(0, t) = 1$. Температурную функцию $T(x, t)$ представим полиномом шестой степени

$$T(x, t) = 1 + \sum_{j=1}^6 a_j(t) x^j.$$

Из граничного условия (2) и условия $T(1, t) = \varphi(t)$ следуют два уравнения:

$$\sum_{j=1}^5 j a_j = 0, \quad \sum_{j=1}^5 a_j = \varphi(t) - 1.$$

Для замыкания системы получим оставшиеся четыре уравнения, воспользовавшись тождественными равенствами (15) для $n = \overline{1, 4}$. Из (12) находим весовые функции ($m = 1$):

$$\begin{aligned} \mathcal{K}_1(x) &= \exp(x) - 1, \quad \mathcal{K}_2(x) = (\operatorname{sh} x - x) \exp x, \\ \mathcal{K}_3(x) &= \frac{\exp(x)}{12} (\exp(x)(\exp(x) - 6x + 9) - 6x - 9) - \frac{1}{12}, \\ \mathcal{K}_4(x) &= \frac{\exp(2x)}{72} (28 \operatorname{sh} x + \operatorname{sh} 2x - 6x(2 \operatorname{ch} x + 3)). \end{aligned}$$

Опустив выкладки по определению коэффициентов $a_j(t)$ ($j = \overline{1, 6}$) и применив вытекающее из (17) уравнение $\sum_{i=1}^N \frac{a_i'(t)}{i+1} + a_1(t) = 0$, приведем в окончательном виде определяющее уравнение

$$1,0543 \cdot 10^{-6} \varphi'(t) + 4,7258 \cdot 10^{-4} \varphi(t) + 0,05 \mathcal{F}_1(t) + 1,6625 \mathcal{F}_2(t) + 16,2742 \mathcal{F}_3(t) + 24 \mathcal{F}_4(t) = 3,6026 \cdot 10^{-6} - 3,2117 \cdot 10^{-4} t + 0,01049 t^2 - 0,16076 t^3 + t^4. \quad (28)$$

Решение (28) дает искомую граничную функцию

$$\varphi(t) = 1 - 1,3382 e^{-1,7821t} + 0,530 e^{-13,538t} - 0,27557 e^{-35,578t} + 0,107585 e^{-84,876t} - 0,02413 e^{-312,467t}.$$

На рис. 1 представлены графики изменения температуры по сечению неоднородной пластины, рассчитанные на основе МВТФ, а также численным методом. Ошибка аппроксимационного решения по сравнению с численным методом составляет сотые доли процента. Последующие приближения ($N > 6$) дают практически точное решение.

Постановка и решение задачи для полуограниченного пространства. Запишем задачу в следующей математической постановке (в безразмерной форме согласно [10; 11]):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(x) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (29)$$

$$(i): T(0, t) = \gamma_I(t); \quad (ii): -k(0) \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = \gamma_{II}(t); \quad (iii): T(0, t) - \text{Bi}^{-1} \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = \gamma_{III}(t), \quad (30)$$

$$T(\infty, t) = 0, \quad T(x, 0) = 0. \quad (31)$$

Граничные условия (30)–(i), (30)–(ii) и (30)–(iii) отвечают, соответственно, граничным условиям Дирихле, Неймана либо описывают теплообмен по закону Ньютона.

Введем в рассмотрение фронт температурного возмущения $\delta(x)$ с условиями

$$T(\delta(t), t) = \frac{\partial T(\delta(t), t)}{\partial x} = 0.$$

Введем также в рассмотрение последовательность из интегральных линейных операторов

$$\mathcal{L}_n(T) \equiv (T, \mathcal{K}_n) = \int_0^{\delta(t)} T \mathcal{K}_n dx, \quad n \in \mathbb{Z}_+, \quad (32)$$

где $\mathcal{K}_n = \mathcal{K}_n(x)$ – весовые функции. Применив оператор \mathcal{L}_n к уравнению (4) (операторная форма уравнения (32)), получим для его правой части

$$\mathcal{L}_n(LT) \equiv (LT, \mathcal{K}_n) = (T, L\mathcal{K}_n) + k(0) \frac{d\mathcal{K}_n(0)}{dx} T(0, t) - k(0) \mathcal{K}_n(0) \frac{\partial T(0, t)}{\partial x}. \quad (33)$$

Применив оператор \mathcal{L}_n к левой части уравнения (4), с учетом теоремы Лейбница имеем

$$\mathcal{L}_n \dot{T} = (\dot{T}, \mathcal{K}_n) = (T, \mathcal{K}_n)_t - \mathcal{K}_n(\delta(t)) T(\delta(t), t) \delta'(t) = (\mathcal{L}_n T)_t.$$

Отсюда приходим к уравнению

$$(\mathcal{L}_n T)_t = (T, L\mathcal{K}_n) + k(0) \frac{d\mathcal{K}_n(0)}{dx} T(0, t) - k(0) \mathcal{K}_n(0) \frac{\partial T(0, t)}{\partial x}. \quad (34)$$

Условие Дирихле. Если исходить из условия (30)–(i), то тогда уравнение (34) со-

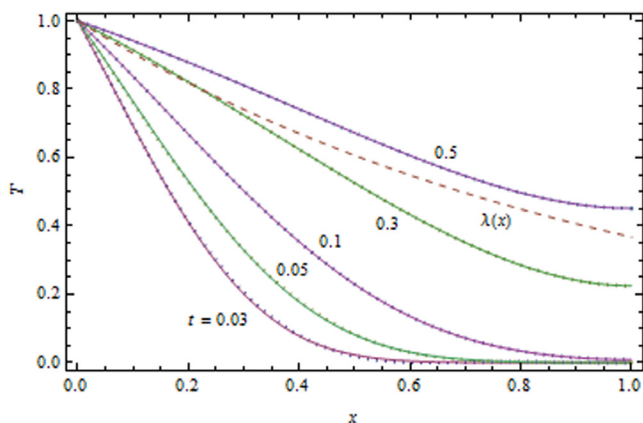


Рис. 1. Температурные профили в пластине при $\lambda(x) = \exp(-x)$, полученные на основе точного (численного) решения (сплошные линии) и на основе МВТФ (пунктирные линии)

Fig. 1. Temperature distributions over the plate at $\lambda(x) = \exp(-x)$, obtained from the exact (numerical) solution (solid lines) and from the solution based on WTFM (dotted lines)

держит неизвестную производную $\frac{\partial T(0, t)}{\partial x}$. Для ее исключения потребуем (в дальнейшем верхние индексы (I), (II) и (III) обозначают, соответственно, граничные условия Дирихле, Неймана и Ньютона)

$$\mathcal{K}_n^{(I)}(0) = 0, \quad n \in \mathbb{Z}_+. \quad (35)$$

Освободиться в (34) от операций дифференцирования (при $n = 1$) позволяет уравнение

$$L\mathcal{K}_1^{(I)} \equiv \frac{d}{dx} \left(k(x) \frac{d\mathcal{K}_1^{(I)}}{dx} \right) = 0 \quad (36)$$

с начальными условиями

$$\mathcal{K}_1^{(I)}(0) = 0, \quad \frac{d\mathcal{K}_1^{(I)}(0)}{dx} = \frac{1}{\lambda(0)}. \quad (37)$$

Решение (36), (37) дает весовую функцию $\mathcal{K}_1^{(I)}(x) = \int_0^x \frac{dx}{k(x)}$. Отсюда вместо (34) запишем уравнение $(\mathcal{L}_1^{(I)} T)_t = \gamma_1(t)$, интегрирование которого дает тождественное равенство

$$\mathcal{L}_1^{(I)} T \equiv \Upsilon_1^{(I)}(t) = \int_0^t \gamma_1(t) dt. \quad (38)$$

Весовые функции $\mathcal{K}_{n+1}^{(I)}$ определим с помощью рекуррентного соотношения $\mathcal{K}_{n+1} = \mathcal{K}_n$ с однородным начальным условием $\mathcal{K}_{n+1}^{(I)}(0) = \frac{d\mathcal{K}_{n+1}^{(I)}(0)}{dx} = 0$. Тогда находим

$$\mathcal{K}_{n+1}^{(I)} = \int_0^x \frac{dx}{k(x)} \int_0^x \mathcal{K}_n^{(I)} dx, \quad n \in \mathbb{Z}_+,$$

откуда вытекает последовательность

$$\mathcal{K}_1^{(I)} = \int_0^x \frac{dx}{k(x)}, \quad \mathcal{K}_2^{(I)} = \int_0^x \frac{dx}{k(x)} \int_0^x \frac{dx}{k(x)}, \quad \mathcal{K}_3^{(I)} = \int_0^x \frac{dx}{k(x)} \int_0^x \int_0^x \frac{dx}{k(x)} \int_0^x \frac{dx}{k(x)}, \dots$$

Тогда для уравнений (34) $(n+1)$ -го порядка получим

$$(\mathcal{L}_{n+1}^{(I)} T)_t = (T, L\mathcal{K}_{n+1}^{(I)}) = (T, \mathcal{K}_n^{(I)}) = \mathcal{L}_n^{(I)} T. \quad (39)$$

Из (38) и (39) приходим к последовательности

$$\left\{ (\mathcal{L}_n^{(I)} T)_t \equiv \Upsilon_{n-1}^{(I)}(t) \right\}_n, \quad n \in \mathbb{Z}_+, \quad (40)$$

где $\Upsilon_0^{(I)}(t) = \gamma(t)$, $\Upsilon_n^{(I)}(t) = \int_0^t dt \dots \int_0^t \gamma_1(t) dt$. Интегрирование уравнений последовательности (40)

с учетом (31) дает окончательно

$$\left\{ \mathcal{L}_n^{(I)} T \equiv \Upsilon_n^{(I)}(t) \right\}_n, \quad n \in \mathbb{Z}_+.$$

Условие Неймана. Для граничного условия (30)–(ii) проинтегрируем уравнение (29) в пределах $x = [0, \delta(t)]$:

$$\int_0^{\delta(t)} \frac{\partial T}{\partial t} dx = \frac{d}{dt} \int_0^{\delta(t)} T dx = -k(0) \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = \gamma_{II}(t). \quad (41)$$

Интегрирование (41) приводит к тождественному равенству

$$\int_0^{\delta(t)} T dx = \int_0^{\delta(t)} T \mathcal{K}_1^{(I)} dx = Y_1^{(I)}(t),$$

где $\mathcal{K}_1 = 1$. Применив рекуррентное соотношение $\mathcal{K}_{n+1}^{(II)} = \mathcal{K}_n^{(II)}$ с условиями $\mathcal{K}_{n+1}^{(II)}(0) = \frac{d\mathcal{K}_{n+1}^{(II)}(0)}{dx} = 0$, определим весовые функции

$$\mathcal{K}_1^{(II)} = 1, \quad \mathcal{K}_2^{(II)} = \int_0^x \frac{x}{k(x)} dx, \quad \mathcal{K}_3^{(II)} = \int_0^x \frac{dx}{k(x)} \int_0^x \frac{x}{k(x)} dx, \dots,$$

сводящие дифференциальное уравнение (29) к последовательности из тождественных равенств

$$\left\{ \mathcal{L}_n^{(II)} T \equiv Y_n^{(II)}(t) = \underbrace{\int_0^t dt \dots \int_0^t}_{n} \gamma_{II}(t) dt \right\}_n, \quad n \in \mathbb{Z}_+.$$

Теплообмен по закону Ньютона. При теплообмене согласно граничному условию (30)–(iii) для определения весовой функции $\mathcal{K}_1^{(III)}$ положим в (33)

$$k(0) \frac{d\mathcal{K}_n(0)}{dx} T(0, t) - k(0) \mathcal{K}_n(0) \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = \gamma_{III}(t). \tag{42}$$

Сопоставив (42) и (30)–(iii), приходим к следующим соотношениям:

$$\mathcal{K}_1^{(III)}(0) = \frac{1}{\text{Bi} \lambda(0)}, \quad \frac{d\mathcal{K}_1^{(III)}(0)}{dx} = \frac{1}{\lambda(0)}. \tag{43}$$

Решение дифференциального уравнения $L\mathcal{K}_1^{(III)} = 0$ с начальными условиями (43) дает функцию

$$\mathcal{K}_1^{(III)} = \int_0^x \frac{dx}{k(x)} + \frac{1}{\text{Bi} \lambda(0)}. \tag{44}$$

С учетом (42)–(44) уравнение (34) принимает вид

$$\mathcal{L}_1^{(III)} T = Y_1^{(III)}(t). \tag{45}$$

Проинтегрировав уравнение (45), получим

$$\mathcal{L}_1^{(III)} T = Y_1^{(III)}(t).$$

Нахождение весовых функций $\mathcal{K}_{n+1}^{(III)}$ ($n = 1, 2, \dots$) аналогично: посредством уравнения $\mathcal{K}_{n+1}^{(III)} = \mathcal{K}_n^{(III)}$ с однородными начальными условиями $\mathcal{K}_{n+1}^{(III)}(0) = \frac{d\mathcal{K}_{n+1}^{(III)}(0)}{dx} = 0$. Отсюда, в частности, получаем

$$\mathcal{K}_2^{(III)} = \int_0^x \left(\int_0^x dx \int_0^x \frac{dx}{k(x)} + \frac{x}{\text{Bi} k(0)} \right) \frac{dx}{k(x)}. \text{ В итоге приходим к последовательности}$$

$$\mathcal{L}_n^{(III)} T \equiv Y_n^{(III)}(t) = \underbrace{\int_0^t dt \dots \int_0^t}_{n} \gamma_{III}(t) dt, \quad n \in \mathbb{Z}_+. \tag{46}$$

В виде иллюстративного примера рассмотрим краевую задачу при $T(0, t) = 1$ и $\lambda = k(x) = (1 + 5x)^{-1}$. Температурный профиль представим полиномом

$$T(x, t) = 1 + \sum_{j=1}^6 a_j(t) \frac{x^j}{\delta(t)^j}.$$

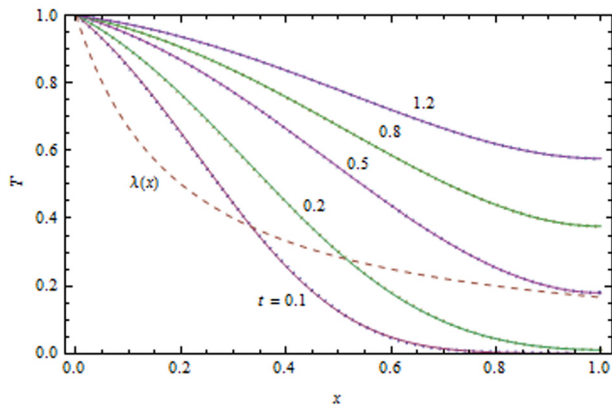


Рис. 2. Температурные профили в полуограниченном пространстве при $\lambda(x) = (1+5x)^{-1}$: сплошные линии – численное решение, пунктирные – решение на основе МВТФ ($N = 6$)

Fig. 2. Temperature distributions in the semi-bounded space at $\lambda(x) = (1+5x)^{-1}$: solid lines – numerical solution, dotted lines – solution based on WTFFM ($N = 6$)

Из условий на фронте возмущения (35) имеем два уравнения: $\sum_{j=1}^N a_j(t) = -1$ и $\sum_{j=1}^N j a_j(t) = 0$. Дополнительные три уравнения получим из трех тождественных равенств последовательности (46) с найденными весовыми функциями

$$\mathcal{K}_1 = x \left(1 + \frac{4}{2}x \right), \quad \mathcal{K}_2 = \frac{x^3}{6} (1 + 5x + 5x^2),$$

$$\mathcal{K}_3 = \frac{x^5}{120} \left(1 + \frac{15}{2}x + \frac{50}{3}x^2 + \frac{125}{12}x^3 \right).$$

Еще одно уравнение запишем, потребовав выполнение уравнения (29) в точке $x = 0$. Отсюда имеем $\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k(x) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right]_{x=0} = 0$, откуда следует

уравнение $a_2(t) - \frac{\delta(t)}{2} a_1(t) = 0$. Фронт темпера-

турного возмущения $\delta(t)$ определим из интеграла теплового баланса $\frac{d}{dt} \int_0^{\delta(t)} T dx = -k(0) \frac{\partial T(0, t)}{\partial x}$, откуда следует дифференциальное уравнение

$$\sum_{j=0}^6 \left(\frac{a_j(t)}{2(j+1)} \sigma'(t) + \frac{a_j'(t)}{j+1} \sigma(t) \right) + a_1(t) = 0, \quad (47)$$

где $\sigma(t) = \delta(t)^2$. Температурные профили, полученные на основе (47), приведены на рис. 2. Отмечаем практически полное слияние приближенного и точного (численного) решений.

Заключение. В отличие от классических точных методов, дающих решения в виде тригонометрических, цилиндрических и специальных функций, получаемые МВТФ решения представляются степенными полиномами, максимально приспособленными для проведения инженерных расчетов, решения задач оптимизации, обратных задач и т. д. В итоге удается максимально упростить процесс получения решения, сводя его к выполнению последовательности достаточно простых операций. МВТФ гармонично объединяет простоту и высокую точность, существенно превышающую точность других известных приближенных методов.

Список использованных источников

1. Власова, Е. А. Приближенные методы математической физики / Е. А. Власова, В. С. Зарубин, Г. Н. Кувыркин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 700 с.
2. Зарубин, В. С. Математическое моделирование в технике / В. С. Зарубин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 496 с.
3. Флетчер, К. Численные методы на основе метода Галеркина / К. Флетчер; пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 352 с.
4. Михлин, С. Г. Вариационные методы в математической физике / С. Г. Михлин. – М.: Наука, 1970. – 512 с.
5. Wood, A. S. A new look at the heat balance integral method / A. S. Wood // Appl. Math. Model. – 2001. – Vol. 25, N 10. – P. 815–824. doi.org/10.1016/s0307-904x(01)00016-6.
6. Mitchell, S. L. Application of standard and refined heat balance integral methods to one-dimensional Stefan problems / S. L. Mitchell, T. G. Myers // SIAM Review. – 2010. – Vol. 52, N 1. – P. 57–86. doi.org/10.1137/080733036.
7. Myers, T. G. Optimizing the exponent in the heat balance and refined integral methods / T. G. Myers // Int. Commun. Heat Mass Transfer. – 2009. – Vol. 36, N 2. – P. 143–147. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.10.013.
8. Layeni, O. P. Hybrids of the heat balance integral method / O. P. Layeni, J. V. Johnson // Appl. Math. Comput. – 2012. – Vol. 218, N 14/15. – P. 7431–7444. doi.org/10.1016/j.amc.2012.01.001.
9. Mitchell, S. L. Improving the accuracy of heat balance integral methods applied to thermal problems with time dependent boundary conditions / S. L. Mitchell, T. G. Myers // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53, N 17/18. – P. 3540–3551. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.04.015.

10. Кот, В. А. Тождества взвешенной температуры / В. А. Кот // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, № 2. – С. 409–424.
11. Лыков, В. А. Теория теплопроводности / В. А. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
12. Carslow, H. S. Conduction of Heat in Solids / H. S. Carslow, J. C. Jaeger. – Oxford, UK: Oxford University Press, 1992. – 510 p.

References

1. Vlasova E. A., Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N. *Approximate methods of mathematical physics*. Moscow, Publishing house of the Moscow State Technical University N. E. Bauman, 2001. 700 p. (in Russian).
2. Zarubin V. S. *Mathematical modeling in technology*. Moscow, Publishing house of the Moscow State Technical University N. E. Bauman, 2003. 496 p. (in Russian).
3. Fletcher K. *Numerical Methods Based on the Galerkin Method*. Moscow, Mir Publ., 1988. 352 p. (in Russian).
4. Mikhlin S. G. *Variational methods in mathematical physics*. Moscow, Nauka Publ., 1970. 512 p. (in Russian).
5. Wood A. S. A new look at the heat balance integral method. *Applied Mathematical Modelling*, 2001, vol. 25, no. 10, pp. 815–824. doi.org/10.1016/s0307-904x(01)00016-6.
6. Mitchell S. L., Myers T. G. Application of standard and refined heat balance integral methods to one-dimensional Stefan problems. *SIAM Review*, 2010, vol. 52, no. 1, pp. 57–86. doi.org/10.1137/080733036.
7. Myers T. G. Optimizing the exponent in the heat balance and refined integral methods. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 36, no. 2, pp. 143–147. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.10.013.
8. Layeni O. P., Johnson J. V. Hybrids of the heat balance integral method. *Applied Mathematics and Computation*, 2012, vol. 218, no. 14, pp. 7431–7444. doi.org/10.1016/j.amc.2012.01.001.
9. Mitchell S. L., Myers T. G. Improving the accuracy of heat balance integral methods applied to thermal problems with time dependent boundary conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 53, no. 17/18, pp. 3540–3551. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.04.015.
10. Kot V. A. Weighted temperature identities. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 2, pp. 423–438. doi.org/10.1007/s10891-015-1207-5.
11. Lykov V. A. *Theory of heat conduction*. Moscow, Vysshaya shkola, 1967. 600 p. (in Russian).
12. Carslow H. S., Jaeger J. C. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford, UK, Oxford University Press, 1992. 510 p.

Информация об авторе

Кот Валерий Андреевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: valery.kot@hmti.ac.by.

Для цитирования

Кот, В. А. Метод взвешенной температурной функции в решении задач нестационарной теплопроводности / В. А. Кот // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 64–73.

Information about the authors

Kot Valery Andreevich – Ph. D. (Engineering), Senior 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: valery.kot@hmti.ac.by.

For citation

Kot V. A. Weighted temperature function method for solution of unsteady-state heat conduction problems. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 64–73 (in Russian).

Член-корреспондент С. С. Песецкий, С. П. Богданович, Т. М. Содылева

*Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси,
Гомель, Республика Беларусь*

УПРОЧНЕНИЕ ПОЛИАМИДА 6 ПРИ ГИБРИДНОМ НАПОЛНЕНИИ КОРОТКИМ БАЗАЛЬТОВЫМ ВОЛОКНОМ И НАНОГЛИНОЙ

Исследовано влияние на структуру и механические свойства полиамида 6 (ПА6) добавок коротких базальтовых волокон (БВ) и органоглины – монтмориллонита, модифицированного обработкой поверхностно-активным веществом (четвертичной аммонийной солью соляной кислоты, в которой катион азота связан с метильным, таллилным и двумя гидроксиэтильными углеводородными радикалами). Компаундирование материалов осуществляли в расплаве ПА6 методом реакционной экструзии (РЭ) при использовании двухшнекового экструдера с диаметром шнеков $D = 35$ мм и $L / D = 40$. Показано, что при гибридном наполнении БВ и органоглиной наблюдается синергическое усиление механических характеристик композитов, причем данный эффект наиболее ярко выражен при пониженной концентрации (15 масс. %) БВ в композите.

Ключевые слова: полиамид 6, базальтовое волокно, органоглина, гибридное наполнение.

Corresponding Members S. S. Pesetskii, S. P. Bogdanovich, T. M. Sodyleva

V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

POLYAMIDE 6 REINFORCEMENT BY HYBRID SHORT BASALT FIBER AND ORGANOCLAY FILLING

The effect of additives of short basalt fibers (BF) and organoclay – a montmorillonite modified with surfactant (quaternary ammonium salt of hydrochloric acid, in which the nitrogen cation is associated with methyl, tallilnym and two hydroxyethyl hydrocarbon radicals) – on the structure and mechanical properties of polyamide 6 (PA6) has been studied. The component compounding was carried out in the PA6 melt by reactive extrusion (RE) using a twin-screw extruder (screw diameter $D = 35$ mm and $L / D = 40$). It was shown that at hybrid filling of PA6 with BF and organoclay, the synergistic enhancement of mechanical characteristics of the composites is observed. This effect is most pronounced at low concentration (15 wt %) of BF in the composite.

Keywords: polyamide 6, basalt fiber, organoclay, hybrid filling.

Введение. Важнейшим методом получения упрочненных термопластичных полимерных материалов является их армирование короткими высокопрочными волокнами [1] или добавками нанодисперсных специально модифицированных слоистых глинистых силикатов (органоглин) [2]. Компаундирование подобных материалов осуществляют, как правило, введением наполнителей в расплав термопласта. Концентрация коротких армирующих волокон, при которой достигается максимальный упрочняющий эффект, относительно велика и составляет обычно 30–50 % (здесь и далее концентрация выражена в масс. %) [1]. Эффективность органоглин, напротив, проявляется при их относительно низкой (1,5–4,5 %) концентрации в объеме полимера [2].

Недостатком пластиков, армированных короткими волокнами, является повышенный износ элементов оборудования при их получении и переработке, большая плотность материала и сильная зависимость свойств от типа волокна, характера обработки его поверхности (состава замасливателя), геометрических параметров отдельных моноволокон в объеме полимерной матрицы, уровня межфазной адгезии в системе полимер–поверхность наполнителя и т. д. При введении в термопласты органоимодифицированных наноглин наиболее типичным является рост механической прочности и жесткости материалов при одновременном снижении их ударной вязкости [2].

Имеются отдельные работы [3–5], в которых описаны синергические эффекты повышения прочностных характеристик при совместном введении в термопласты органоглин и коротких стекловолокон (СВ) или углеволокон. Так, согласно [3], нанокомпозиты ПА6/органоглина–3 %

с добавкой 30 % СВ обладают прочностью при растяжении на 11 % более высокой, чем материалы, содержащие только волокнистый наполнитель. Их модуль упругости превышает таковой для стеклонанополненного композита на 42 %. Синергическое влияние наноглины и СВ на прочность при растяжении и модуль упругости полиамидных композитов наблюдается, когда в качестве матрицы для ввода СВ используется композит ПА6/органоглина с полностью расслоенной органоглиной. Согласно [4], при добавлении 5 % глины модуль упругости по сравнению с чистым ПА6 повышается на ≈ 38 % (для композита ПА6/СВ прирост значений модуля составляет 22 %), а для тройной системы ПА6/глина/СВ увеличение данного показателя достигает 81 %, что заметно превышает предполагаемое изменение на основе принципа аддитивности.

Сказанное свидетельствует о чрезвычайной перспективности развития исследований в области нанокомпозитов, получаемых при использовании гибридных наполнителей, в которых нано- и микроструктурные армирующие элементы могут синергически усиливать модифицирующее влияние друг друга [5]. Механизм влияния гибридных наполнителей на специфику структуры и механических свойств частично кристаллических и аморфных термопластов к настоящему времени изучен недостаточно. Остаются невыясненными вопросы, связанные с влиянием на свойства материалов природы и соотношения компонентов, технологических условий компаундирования и переработки композитов, роли сопутствующих добавок, макромолекулярных превращений в полимерных расплавах и других факторов.

Цель работы – анализ особенностей структуры и свойств композитов на основе кристаллизующегося ПА6, армированных короткими базальтовыми волокнами и органоглиной.

Материалы и методы исследования. Применяли полиамид 6 марки 210/310, выпускаемый ОАО «Гродно Азот» по ТУ 500048054.009–2001 (температура плавления $T_{\text{пл}} = 220$ °С, показатель текучести расплава (ПТР) = 17,2 г/10 мин при $T = 250$ °С и нагрузке 21,6 Н). Используемая органоглина – модифицированный обработкой ПАВ монтмориллонит марки Cloisite 30В (Cl30В) производства Southern Clay Products Inc., США; используемое ПАВ – $(\text{HE})_2\text{M}_1\text{T}_1$, где HE – гидроксипропилированный метил – $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$, М – метил, Т – таллил (65 % C_{18} , 30 % C_{16} , 5 % C_{14}). Свойства органоглины по данным фирмы-производителя: средний размер частиц <13 мкм, межплоскостное расстояние $d_{001} = 1,84$ нм, концентрация воды $[\text{H}_2\text{O}] < 2$ %, $[\text{ПАВ}] \approx 30$ масс. %. Применяемое БВ – ровинг из базальтовых комплексных нитей марки НРБ 13-25 20-КВ-11, выпускаемый ООО «Каменный век», Россия по ТУ 5952-001-13307094–2008 (диаметр моноволокон 13 мкм, линейная плотность 2530 текс, удельная разрывная нагрузка 706 мН/текс, содержание летучих веществ при прокаливании 0,45 %, влажность $\leq 0,1$ %).

В качестве стабилизатора деструкции макромолекул ПА6 при компаундировании материалов применяли азотсодержащий стерически затрудненный фенольный антиоксидант – N, N' – гексан – 1,6-диил-бис [3-(3,5-ди-трет-бутил-4-гидроксифенил пропионамид)], торговое название Irganox 1098 производства фирмы BASF, Германия.

Для интенсификации адгезионного взаимодействия макромолекул ПА6 с поверхностью частиц наполнителей и удлинения цепи в состав композитов вводили жидкофазный модификатор гетероцепных термопластов марки МГТ-Ж (ТУ ВУ 400084698.265–2014), содержащий в своем составе ароматический полиизоцинат.

ПА6 предварительно высушивали до остаточной влажности $\leq 0,15$ %. Органоглину сушили в вакууме непосредственно перед компаундированием при температуре 110 °С в течение 2 ч [6].

Компаундирование полимерных композиционных материалов (ПКМ) осуществляли методом РЭ в расплаве на экструзионно-грануляционной линии на базе двухшнекового экструдера TSSK-35/40 с однонаправленным вращением шнеков (производство КНР, диаметр шнеков 35 мм, $L / D = 40$, 10 секций материального цилиндра с независимым нагревом и охлаждением и точным поддержанием температуры в каждой из них) [6]. Технология компаундирования материалов была следующей. Вначале приготавливали механическую смесь предварительно высушенного ПА6 с жидкофазным МГТ-Ж (концентрация МГТ-Ж – 0,4 % от массы ПА6). Затем добавляли сухую органоглину и стабилизатор (концентрация стабилизатора 0,3 %) и вновь тщательно перемешивали компоненты в высокоскоростном двухлопастном смесителе. Сразу же после приготовления смесь компонентов подвергали РЭ на экструдере TSSK-35/40. Температура в основ-

ных смесительных секциях 4–8 материального цилиндра была постоянной и составляла 245 °С; частоту вращения шнеков принимали равной 350 об/мин. Длительность пребывания полимерного расплава в материальном цилиндре при этом была равной ≈0,5 мин. В секции 6 образующиеся газообразные продукты удалялись из расплава естественным путем через отверстие, предназначенное для ввода БВ и одновременно в нее вводили базальтовый ровинг; в секции 9 производился принудительный отвод летучих веществ за счет вакуумирования. После прохождения материального цилиндра экструдера расплав выдавливался через фильеру в виде четырех стренг, которые подвергали водяному охлаждению и гранулированию. Далее полученный гранулят высушивали в сушилке с продувом осушенным воздухом при температуре 100 °С до остаточной влажности не более 0,12 % и использовали для определения ПТР, а также получения экспериментальных образцов литьем под давлением на термопластавтомате EN-30 (производство Тайвань, объем впрыска 30 см³), температура литья составляла 245 °С, температура формы – 40 °С.

Показатели механических свойств определяли при испытаниях методами растяжения и ударного нагружения. Для испытаний методом растяжения использовали лопатки типа 5 с размером рабочей части 45 × 5 × 3 мм (ГОСТ 11262–80); бруски размером 80 × 10 × 4 мм применяли для определения ударной вязкости по Шарпи по ГОСТ 4647–80 и испытаний на изгиб по ГОСТ 4648–14. Испытания при растяжении и изгибе производили на машине Instron 5567 (Великобритания). Ударную вязкость определяли на образцах с острым надрезом на маятниковом копре РИТ 550J (фирма Shenzhen Wance Testing Machine Co. Ltd., КНР) при температуре 23 °С.

Реологическое поведение расплавов анализируемых материалов оценивали по значениям ПТР и вязкости (η), определяемым на приборе RAY-RAN TEST EQUIPMENT Ltd (Великобритания) в соответствии с ГОСТ 11645–80 при $T = 250$ °С, $P = 21,6$ Н, диаметре капилляра 2,095 мм, длительности выдержки расплава в цилиндре прибора 4 мин.

Метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) использовали для анализа кристаллической структуры (переходов плавление–кристаллизация). В качестве пробы использовали центральные слои средней части брусков толщиной 5 мм, применяемых для определения ударной вязкости. Исследования выполняли на микрокалориметре Diamond DSC (фирма Perkin Elmer, США) при навеске ≈7 мг, скоростях нагрева и охлаждения в токе азота 15 °С/мин. Для устранения влияния тепловой предыстории на структуру материалов осуществляли нагрев анализируемых проб в алюминиевом контейнере прибора до 240 °С, выдерживали при этой температуре в течение 30 сек, охлаждали до 40 °С, а затем проводили повторный цикл нагрева и охлаждения. При определении температуры кристаллизации ($T_{кр}$) использовали значения данного показателя, полученные при повторном испытании образцов.

Рентгеноструктурный анализ (РСА) органоглин и ПА6 композитов осуществляли на дифрактометре RDA-2000 (фирма GNR Analytic Instruments, Италия) в интервале углов $2\theta = 2$ –10° (для анализа органоглин в композите) и 10–30° (для анализа структуры ПА6 в композитах) при использовании CuK_α -излучения ($\lambda = 0,154$ нм); шаг сканирования 0,002°, время на точку 0,5 с; напряжение 40 кВ, ток 30 мА.

Метод рентгенографии использовали для определения расстояния (d) между отдельными слоями как в исходной глине, так и в получаемых композитах. Расчет проводили на основании уравнения Брэгга: $\lambda = 2d \sin\theta$, где λ – длина волны используемого рентгеновского излучения; θ – значение угла дифракции.

Динамический механический анализ (ДМА) осуществляли на приборе DMA 8000 фирмы Perkin Elmer (США) при частоте нагружения 10 Гц. Используемые образцы – пластины размером 50 × 5 × 1 мм, полученные литьем под давлением на лабораторной литьевой машине поршневого типа с объемом впрыска 5 см³. Испытания проводили в режиме изгиба при установке индентора посередине между двумя опорами.

Результаты и их обсуждение. Составы исследованных композитов и показатели их свойств приведены в табл. 1, из которой следует, что механические и реологические характеристики сильно зависят от степени наполнения ПА6 волокном и концентрации органоглины в материале. Все композиты, независимо от концентрации БВ, обладают пониженной текучестью расплава, что обусловлено наличием в их составе изоцианатсодержащего модификатора МГТ-Ж,

выполняющего функцию удлинителя цепи и интенсифицирующего межфазное взаимодействие в системе полимер/наполнитель [7]. Введение добавок органоглины способствует росту значений прочностных характеристик при растяжении и изгибе, причем армирующий эффект при гибридном наполнении более ярко выражен при пониженной концентрации БВ в композитах. Например, для композитов с 35 и 15 % БВ максимальный прирост значений прочности при изгибе ($\sigma_{и}$) при введении С130В составляет соответственно 114 и 133 %, E_p – 126 и 138 %.

Т а б л и ц а 1. Показатели механических и реологических свойств ПА6, наполненного БВ и гибридным наполнителем БВ/органоглина

T a b l e 1. Indices of the mechanical and rheological properties of PA6 filled with basalt fibers and with a hybrid BF/organoclay filler

Обозначение состава Composition	Основные компоненты, масс. % Main components, mass. %	η , Па·с	ПТР, г/10 мин	$\sigma_{и}$, МПа	σ_p , МПа	E_p , ГПа	a , кДж/м ²	S , %
I	ПА6/БВ–35 %	609	17,7	155 ± 3	146 ± 4	7,12	70,6	0,40
II	ПА6/БВ–35 %/С130В–0,5 %	1174	9,2	160 ± 4	146 ± 5	7,81	69,3	0,24
III	ПА6/БВ–35 %/С130В–1,5 %	1864	5,8	161 ± 4	150 ± 6	8,12	69,6	0,34
IV	ПА6/БВ–35 %/С130В–3 %	1878	5,6	174 ± 5	153 ± 6	8,95	67,9	0,30
V	ПА6/БВ–35 %/С130В–6 %	2084	5,1	177 ± 6	150 ± 5	8,73	61,3	0,28
VI	ПА6/БВ–15 %	472	22,8	76 ± 3	87 ± 3	3,83	35,1	0,70
VII	ПА6/БВ–15 %/С130В–0,5 %	1687	6,3	85 ± 3	99 ± 4	4,67	95,1	0,44
VIII	ПА6/БВ–15 %/С130В–1,5 %	2214	4,8	88 ± 4	99 ± 4	4,69	82,2	0,56
IX	ПА6/БВ–15 %/С130В–3 %	2530	4,3	89 ± 4	100 ± 3	4,95	83,5	0,54
X	ПА6/БВ–15 %/С130В–6 %	2657	4,0	101 ± 4	104 ± 4	5,24	68,9	0,40

П р и м е ч а н и е: $\sigma_{и}$, σ_p , E_p , a , S – соответственно прочность при изгибе и растяжении, модуль упругости при растяжении, ударная вязкость по Шарпи (без надреза), усадка при литье под давлением.

N o t e: $\sigma_{и}$, σ_p , E_p , a , S are the bending strength, tensile strength, tensile elasticity modulus, Charpy impact strength (without notch), molding shrinkage, respectively.

Добавки органоглины неочевидным и противоположным образом влияют на ударную вязкость (a) материалов, содержащих повышенное (35 %) и относительно малое (15 %) количество БВ: в более высоконаполненных композитах значения a незначительно снижаются по мере повышения концентрации С130В от 0,5 до 6 %, а в малонаполненных материалах наблюдается сильное (в 2,4–2,7 раза) увеличение данного показателя по сравнению с композитом, не содержащим органоглину. Последний результат является неожиданным, поскольку нанокompозиты ПА6/органоглина обычно характеризуются пониженным уровнем ударной вязкости, значения которой снижаются по мере повышения концентрации органоглины в материале [2]. Причиной этого может быть слишком малый размер наночастиц, поскольку эффективный размер включений в полимерную матрицу, которые могут препятствовать распространению магистральной трещины при ударном нагружении, составляет не менее 0,1 мкм [8]. Размеры наночастиц слишком малы, чтобы повысить ударную вязкость за счет увеличения кривизны траектории трещины.

Тем не менее, известны работы, в которых показано, что при оптимальном органомодифицировании наноглин наряду с другими показателями механических свойств может обеспечиваться и повышенная ударная вязкость [9; 10]. Согласно [10], ударная вязкость по Изоду с надрезом для ПА66/органоглина повышается от 98 до 146 Дж/м при введении 5 масс. % глины и сохраняется повышенной по сравнению с чистым ПА66 даже при более высокой концентрации глины.

Считается [11], что для обеспечения повышенного уровня ударной вязкости в полимер/глинистых нанокompозитах требуется определенный уровень интеркалирования агломератов глины, при котором обеспечивается создание дополнительной площади поверхности, препятствующей распространению трещины. Морфология нанокompозитов имеет решающее значение в механизме разрушения при ударном нагружении. Морфология с интеркалированными включениями наноглины может обеспечить улучшение данного свойства, что недостижимо для полностью эксфолированных (расслоенных) структур.

Важно также отметить, что добавки органоглины вызывают снижение усадки (S) при литье под давлением. Причем наиболее сильное снижение этого показателя в 1,6–1,7 раз наблюдается при минимальной (0,5 %) концентрации С130В в композитах II и VII (табл. 1). Поскольку усадка кристаллизующихся термопластов определяется их кристалличностью и морфологией образующихся кристаллов, то из представленных в табл. 1 данных следует, что добавки органоглины оказывают влияние на структуру композитов, несмотря на наличие в них значительного количества коротких БВ, которые по аналогии с СВ могут нуклеировать кристаллизацию кристаллизующихся термопластов [12]. Сказанное предопределяет необходимость проведения исследований, направленных на выяснение причин наблюдаемых изменений свойств композитов, содержащих гибридный наполнитель.

Рентгеноструктурный анализ материалов. Из данных, представленных в табл. 2 и на рис. 1, следует, что органоглина оказывает заметное влияние на структурные изменения в ПА6, а степень интеркалирования С130В зависит от концентрации БВ в композите. Как следует из табл. 1, независимо от концентрации органоглины и БВ полного эксфолирования наночастиц в композитах в условиях эксперимента не происходит. Однако максимум дифракционного пика, наблюдаемый для исходной органоглины при $2\theta = 4,80^\circ$ ($d_{001} = 1,84$ нм), в ПКМ смещается в область меньших углов, а значения d_{001} увеличиваются. Указанные изменения более выражены в композитах с повышенной концентрацией С130В. **Очевидной их причиной является повышение степени интеркалирования органоглины в связи с частичным проникновением фрагментов макромолекул в межслоевое пространство (галерею).** При равных концентрациях органоглины в ПКМ с 35 % БВ (составы IV и V) **положение максимума рефлекса смещено в область малых углов дифракции по сравнению с материалами, содержащими 15 % БВ (составы IX и X).** Следовательно, добавки БВ способствуют некоторому повышению степени интеркалирования органоглины.

Т а б л и ц а 2. **Положение дифракционных максимумов, их интенсивность (I) и межплоскостное расстояние в органоглине и ПА6**

Table 2. **Position of diffraction maxima, their intensity (I) and interplane distance in organoclay and PA6**

Состав (цифровые обозначения согласно табл. 1) Composition (Numerical designation according to Table 1)	Органоглина Organoclay			ПА6 Polyamide 6		
	$2\theta_1^\circ$	d_{001} , нм	I_1 , имп	$2\theta_2^\circ$	d_{110001} , нм	I_2 , имп / ΔI , отн ед.
I	–	–	–	21,25	0,42	3077 / 1,00
II	4,60	1,92	1434	21,30	0,42	2923 / 0,95
III	4,20	2,10	2459	21,35	0,42	3250 / 1,06
IV	4,20	2,10	4139	21,25	0,42	3904 / 1,27
V	4,20	2,10	6861	21,35	0,42	4072 / 1,32
VI	4,45	1,98	2682	21,25	0,42	9479 / 1,00
IX	4,45	1,98	2047	21,25	0,42	7939 / 0,89
X	4,30	2,05	3907	21,25	0,42	9357 / 0,99

Примечание: ΔI – относительная величина дифракционного максимума на рентгенограммах ПА6 при $2\theta \approx 21,25$ – $21,5^\circ$, равная отношению интенсивности пиков композитов с органоглиной к таковым, содержащим только БВ

Note: ΔI is the relative diffraction maximum value on the Roentgenograms of PA6 at $2\theta \approx 21.25$ – 21.5° equal to the ratio of the peak intensity of organoclay composites to that of only basalt fibers.

Следует отметить, что на дифрактограммах ПА6/БВ, не содержащих С130В, фиксируется малоинтенсивный пик при $2\theta_2 = 4,5^\circ$, приходящийся на область дифракционных рефлексов органоглины, который по имеющимся данным не идентифицирован [6].

Дифракционные кривые контрольных, не содержащих добавку органоглины образцов ПА6, наполненных только БВ (рис. 1, *b*, кривые 1, 2), характеризуются одним выраженным пиком интерференции на широкоуголовой рентгенограмме с максимумом при $2\theta = 21,25^\circ$, относящимся к гексагональной γ -структуре [13]. Наличие на дифракционном пике ПА6 перегибов при $2\theta \approx 20,2^\circ$

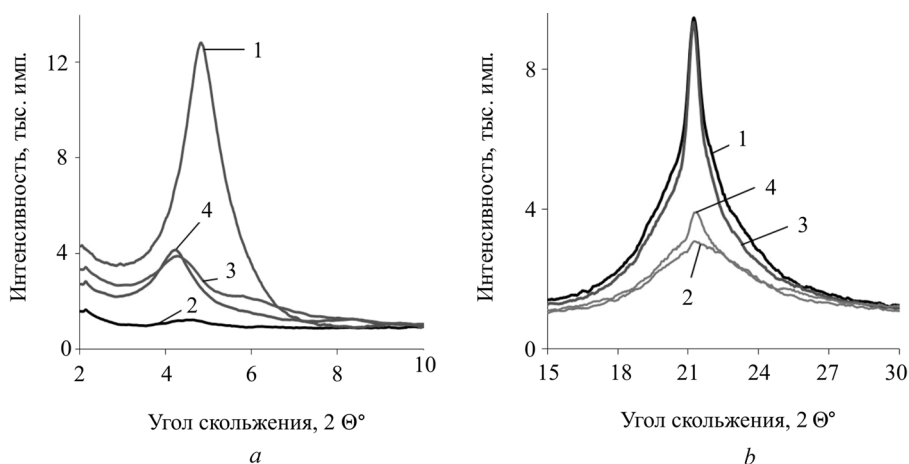


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы органоглины C130B (*a*, кривая 1) и композитов ПА6/БВ/C130B: *a* – 2 – ПА6/БВ–35 %, 3 – ПА6/БВ–15 %/C130B–3 %, 4 – ПА6/БВ–35 %/C130B–3 %; *b*: 1 – ПА6/БВ–15 %, 2 – ПА6/БВ–35 %, 3 – ПА6/БВ–15 %/C130B–3 %, 4 – ПА6/БВ–35 %/C130B–3 %

Fig. 1. Roentgen diffractograms of organoclay C130B (*a*, curve 1) and composites of PA6/BF/C130B: *a* – 2 – PA6/BF–35 %, 3 – PA6/BF–15 %/C130B–3 %, 4 – PA6/BF–35 %/C130B–3 %; *b*: 1 – PA6/BF–15 %, 2 – PA6/BF–35 %, 3 – PA6/BF–15 %/C130B–3 %, 4 – PA6/BF–35 %/C130B–3 %

и $\approx 22,8^\circ$ свидетельствует о присутствии в структуре материала моноклинной α -формы кристаллической модификации. Интенсивность дифракционного пика резко, более чем в 3 раза повышается при снижении концентрации БВ в композите от 35 до 15 % (рис. 1, *b*, кривые 1, 2, табл. 2, составы I и VI). Данный факт – очевидное следствие снижения кристалличности ПА6 в более высоконаполненных БВ композитах. Причиной этого являются, видимо, пространственные ограничения роста кристаллов из-за чрезмерно большого количества зародышей кристаллизации, образующихся при высокой степени наполнения короткими волокнами. Введение добавок органоглины приводит к незначительному росту кристалличности высоконаполненного композита и практически не изменяет ее, судя по значениям интенсивности пика при $2\theta \approx 21,25^\circ$ для ПКМ, содержащих 15 % БВ (табл. 2, рис. 1, *b*).

Полученные методом РСА данные свидетельствуют о влиянии коротких БВ на расслаивание C130B в гибридном композите и проявлении выраженного нуклеирующего действия органоглины в поверхностных слоях литевых блоков по отношению к кристаллизации ПА6 в композитах ПА6/БВ–35 %. Представляло интерес оценить степень структурных изменений в объеме полиамидной матрицы при гибридном наполнении, используя метод ДСК.

Анализ материалов методом дифференциальной сканирующей калориметрии. В отличие от РСА, данные которого позволяют судить о структуре поверхностных слоев литевых блоков из композитов (эксперименты выполнены на дисках, используемых для измерения усадки), в исследованиях по анализу структуры методом ДСК использованы центральные слои средней части брусков толщиной 5 мм, примененных для оценки значений ударной вязкости.

В центральных слоях литевых блоков, удаленных от холодных стенок формирующих элементов технологической оснастки, кристаллизация протекает более полно и в меньшей степени зависит от сдвиговых воздействий на расплав при заполнении оформляющей полости формы. Из представленных в табл. 3 и на рис. 2 данных, вопреки ожиданию, следует, что добавки органоглин к композиту ПА6/БВ не только не ускоряют, но даже замедляют кристаллизацию полиамида. Так, из табл. 3 видно, что максимальное значение $T_{кр}$ характерно для состава I (ПА6/БВ–35 %), не содержащего органоглины. Введение добавок органоглины как в высоконаполненный, так и в малонаполненный БВ ПА6 сопровождается снижением $T_{кр}$, т. е. для гибридно наполненных композитов требуется более сильное переохлаждение расплава для кристаллизации полиамида. В гибридно наполненных композитах ПА6 имеет также несколько пониженную кристалличность по сравнению с материалами, содержащими только БВ (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Значение параметров, характеризующих плавление и кристаллизацию ПА6 по данным ДСК
 Table 3. Values of the parameters characterizing the melting and crystallization of PA6 according to the differential scanning calorimetry data

Материал (цифровые обозначения согласно табл. 1) Material (Numerical designation according to Table 1)	$T_{\text{пл}}$, °C	$\Delta H_{\text{пл}}$, Дж/г	$T_{\text{кр}}$, °C	$\Delta H_{\text{кр}}$, Дж/г	α , %
ПА6*	224,5	—	186,2	48,6	—
I	217,8 / 223,3	44,0	189,9	50,1	18,3
II	213,5 / 219,9	43,6	188,1	53,6	18,2
III	213,5 / 222,3	39,7	187,2	53,7	16,6
IV	213,5 / 221,8	35,7	186,5	48,7	14,9
V	213,6 / 220,2	35,7	187,6	48,0	14,9
VI	216,4 / 221,7	45,4	188,4	51,9	18,9
VII	213,1 / 219,7	43,0	185,1	48,8	17,9
VIII	213,6 / 219,7	38,6	185,4	48,8	16,1
IX	213,7 / 219,4	37,4	186,9	48,9	16,7
X	213,2 / 218,7	37,4	185,8	43,3	16,7

П р и м е ч а н и е: * – значения параметров приняты согласно работе [6]; теплоты плавления полностью закристаллизованного ПА6 с моноклинной и гексагональными кристаллическими фазами составляют соответственно 241 и 239 Дж/г [13].

Н o t e: * – the parameter values are taken according to [6]; the melting heats of fully crystallized PA6 with monoclinic and hexagonal phases are equal to 241 and 239 J/g, respectively [13].

Таким образом, повышение прочностных характеристик ПА6 при его гибридном наполнении не объясняется ростом кристалличности связующего. Одной из важнейших причин может быть интенсификация межфазной адгезии в системе полиамид/наполнитель при введении органоглины. Вследствие этого ограничивается молекулярная подвижность и затормаживается рост кристаллитов, несмотря на активное нуклеирование кристаллизации наночастицами [2; 6].

Одним из следствий активных межфазных взаимодействий полиамидной матрицы с поверхностью наполнителя является наличие мультиплетных пиков плавления в композитах (табл. 3, рис. 2). Причина появления низкотемпературного пика плавления при ≈ 213 – 218 °C, видимо, связана с образованием менее плотно упакованных кристаллитов вблизи межфазной поверхности вследствие адсорбционного взаимодействия с наполнителем.

Анализ материалов методом ДМА. Сказанное выше подтверждается результатами анализа материалов методом ДМА (рис. 3).

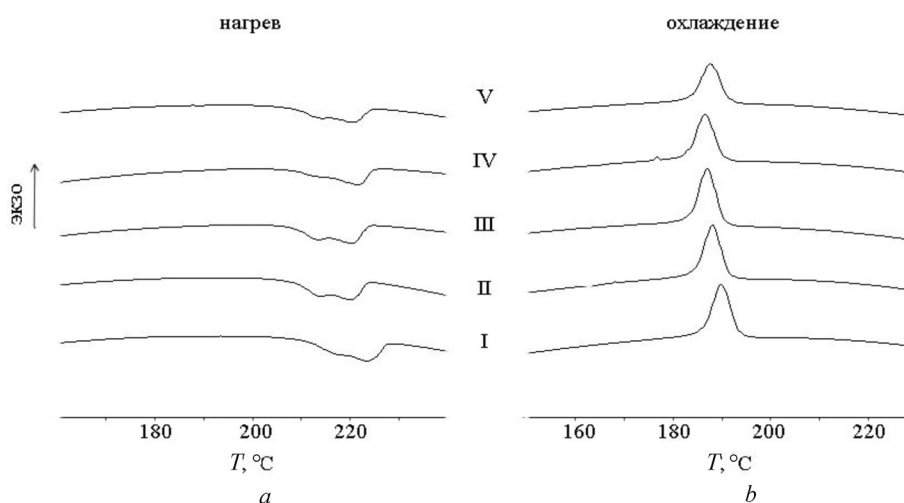


Рис. 2. Кривые ДСК при нагреве (а) и охлаждении образцов (б): обозначения кривых – составы согласно табл. 1
 Fig. 2. Curves for scanning calorimetry data at heating (a) and cooling of samples (b): the curves denote the compositions according to Table 1

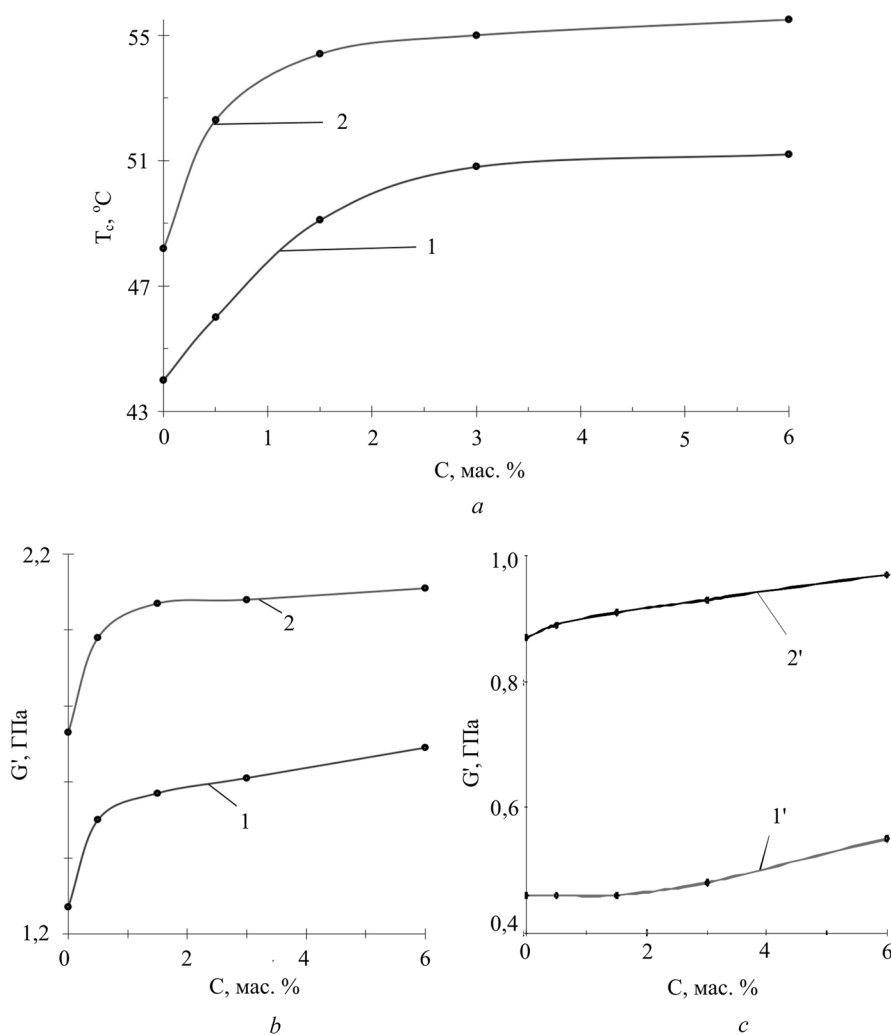


Рис. 3. Влияние концентрации CI30B на значения температуры стеклования (a) и динамического модуля сдвига (b, c) ПКМ; a – концентрация БВ 15 % (1) и 35 % (2); b, c – концентрация БВ 15 % (1, 1') и 35 % (2, 2'), температура испытаний (1, 2) – 30 °С, (1', 2') – 160 °С

Fig. 3. Influence of the CI30B concentration on the values of glass-transition temperature (a) and dynamic shear modulus (b, c) of polymer composite materials; a – basalt fiber concentration is 15 % (1) and 35 % (2); b, c – basalt fiber concentration is 15 % (1, 1') and 35 % (2, 2'), test temperature (1, 2) – 30 °С, (1', 2') – 160 °С

Как видно из рис. 3, a, повышение концентрации органоглины в композите сопровождается ростом температуры стеклования (T_g) аморфной фазы ПА6 независимо от концентрации БВ в материале. Данный факт – несомненное следствие ограничения сегментальной подвижности в аморфной фазе ПА6 при введении добавок органоглины. Вследствие интенсивного межфазного взаимодействия фрагментов макромолекул с поверхностью наночастиц должна повышаться деформационная теплостойкость гибридно наполненных композитов по сравнению с материалами ПА6/БВ, что фиксируется методом ДМА по повышенному уровню значений динамического модуля сдвига композитов ПА6/БВ/CI30B при $T = 160$ °С, существенно превышающей T_g полиамида 6 (рис. 3).

Таким образом, при гибридном наполнении ПА6 коротким БВ и наночастицами глины реализуется синергический эффект упрочнения материала. Степень взаимовлияния компонентов на свойства композитов определяется их концентрацией. При относительно низкой (15 %) концентрации БВ введение малых (0,5–1,5 %) добавок органоглины приводит к сильному (в 2,4–2,7 раз) росту ударной вязкости композитов.

Независимо от концентрации БВ добавки органоглины способствуют снижению усадки материала, росту T_g и модуля упругости, что фиксируется методом ДМА по значениям динамиче-

ского модуля сдвига при температуре, когда аморфная фаза ПА6 находится в стеклообразном или высокоэластическом состоянии. Наблюдаемые эффекты объясняются интенсивным межфазным взаимодействием в системе полимер–поверхность частиц гибридного наполнителя.

Полученные данные предопределяют необходимость проведения расширенных исследований по установлению механизмов упрочнения термопластов при их гибридном наполнении наночастицами и волокнами и научного обоснования технологии конкурентоспособных армированных композитов.

Список использованных источников

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / М. Л. Кербер [и др.]; под ред. А. А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
2. Песецкий, С. С. Нанокompозиты, получаемые диспергированием слоистых силикатов в расплавах полимеров / С. С. Песецкий, С. П. Богданович, Н. К. Мышкин // Полимерные материалы и технологии. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 7–37.
3. Mechanical, thermal and morphological properties of glass fiber and carbon fiber reinforced polyamide-6 and polyamide-6/clay nanocomposites / Shang-Han Wu [et al.] // Mater. Lett. – 2001. – Vol. 49, N 6. – P. 327–333. doi.org/10.1016/s0167-577x(00)00394-3.
4. Cho, J. W. Nylon 6 nanocomposites by melt compounding / J. W. Cho, D. R. Paul // Polymer. – 2001. – Vol. 42, N 3. – P. 1083–1094. doi.org/10.1016/s0032-3861(00)00380-3.
5. Песецкий, С. С. Гибридные микро- и нанонаполнители для конструкционных пластиков: синергизм армирующего действия / С. С. Песецкий // Полимерные материалы и технологии. – 2015. – Т. 1, № 2. – С. 5.
6. О влиянии избытка ПАВ в органоглине на структуру и свойства нанокompозитов на основе ПА6, полученных методом реакционной экструзии / Т. М. Содылева [и др.] // Полимерные материалы и технологии. – 2016. – Т. 2, № 1. – С. 36–46.
7. Agabekov, V. V. Effect of nanodisperse carbon fillers and isocyanate chain extender on structure and properties of poly(ethylene terephthalate) / V. V. Agabekov, V. V. Golubovich, S. S. Pesetskii // Journal of Nanomaterials. Special issue on Synthesis, Properties, and Applications of Polymeric Nanocomposites. – 2012. – Vol. 2012. – Article ID 870307. – 7 p. doi.org/10.1155/2012/870307.
8. Полимерные смеси: в 2 т. / под ред. Д. П. Пола, К. Б. Бакнелла; пер. с англ. – М.: Мир, 1981.
9. Pavlidou, S. A review on polymer-layered silicate nanocomposites / S. Pavlidou, C. D. Papaspyrides // Progress in Polymer Science. – 2008. – Vol. 33, N 12. – P. 1119–1198. doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.07.008.
10. Liu, X. Polyamide 66/clay nanocomposites via melt intercalation / X. Liu, Q. Wu // Macromolecular Materials and Engineering. – 2002. – Vol. 287, N 3. – P. 180–186. doi.org/10.1002/1439-2054(20020301)287:3%3C180::aid-mame180%3E3.0.co;2-t.
11. Zerda, A. S. Intercalated clay nanocomposites: morphology, mechanics and fracture behavior / A. S. Zerda, A. J. Lesser // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. – 2001. – Vol. 39, N 11. – P. 1137–1146. doi.org/10.1002/polb.1090.
12. Песецкий, С. С. Холодная кристаллизация полиэтилентерефталата в смесях с полибутилентерефталатом, армированных стекловолокном / С. С. Песецкий, В. В. Дубровский, В. Н. Коваль // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2011. – Т. 55, № 4. – С. 106–112.
13. Influence of cooling rate on a structure of PA6 / S. S. Pesetskii [et al.] // European Polymer J. – 2005. – Vol. 41, N 6. – P. 1380–1390. doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2004.12.009.

References

1. Kerber M. L., Vinogradov V. M., Golovkin G. S., Gorbatkina Yu. A., Kryzhanovskii V. K. *Polymer composite materials*. Saint Petersburg, Professiya Publ., 2008. 560 p. (in Russian).
2. Pesetskii S. S., Bogdanovich S. P., Myshkin N. K. Nanocomposites prepared by dispersing layered silicates in polymer melt (review). *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2015, vol. 1, no. 1, pp. 7–37 (in Russian).
3. Shang-Han Wu, Feng-Yih Wang, Chen-Chi. M. Ma, Wen-Chi Chang, Chun-Ting Kuo, Hsu-Chiang Kuan, Wei-Jen Chen. Mechanical, thermal and morphological properties of glass fiber and carbon fiber reinforced polyamide-6 and polyamide-6/clay nanocomposites. *Materials Letters*, 2001, vol. 49, no. 6, pp. 327–333. doi.org/10.1016/s0167-577x(00)00394-3.
4. Cho J. W., Paul D. R. Nylon 6 nanocomposites by melt compounding. *Polymer*, 2001, vol. 42, no. 3, pp. 1083–1094. doi.org/10.1016/s0032-3861(00)00380-3.
5. Pesetskii S. S. Hybrid micro- and nanofilling of structural plastics: synergism of reinforcing. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2015, vol. 1, no. 2, pp. 5 (in Russian).
6. Sodyleva T. M., Kuznetsova Yu. S., Bogdanovich S. P., Okhlopko A. A., Pesetskii S. S. On effect of excess surfactant in the organoclay on properties of nanocomposites based on PA6, obtained by reactive extrusion. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2016, vol. 2, no. 1, pp. 36–46 (in Russian).
7. Agabekov V. V., Golubovich V. V., Pesetskii S. S. Effect of nanodisperse carbon fillers and isocyanate chain extender on structure and properties of poly(ethylene terephthalate). *Journal of Nanomaterials. Special issue on Synthesis, Properties, and Applications of Polymeric Nanocomposites*, 2012, vol. 2012, article ID 870307. 7 p. doi.org/10.1155/2012/870307.

8. Paul D. R., Bucknal C. B. *Polymer Blends*. New York, Academic Press, 1978, 2 volumes.
9. Pavlidou S., Papaspyrides C. D. A review on polymer-layered silicate nanocomposites. *Progress in Polymer Science*, 2008, vol. 33, no. 12, pp. 1119–1198. doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.07.008.
10. Liu X., Wu Q. Polyamide 66/clay nanocomposites via melt intercalation. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2002, vol. 287, no. 3, pp. 180–186. doi.org/10.1002/1439-2054(20020301)287:3%3C180::aid-mame180%3E3.0.co;2-t.
11. Zerda A. S., Lesser A. J. Intercalated clay nanocomposites: morphology, mechanics and fracture behavior. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2001, vol. 39, no. 11, pp. 1137–1146. doi.org/10.1002/polb.1090.
12. Pesetskii S. S., Dubrovski V. V., Koval V. N. Cold crystallization of polyethyleneterephthalate mixed with polybutyleneterephthalate reinforced with glass fiber. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2011, vol. 55, no. 4, pp. 106–112 (in Russian).
13. Pesetskii S. S., Jurkowski B., Olkhov Yu. A., Bogdanovich S. P., Koval V. N. Influence of cooling rate on a structure of PA6. *European Polymer Journal*, 2005, vol. 41, no. 6, pp. 1380–1390. doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2004.12.009.

Информация об авторах

Песецкий Степан Степанович – член-корреспондент, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом, Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси (ул. Кирова, 32-а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: otdel5mpri@tut.by.

Богданович Сергей Павлович – канд. техн. наук, доцент, вед. науч. сотрудник, Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси (ул. Кирова, 32-а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: otdel5mpri@tut.by.

Содылева Татьяна Михайловна – мл. науч. сотрудник, Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси (ул. Кирова, 32-а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: otdel5mpri@tut.by.

Для цитирования

Песецкий, С. С. Упрочнение полиамида 6 при гибридном наполнении коротким базальтовым волокном и наноглиной / С. С. Песецкий, С. П. Богданович, Т. М. Содылева // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 74–83.

Information about the authors

Pesetskii Stepan Stepanovich – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (32-a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: otdel5mpri@tut.by.

Bogdanovich Sergei Pavlovich – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Leading researcher, V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (32-a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: otdel5mpri@tut.by.

Sodyleva Tatiana Mikhailovna – Junior researcher, V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (32-a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: otdel5mpri@tut.by.

For citation

Pesetskii S. S., Bogdanovich S. P., Sodyleva T. M. Polyamide 6 reinforcement by hybrid short basalt fiber and organoclay filling. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 74–83 (in Russian).

В. В. Поплавский¹, член-корреспондент Ф. Ф. Комаров², В. Г. Матыс¹

¹Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

СОСТАВ И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ, ФОРМИРУЕМЫХ ИОННО-АССИСТИРУЕМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ КАТАЛИТИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА НА УГЛЕРОДНЫЕ ПОДЛОЖКИ

Поверхностные слои сформированы ионно-ассистируемым осаждением (IBAD) платины и редкоземельных металлов (Ce, Yb) на носитель Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T с целью получения электрокатализаторов для топливных элементов прямого окисления метанола и этанола с полимерным мембранным электролитом. Формирование слоев проведено в режиме IBAD, при котором осаждение металла и перемешивание осаждаемого слоя с атомами поверхности подложки ускоренными ($U = 10$ кВ) ионами того же металла осуществляются соответственно из нейтральной фракции пара и плазмы вакуумного дугового разряда импульсного электродугового ионного источника. Исследование морфологии и состава слоев проведено методами сканирующей электронной микроскопии и электронно-зондового микроанализа, рентгеновского флуоресцентного анализа и спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния. Свойства электрокатализаторов исследовались методом циклической вольтамперометрии. Получаемые электрокатализаторы проявляют активность в процессах окисления метанола и этанола.

Ключевые слова: ионно-ассистируемое осаждение металлов, платина, церий, иттербий, углеродные подложки, каталитические слои, электрокаталитическая активность, окисление метанола и этанола.

V. V. Poplavsky¹, Corresponding Member F. F. Komarov², V. G. Matys¹

¹Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

COMPOSITION AND PROPERTIES OF SURFACE LAYERS PREPARED BY ION BEAM-ASSISTED DEPOSITION OF CATALYTIC METALS FROM VACUUM ARC-DISCHARGE PLASMA ON CARBON SUBSTRATES

Surface layers were prepared by ion beam-assisted deposition (IBAD) of platinum and rare earth metals (Ce, Yb) on the carbon-based Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T catalyst support in effort to produce electrocatalysts for direct methanol and ethanol oxidation fuel cells (DMFC, DEFC) with polymer electrolyte membrane. The layer formation in the IBAD mode, by means of the metal deposition and the mixing of a precipitating layer with the substrate by accelerated ($U = 10$ kV) ions of the same metal, was carried out. In this process, a neutral fraction of metal vapor and ionized plasma of vacuum pulsed electric arc was used. The study of morphology and composition of the layers was performed by scanning electron microscopy and electron probe microanalysis, X-ray fluorescence analysis and Rutherford backscattering spectrometry. Properties of the prepared electrocatalysts were investigated by cyclic voltammetry. It was established that the prepared electrocatalysts show their activity in the processes of electrochemical methanol and ethanol oxidation.

Keywords: ion beam assisted deposition of metals, platinum, cerium, ytterbium, carbon substrates, catalytic layers, electrocatalytic activity, oxidation of methanol and ethanol.

Введение. Легирование поверхности материалов ускоренными ионами металлов обеспечивает возможность введения в тонкий приповерхностный слой контролируемых количеств легирующей примеси на атомном уровне. Наибольший интерес может представлять ионно-лучевое модифицирование функциональных материалов, свойства которых определяются в основном составом поверхности, в частности гетерогенных катализаторов химических реакций [1–3]. В первую очередь представляется целесообразным ионно-лучевое формирование каталитических слоев на поверхности сравнительно небольших по размерам электродов электрохимических устройств – электрокатализаторов. Электрокатализаторы являются обязательным компонентом таких устройств альтернативной энергетики, как топливные элементы, преобразующие

химическую энергию, выделяемую при окислении топлива, непосредственно в электрическую энергию. Электрохимические процессы, лежащие в основе принципа действия топливных элементов, эффективно протекают только при наличии катализатора. Электрокатализаторы представляют собой гетерогенные катализаторы, при формировании которых каталитически активные металлы наносятся на химически инертный электропроводящий носитель. В качестве основного каталитического металла электрокатализаторов используется платина. Для достижения высокой активности и стабильности свойств электрокатализаторов в состав каталитических слоев вводятся активирующие добавки. Приготовление электрокатализаторов осуществляется обычно с применением многостадийных химических методов, включающих операции пропитки носителя растворами соединений осаждаемых металлов, восстановления соединений до металлического состояния, сушку и т. д. Высокая стоимость металлов платиновой группы требует поиска новых методов формирования каталитических слоев и оптимизации их состава.

Цель работы – исследование состава и свойств каталитических слоев, формируемых ионно-ассистируемым осаждением платины и одного из редкоземельных металлов – церия или иттербия – из плазмы импульсного дугового разряда на специальный углеродный носитель Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T.

Материалы и методы исследования. В качестве материала подложек – носителей электрокатализаторов при формировании слоев взята углеродная бумага Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T (TorayCFP), предназначенная для изготовления диффузионных слоев мембранно-электродных блоков низкотемпературных топливных элементов с полимерным мембранным электролитом, в частности топливных элементов прямого окисления метанола и этанола. Основой носителя являются нити полиакрилонитрила, который при изготовлении материала подвергается термоокислительной стабилизации и последующей карбонизации; его основные характеристики приведены в [4]. Носитель гидрофобизирован политетрафторэтиленом.

Формирование каталитических слоев осуществлено путем ионно-ассистируемого осаждения (IBAD – Ion Beam Assisted Deposition) платины, а также поочередно церия и платины, иттербия и платины. Отличительной особенностью предложенного режима осаждения является использование ионов осаждаемого металла в качестве ассистирующих процессу осаждения. Осаждение металла и перемешивание осаждаемого слоя с атомами поверхности подложки ускоренными ионами того же металла осуществляются в экспериментальной установке соответственно из нейтральной фракции пара и плазмы вакуумного дугового разряда импульсного электродугового ионного источника. Ускорение ассистирующих ионов осуществлялось напряжением 10 кВ. Плотность ионного тока составляла ~ 10 мкА/см². В рабочей камере поддерживался вакуум $\sim 10^{-2}$ Па.

Выполненные нами исследования [5–8] по ионно-лучевому формированию каталитических слоев как на металлических, так и на углеродных подложках с гладкой поверхностью показывают, что при ионно-ассистируемом осаждении платины из плазмы импульсного дугового разряда образуются многокомпонентные аморфные поверхностные слои толщиной менее 100 нм, обладающие достаточно высокой активностью в процессах электрохимического окисления метанола и этанола.

Введение в состав формируемых каталитических слоев наряду с платиной одного из редкоземельных металлов в качестве активирующей добавки обусловлено особенностями процесса электрохимического окисления спиртов. Процесс окисления как метанола, так и этанола является сложным, до настоящего времени детально до конца неизученным, и включает ряд стадий, протекающих последовательно и параллельно. Многостадийный процесс окисления метанола или этанола на поверхности платинового катализатора включает электрохимическую адсорбцию молекул спирта, их разложение путем последовательного дегидрирования в адсорбированном состоянии, образование адсорбированных молекул оксида углерода СО и их последующего удаления при взаимодействии с хемосорбированными молекулами воды либо с группами ОН с образованием ионов водорода и СО₂ [9–11]. Предполагается, что редкоземельные металлы, а также их оксиды в составе катализатора выступают в роли промоторов активации адсорбированных молекул воды в стадии образования ионов водорода, электронов и СО₂ [12–14].

Элементный состав и морфология получаемых слоев исследованы с применением рентгеновского электронно-зондового микроанализа в сочетании со сканирующей электронной микроскопией, рентгеновского флуоресцентного анализа и спектрометрии резерфордского обратного рассеяния.

Электронно-микроскопические исследования поверхностных слоев совместно с электронно-зондовым микроанализом с дисперсией по энергии квантов характеристического рентгеновского излучения, испускаемого атомами элементов, входящих в состав анализируемого слоя, проводились на сканирующем электронном микроскопе LEO 1455 VP и спектрометре AZtec Energy Advanced X-Max80 (Oxford Instruments) с кремниевым диффузионно-дрейфовым детектором – энергоанализатором. Анализировалось также распределение элементов по поверхности исследуемых слоев. Энергия электронов, сканирующих поверхность образцов, составляла 20 кэВ.

Рентгеновский флуоресцентный анализ каталитических слоев с дисперсией характеристического рентгеновского излучения атомов по длинам волн проведен с использованием спектрометра PANalytical Axios. В качестве излучения, возбуждающего рентгеновскую флуоресценцию, использовано K_{α} -излучение родия, в качестве монохроматора – анализатора регистрируемого рентгеновского излучения – кристалл LiF (200).

Исследование состава слоев методом спектрометрии резерфордского обратного рассеяния проведено с применением ускорительного комплекса AN-2500 (High Voltage Engineering Europe). Измерены спектры рассеяния ионов ${}^4\text{He}$ при их начальной энергии $E_0 = 1,3$ МэВ. Спектры снимались при нормальном падении пучка анализирующих частиц на поверхность образца и угле рассеяния $\theta = 170^\circ$. Энергетическое разрешение спектрометра с поверхностно-барьерным кремниевым детектором составляло 18 кэВ. Осуществлялась стандартная обработка спектров.

Активность электрокатализаторов, сформированных на основе углеродных носителей, исследовалась в реакциях электрохимического окисления метанола и этанола, лежащих в основе принципа действия низкотемпературных топливных элементов. Исследования проведены методом циклической вольтамперометрии с применением потенциостатов IPC-Pro M и Autolab 302N и стандартной трехэлектродной электрохимической ячейки ЯСЭ-2. В качестве рабочего электро-

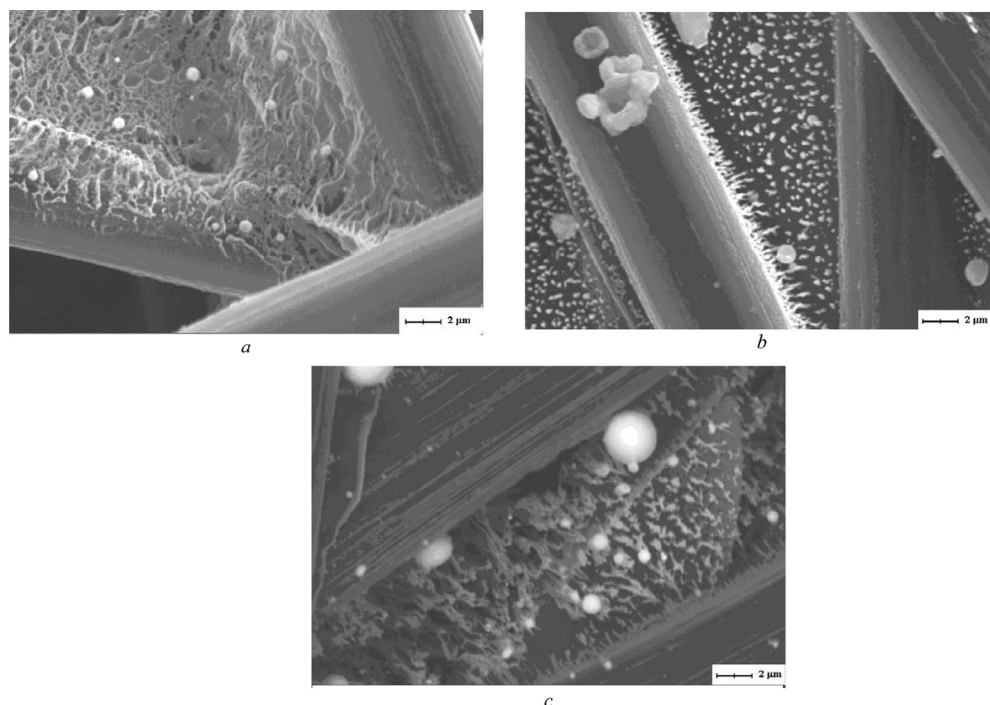


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения поверхности электрокатализаторов со слоями, сформированными ионно-ассистированным осаждением на носитель Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T платины (а), церия и платины (b), иттербия и платины (c)

Fig. 1. Electron microscopy images of the surface of electrocatalysts with the layers formed by ion beam-assisted deposition on the Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T support of platinum (a), cerium and platinum (b), ytterbium and platinum (c)

да использовался исследуемый образец, в качестве вспомогательного – платиновый электрод марки ЭПВ-1, в качестве электрода сравнения – насыщенный хлоридсеребряный электрод марки ЭВЛ-1М1 (Ag/AgCl). Значения потенциала U рабочего электрода отсчитаны от потенциала электрода сравнения. Измерения проводились при 20 °С в растворах метанола и этанола в серной кислоте (1M CH₃OH + 0,5M H₂SO₄ и 1M C₂H₅OH + 0,5M H₂SO₄). Растворы готовились на основе дистиллированной воды из серной кислоты марки «чда», метанола Merck ВЖХ и этанола-ректификата. Скорость изменения потенциала исследуемых электродов при измерениях в потенциодинамическом режиме составляла 50 или 100 мВ/с.

Результаты и их обсуждение. Электронно-микроскопические исследования показывают, что морфология поверхности углеродного носителя при формировании каталитических слоев не изменяется (рис. 1). В то же время на исследуемой поверхности имеются включения осаждаемых металлов с размерами порядка нескольких микрометров (рис. 1, 2), что обусловлено осаждением капель металла из дугового разряда ионного источника. Наличие капельных образований чаще всего является нежелательным, поскольку приводит к неоднородности состава и свойств формируемого осаждением из плазмы металлсодержащего покрытия. Для исключения попадания капель на обрабатываемую поверхность применяются специальные системы транспортировки плазменного потока, принцип действия которых основан на отклонении заряженной фракции в магнитном поле. Однако при этом происходит разделение ионизированной и нейтральной фракций, что не позволяет реализовать используемый режим ионно-ассистированного осаждения.

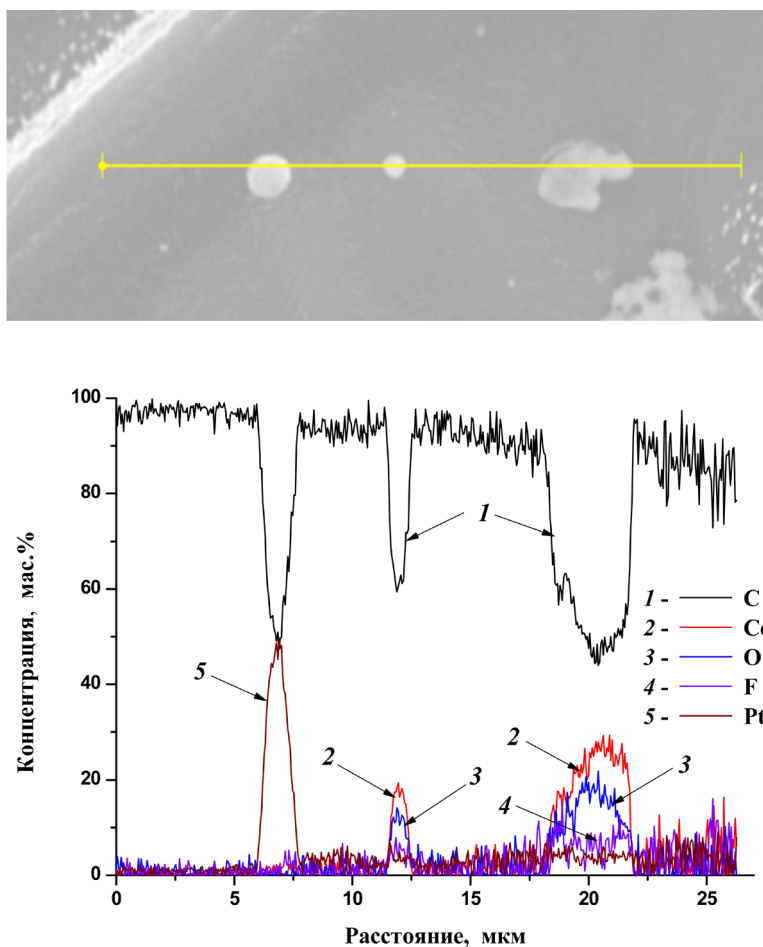


Рис. 2. Распределение элементов, входящих в состав слоя, сформированного ионно-ассистированным осаждением на носитель Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T церия и платины, вдоль линии сканирования (по данным энергодисперсионного микроанализа)

Fig. 2. Distribution of the elements of the layer formed by ion beam-assisted deposition on the Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T support of cerium and platinum along the scanning line (according to the energy-dispersive microanalysis data)

Исследование слоев методом электронно-зондового микроанализа показывает, что в состав слоев входят атомы осажденных металлов (Pt, Ce, Yb) и компонентов материала подложки (C, F), а также примеси кислорода. В силу неоднородности структуры самой подложки распределение атомов элементов по поверхности также неоднородно (рис. 2). Имеются капельные образования осаждаемых платины (кривая 5) и редкоземельного металла – церия (кривая 2). Концентрация атомов металлов на основной части поверхности подложки составляет в среднем несколько процентов. Распределение кислорода в составе слоя коррелирует с распределением церия (кривые 3 и 2), что дает возможность предположить образование оксида редкоземельного металла.

Данные рентгеновской флуоресценции подтверждают элементный состав исследуемых образцов. В полученных спектрах регистрируются спектральные линии *L*- и *M*-серий характеристического рентгеновского излучения атомов платины, *L*-серии излучения атомов церия и *M*-серии излучения атомов иттербия. Имеются линии K_{α} -излучения атомов фтора и кислорода. Наблюдаются линии отраженного излучения атомов родия, которое использовалось в качестве возбуждающего рентгеновскую флуоресценцию.

На рис. 3 приведены спектры резерфордского обратного рассеяния ионов ^4He от поверхности образцов электрокатализаторов, сформированных ионно-ассистируемым осаждением на носитель Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T платины (спектр Pt/TorayCFP) и поочередно церия и платины (спектр Ce, Pt/TorayCFP). Следует принять во внимание, что строгая количественная обработка спектров резерфордского обратного рассеяния затруднена вследствие нерегулярной и пористой структуры носителя. Результаты оценочных расчетов при обработке спектров показывают, что содержание атомов платины в формируемых слоях составляет $1,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (спектр Pt/TorayCFP) и $1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (спектр Ce, Pt/TorayCFP); содержание атомов церия – $1,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (спектр Ce, Pt/TorayCFP). Концентрация осажденных металлов в максимуме распределения вблизи поверхности зависит от слоевого содержания металла и составляет несколько атомных процентов.

Результаты исследования свойств формируемых электрокатализаторов в процессах окисления этанола и метанола представлены на рис. 4 в виде циклических вольтамперограмм. Электрохимическое окисление каждого из спиртов в растворе, содержащем серную кислоту, проявляется на циклических вольтамперограммах электрокатализаторов в виде специфических пиков тока при изменении потенциала электрода как в анодном, так и в катодном направлениях. На анодной части вольтамперограммы имеется пик тока, обусловленный многостадийным процессом окисления метанола или этанола.

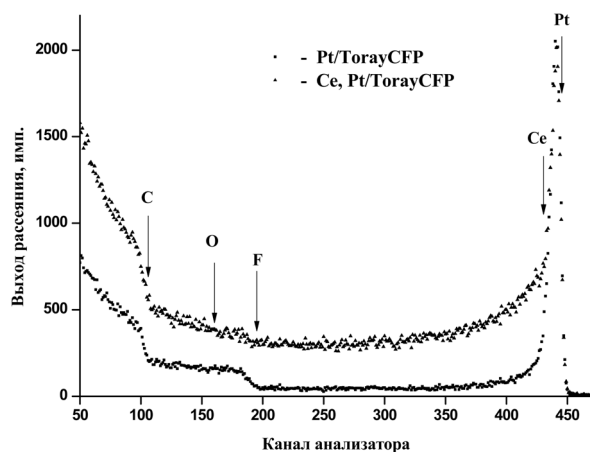


Рис. 3. Спектры резерфордского обратного рассеяния ионов ^4He от поверхности электрокатализатора, сформированного ионно-ассистируемым осаждением на носитель Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T: платины (Pt/TorayCFP); церия и платины (Ce, Pt/TorayCFP)

Fig. 3. Spectra of the Rutherford backscattering of ^4He ions from the surface of the electrocatalyst formed by ion beam-assisted deposition on the Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T support: platinum (Pt/TorayCFP); cerium and platinum (Ce, Pt/TorayCFP)

В растворе, содержащем этанол, наблюдается два пика окисления при потенциалах около 700 и 1100 мВ. Уменьшение тока при дальнейшем увеличении потенциала электрода объясняется снижением скорости процесса электрохимической адсорбции молекул спирта вследствие блокирования поверхности продуктами процессов электрохимической адсорбции воды. При последующей развертке потенциала в катодном направлении на вольтамперограмме появляется пик тока с максимумом при значении потенциала около 400 мВ, который обусловлен возобновлением процесса окисления метанола или этанола на восстановленной поверхности катализатора. Интенсивность пиков тока возрастает по мере циклирования потенциала электрода.

Анализ вольтамперограмм позволяет заключить, что активность электрокатализаторов, определяемая значениями силы тока в пиках, в процессе окисления более сложных молекул этанола по сравнению с метанолом оказывается выше. Введение в каталитический слой наряду

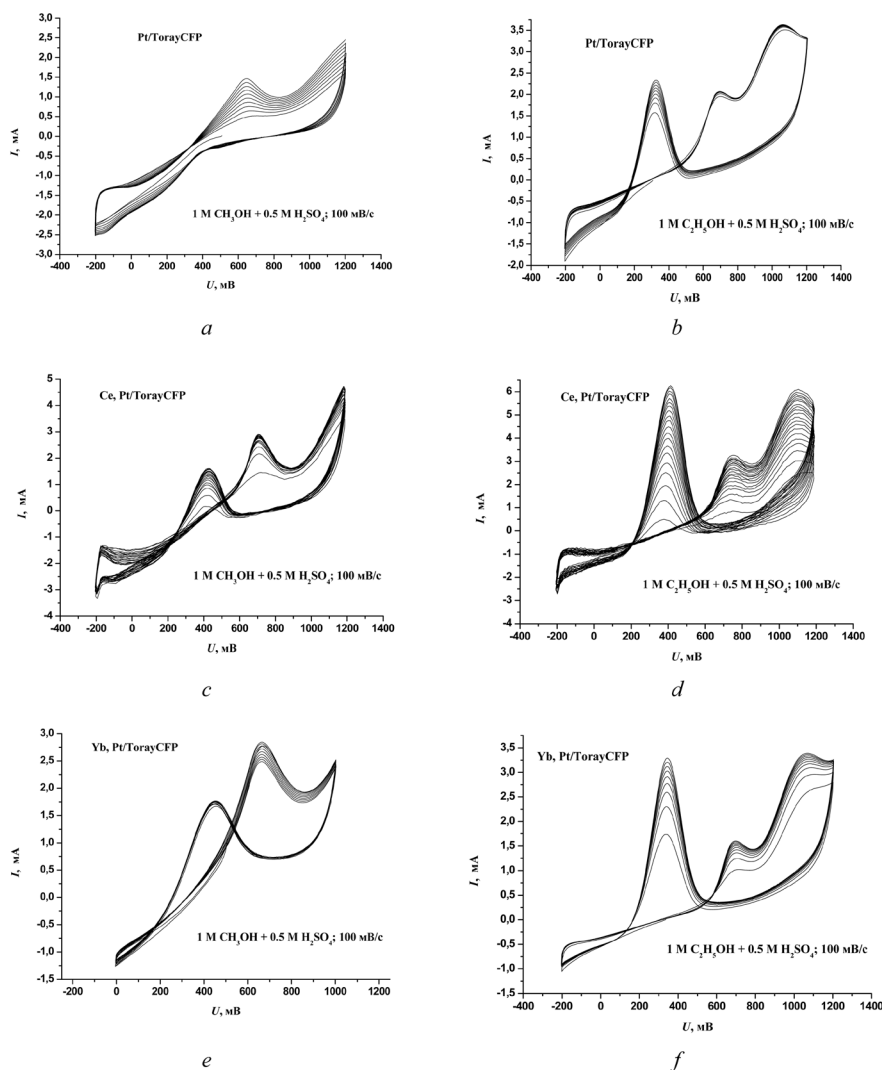


Рис. 4. Циклические вольтамперограммы электрокатализаторов с поверхностными слоями, сформированными ионно-ассистированным осаждением на носитель Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 Т платины (а, б), церия и платины (с, д), иттербия и платины (е, ф), в растворах: 1M CH₃OH + 0,5M H₂SO₄ (а, с, е) и 1M C₂H₅OH + 0,5M H₂SO₄ (б, д, ф)

Fig. 4. Cyclic voltammograms of electrocatalysts with surface layers formed by ion beam-assisted deposition on the Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T support of platinum (a, b), cerium and platinum (c, d), ytterbium and platinum (e, f), in solutions of: 1M CH₃OH + 0.5M H₂SO₄ (a, c, e) and 1M C₂H₅OH + 0.5M H₂SO₄ (b, d, f)

с платиной редкоземельного металла в качестве активирующей добавки способствует значительному увеличению активности электрокатализатора в процессах окисления как этанола, так и метанола, а также оказывает влияние на механизм реакций. Например, на электрокатализаторе Yb, Pt/TorayCFP процесс окисления этанола при развертке потенциала в катодном направлении начинается примерно на 50 мВ раньше в сравнении с электрокатализатором Pt/TorayCFP (570 мВ против 520 мВ) и заканчивается позже (90 мВ против 120 мВ) (рис. 2). Это указывает на большую легкость протекания процесса восстановления поверхности катализатора с редкоземельным металлом после анодной поляризации и его более высокую активность.

Заключение. Формирование каталитически активных слоев на поверхности специального углеродного носителя Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 Т проведено ионно-ассистированным осаждением платины и одного из редкоземельных металлов – церия или иттербия – из плазмы вакуумного дугового разряда импульсного ионного источника в режиме, при котором металл вводится в каталитический слой на наноразмерном атомном уровне в неравновесных условиях обработки ускоренными ионами осаждаемого металла.

По данным сканирующей электронной микроскопии, морфология поверхности углеродного носителя при формировании на них каталитических слоев не изменяется. С применением электронно-зондового энергодисперсионного микроанализа, рентгеновского флуоресцентного анализа и спектрометрии резерфордского обратного рассеяния установлено, что в состав формируемых каталитических слоев входят атомы осажденных металлов и элементов, входящих в состав носителя, а также примеси кислорода. Содержание каждого из осажденных металлов составляет в среднем несколько массовых процентов.

Электрокатализаторы с поверхностными слоями, сформированными на углеродном носителе ионно-ассистируемым осаждением металлов в предложенном режиме, отличаясь очень низким (менее $0,01 \text{ мг/см}^2$) содержанием платины, проявляют активность в важных в практическом отношении процессах окисления органических спиртов – метанола и этанола, в то время как содержание платины в электрокатализаторах, используемых в топливных элементах, составляет $\sim 1 \text{ мг/см}^2$. Введение в формируемые слои наряду с платиной редкоземельного металла (церия или иттербия) в качестве активирующей добавки способствует существенному увеличению активности электрокатализаторов. Формирование активной поверхности при осаждении двух металлов осуществляется в вакуумных условиях в два приема, что выгодно отличается от традиционных многостадийных химических методов приготовления нанесенных катализаторов, основанных на пропитке носителя растворами соединений каждого из металлов, их восстановлении до металлического состояния, сушке и т. д.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии».

Acknowledgement. The work has been done within the framework of the State Program of the Republic of Belarus “Physical Materials Science, New Materials and Technologies”.

Список использованных источников

1. Komarov, F. F. Ion Beam Modification of Catalytic Properties of Solids / F. F. Komarov, V. V. Poplavsky // *Radiat. Eff.* – 1988. – Vol. 106, N 1/2. – P. 1–26. doi.org/10.1080/00337578808013724.
2. Poplavskij, V. V. Influence of the Implantation of Transition Metal Ions on the Electrocatalytic Activity of Carbon Materials / V. V. Poplavskij // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B.* – 1987. – Vol. B28, N 4. – P. 534–539. doi.org/10.1016/0168-583x(87)90499-x.
3. Wolf, G. K. Modification of Chemical Surface Properties by Ion Beam Assisted Deposition / G. K. Wolf // *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. B.* – 1990. – Vol. 46, N 1–4. – P. 369–378. doi.org/10.1016/0168-583x(90)90732-a.
4. FuelCellsEtc. Commercial Fuel Cell Components Manufacturer [Electronic resource]. – Mode of access: <http://fuelcellsetc.com/store/Toray-Paper-060>. – Date of access: 08.11.2016.
5. Poplavsky, V. V. Composition and Electrocatalytic Properties of the Coatings Formed by the Ion-Beam-Assisted Deposition of Platinum from a Pulsed Arc-Discharge Plasma onto Aluminium / V. V. Poplavsky, T. S. Mishchenko, V. G. Matys // *Tech. Phys.* – 2010. – Vol. 55, N 2. – P. 296–302. doi.org/10.1134/s1063784210020222.
6. Poplavsky, V. V. Ion-Beam Formation of the Catalytically Active Surface of Titanium Electrodes / V. V. Poplavsky, T. S. Mishchenko, V. G. Matys // *J. Surf. Invest.* – 2010. – Vol. 4, N 4. – P. 576–581. doi.org/10.1134/s1027451010040051.
7. Poplavskii, V. V. Ion Beam Formation of the Active Surface of Methanol Oxidation Electrocatalysts on the Tantalum Substrates / V. V. Poplavskii, T. S. Stel'makh, V. G. Matys // *J. Surf. Invest.* – 2012. – Vol. 6, N 5. – P. 748–757. doi.org/10.1134/s1027451012090121.
8. Poplavskii, V. V. Microstructure and Composition of Catalytic Layers Formed by the Ion-Beam-Assisted Deposition of Platinum onto Carbon Substrates / V. V. Poplavskii, A.V. Dorozhko // *J. Surf. Invest.* – 2013. – Vol. 7, N 2. – P. 303–309. doi.org/10.1134/s1027451013020444.
9. Iwasita, T. Electrocatalysis of Methanol Oxidation / T. Iwasita // *Electrochim. Acta.* – 2002. – Vol. 47, N 22–23. – P. 3663–3674. doi.org/10.1016/s0013-4686(02)00336-5.
10. Sriramulu, S. Reaction Mechanism and Dynamics of Methanol Electrooxidation on Platinum (111) / S. Sriramulu, T. D. Jarvi, E. M. Stuve // *J. Electroanal. Chem.* – 1999. – Vol. 467, N 1–2. – P. 132–142. doi.org/10.1016/s0022-0728(99)00036-4.
11. Iwasita, T. The Electrocatalysis of Ethanol Oxidation / T. Iwasita // *3rd LAMNET Workshop, Brazil, 2–4 December 2002 // Workshop Proceedings.* – 2002. – P. 76–83.
12. Tang, Z. High Performance Rare Earth Oxides LnO_x (Ln = Sc, Y, La, Ce, Pr and Nd) Modified Pt/C Electrocatalysts for Methanol Electrooxidation / Z. Tang, G. Lu // *J. Power Sources.* – 2006. – Vol. 162, N 2. – P. 1067–1072. doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.07.052.
13. Xu, C. Electrochemical Oxidation of Ethanol on Pt-CeO₂/C Catalysts / C. Xu, P. K. Shen // *J. Power Sources.* – 2005. – Vol. 142, N 1–2. – P. 27–29.
14. Electrooxidation of Ethanol Using Pt Rare Earth–C Electrocatalysts Prepared by an Alcohol Reduction Process / A. O. Neto [et al.] // *Ionics.* – 2008. – Vol. 14, N 6. – P. 577–581. doi.org/10.1007/s11581-008-0212-5.

References

1. Komarov F. F., Poplavsky V. V. Ion Beam Modification of Catalytic Properties of Solids. *Radiation Effects*, 1988, vol. 106, no. 1–2, pp. 1–26. doi.org/10.1080/00337578808013724.
2. Poplavskij V. V. Influence of the Implantation of Transition Metal Ions on the Electrocatalytic Activity of Carbon Materials. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1987, vol. 28, no. 4, pp. 534–539. doi.org/10.1016/0168-583x(87)90499-x.
3. Wolf G. K. Modification of Chemical Surface Properties by Ion Beam Assisted Deposition. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1990, vol. 46, no. 1–4, pp. 369–378. doi.org/10.1016/0168-583x(90)90732-a.
4. FuelCellsEtc. Commercial Fuel Cell Components Manufacturer. Available at: <http://fuelcellsetc.com/store/Toray-Paper-060> (accessed 8 November 2016).
5. Poplavsky V. V., Mishchenko T. S., Matys V. G. Composition and Electrocatalytic Properties of the Coatings Formed by the Ion-Beam-Assisted Deposition of Platinum from a Pulsed Arc-Discharge Plasma onto Aluminium. *Technical Physics*, 2010, vol. 55, no. 2, pp. 296–302. doi.org/10.1134/s1063784210020222.
6. Poplavsky V. V., Mishchenko T. S., Matys V. G. Ion Beam Formation of the Catalytically Active Surface of Titanium Electrodes. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2010, vol. 4, no. 4, pp. 576–581. doi.org/10.1134/s1027451010040051.
7. Poplavskii V. V., Stel'makh T. S., Matys V. G. Ion-Beam Formation of the Active Surface of Methanol Oxidation Electrocatalysts on the Tantalum Substrates. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2012, vol. 6, no. 5, pp. 748–757. doi.org/10.1134/s1027451012090121.
8. Poplavskii V. V., Dorozhko A. V. Microstructure and Composition of Catalytic Layers Formed by the Ion-Beam-Assisted Deposition of Platinum onto Carbon Substrates. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 303–309. doi.org/10.1134/s1027451013020444.
9. Iwasita T. Electrocatalysis of Methanol Oxidation. *Electrochimica Acta*, 2002, vol. 47, no. 22–23, pp. 3663–3674. doi.org/10.1016/s0013-4686(02)00336-5.
10. Sriramulu S., Jarvi T. D., Stuve E. M. Reaction Mechanism and Dynamics of Methanol Electrooxidation on Platinum (111). *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 1999, vol. 467, no. 1–2, pp. 132–142. doi.org/10.1016/s0022-0728(99)00036-4.
11. Iwasita T. The Electrocatalysis of Ethanol Oxidation. *3rd LAMNET Workshop, Brazil, 2–4 December 2002. Workshop Proceedings*, 2002, pp. 76–83.
12. Tang Z., Lu G. High Performance Rare Earth Oxides LnO_x (Ln = Sc, Y, La, Ce, Pr and Nd) Modified Pt/C Electrocatalysts for Methanol Electrooxidation. *Journal of Power Sources*, 2006, vol. 162, no. 2, pp. 1067–1072. doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.07.052.
13. Xu C., Shen P. K. Electrochemical Oxidation of Ethanol on Pt-CeO₂/C Catalysts. *Journal of Power Sources*, 2005, vol. 142, no. 1–2, pp. 27–29. doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.10.017.
14. Neto A. O., Watanabe A. Y., Rodrigues R. M. de S., Linardi M., Forbicini C. A. L. G. O., Spinacé E. V. Electrooxidation of Ethanol Using Pt Rare Earth–C Electrocatalysts Prepared by an Alcohol Reduction Process. *Ionics*, 2008, vol. 14, no. 6, pp. 577–581. doi.org/10.1007/s11581-008-0212-5.

Информация об авторах

Поплавский Василий Владимирович – канд. физ.-мат. наук, доцент, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.poplavsky@belstu.by.

Комаров Фадей Фадеевич – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: komarovF@bsu.by.

Матыс Владимир Генрихович – канд. хим. наук, доцент, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vmatys@belstu.by.

Для цитирования

Поплавский, В. В. Состав и свойства поверхностных слоев, формируемых ионно-ассистируемым осаждением каталитических металлов из плазмы вакуумного дугового разряда на углеродные подложки / В. В. Поплавский, Ф. Ф. Комаров, В. Г. Матыс // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 84–91.

Information about the authors

Poplavsky Vasily Vladimirovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.poplavsky@belstu.by.

Komarov Fadei Fadeevich – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: komarovF@bsu.by.

Matys Vladimir Genrikhovich – Ph. D. (Chemistry), Assistant Professor, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vmatys@belstu.by.

For citation

Poplavsky V. V., Komarov F. F., Matys V. G. Composition and properties of surface layers prepared by ion beam-assisted deposition of catalytic metals from vacuum arc-discharge plasma on carbon substrates. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 84–91 (in Russian).

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ
SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES

УДК 338.43.02(476)(091)“1953/1964”

Поступило в редакцию 19.10.2016

Received 19.10.2016

М. У. Смяховіч

Інстытут гісторыі НАН Беларусі, Мінск, Рэспубліка Беларусь

**АСНОЎНЫЯ КІРУНКІ АГРАРНАЙ ПАЛІТЫКІ СССР 1953–1964 ГГ.
І ВЫНІКІ ЯЕ ВЫКАНАННЯ Ў БССР**

(Прадстаўлена акадэмікам М. П. Касцюком)

В сообщении сделан вывод, что в 1953–1964 гг. аграрная политика в СССР была направлена на мощный подъем сельского хозяйства, удовлетворение потребительского спроса на продукты питания. Сентябрьский 1953 г. модернизационный проект был рассчитан на экстенсивный путь развития сельского хозяйства. На эту идею опиралось руководство СССР в соперничестве с США в производстве продукции животноводства на душу населения в 1957–1961 гг., которое Советский Союз проиграл. В период после принятия третьей программы КПСС советская аграрная политика была ориентирована на мощный подъем сельского хозяйства, решение аграрного вопроса, полное удовлетворение потребностей крестьянства. Это требовало придания сельскому хозяйству государственного экономического приоритета, чего не было сделано. Вместе с тем деятельность ЦК КПБ, Совета Министров БССР, белорусской аграрной науки позволила сельскому хозяйству республики выполнить плановые задания семилетки.

Автор сообщения отмечает, что реорганизация системы управления сельской плановой экономикой, которая была проведена в СССР в 1962–1964 гг., была направлена на усиление эффективности и ответственности власти за решение задач, определенных третьей программой КПСС.

Ключевые слова: государство, аграрная политика, модернизация сельского хозяйства, плановые задания, семилетка, достижения, реорганизация системы управления.

M. U. Smiakhovich

Institute of History of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**MAIN DIRECTIONS OF THE USSR AGRICULTURAL POLICY DURING 1953–1964 YEARS
AND THE RESULTS OF THEIR IMPLEMENTATION IN THE BSSR**

(Communicated by Academician M. P. Kostyuk)

The author has come to a conclusion that the agrarian policy in the USSR and the BSSR was directed to a steep growth of agricultural industry, satisfaction of the consumer's food product requirements in 1953–1964 years. The modernization project of September 1953 was prepared for an extensive way of development of agricultural industry. A failed competition between the USSR and the USA in production of livestock production per capita in 1957–1961 years relied on this idea. During the period after the adoption of the third CPSU program, the Soviet agrarian policy has been focused on a powerful rise of agriculture, a solution of an agrarian question, a full satisfaction of the peasantry's needs. This required the state economic priority status for agriculture which was not done. At the same time, the activities and efforts of the Central Committee of the Communist Party of Byelorussia (CC CPB), the BSSR Council of Ministers, and the Belarusian agricultural science allowed the BSSR agricultural industry to carry out the plan targets of the Seven-Year Plan, which facilitated its further development.

The author of the article notes that the reorganization of a control system of the Soviet planned economy, which has been carried out in the USSR in 1962–1964 years, has been aimed at strengthening the efficiency and responsibility of the power for the decision of the tasks determined by the third CPSU program.

Keywords: state, agrarian policy, modernization of agricultural industry, plan targets, seven-year plan, achievements, reorganization of system of a management, experience.

Уводзіны. Сельская гаспадарка незалежнай Беларусі ўмела выкарыстоўвае аграпрамысловы патэнцыял, які быў створаны ў папярэдні перыяд. У суверэннай Беларусі сельская гаспадарка – адзін з прыярытэтаў дзяржаўнай палітыкі, поспехі ў развіцці беларускага аграпрамысловага комплексу (АПК) відавочныя, але назапашаны гістарычны вопыт патрэбна ўлічваць пад час вырашэння шэрага праблем, якія тармазілі развіццё савецкага АПК. Даследаванне кірункаў аграрнай палітыкі КПСС дае магчымасць адлюстраванне пэўных дасягненняў і праблемы ў вырашэнні аграрнага пытання, забеспячэнні інтарэсаў сялянства.

“Генеральная лінія” КПСС у пытанні развіцця сельскай гаспадаркі не вызначалася разнастайнымі падыходамі. Зацверджаны пяцігадовы план быў законам для адміністрацыйна-ўпраўленчых структур усіх узроўняў. На гэты конт на XXVI з’ездзе КПСС Л. Брэжнеў заявіў: “Партыя заўсёды разглядала план як закон. І не толькі таму, што ён зацвярджаецца Вярхоўным Саветам. План – гэта закон, таму што толькі яго прытрымліванне забяспечвае зладжаную працу ўсёй народнай гаспадаркі. ... План, безумоўна, павінен быць рэальным, збалансаваным. Але настолькі ж безумоўна ён павінен і выконвацца” [1, с. 50].

Адной з асноўных мэт пяцігадовых планаў было забеспячэнне інтарэсаў працаўнікоў калгасаў і саўгасаў, найперш у кірунку пераводу аграрнай вытворчасці на індустрыяльны шлях развіцця, стымулявання і аплаты працы, арганізацыі адпачынку і інш. “Усталёўваючы кошты рэалізацыі на прамысловую і сельскагаспадарчую прадукцыю, дзяржава рэгулюе размеркаванне вырабленага нацыянальнага прадукту, тэмпы пашыранага ўзнаўлення ў сельскай гаспадарцы, ажыццяўляе стымуляванне сельскагаспадарчай вытворчасці”, – адзначаў акадэмік Ф. Марцын-кевіч [2, с. 207].

Вывучэнню гісторыі савецкай аграрнай палітыкі ў СССР і БССР прысвяцілі свае працы А. Беязо, М. Багдэнка, Л. Бароўка, А. Бураўскі, В. Венжэр [3], В. Доркін і інш. Гэтае пытанне разглядалася і ў калектыўных шматтомных выданнях: “Гісторыя Беларускай ССР” [4], “Гісторыя Беларусі” [5], “История государства и права Белорусской ССР” [6], “История социалистической экономики СССР” [7]. Аднак у даследаваннях савецкага часу ацэнкі дзяржаўнай аграрнай палітыкі знаходзіліся пад уплывам класава-партыйнага падыходу. Як адзначае акадэмік М. Касцюк, характэрнай асаблівасцю савецкай гістарыяграфіі было тое, што “не спецыялісты-гісторыкі, а ўладныя структуры і іх функцыянеры вызначалі напрамкі распрацовак і ацэнкі гістарычных падзей, падганяючы ўсё гэта пад вырашэнне бягучых і, як ім уяўлялася, перспектывных ідэалагічных задач” [8].

Асноўнай задачай публікацыі з’яўляецца вызначэнне мэт, кірункаў і асаблівасцей аграрнай палітыкі ў СССР і яе выкананне на тэрыторыі БССР.

Асноўная частка. На пачатку 1950-х гадоў знізіліся тэмпы развіцця сельскай гаспадаркі, разлікі з калгаснікамі на працадні праводзіліся нерэгулярна. На 1 студзеня 1953 г. шмат беларускіх калгасаў не разлічыліся за 1952 г., сяляне не атрымалі 149 тыс. т хлеба, 119 тыс. т бульбы, 40 млн руб. грошай [6, с. 185]. Становішча калгаснага сялянства было гаротным.

Савецкая вёска чакала перамен. Яны пачаліся пасля таго, як КПСС узначаліў М. Хрушчоў. У верасні 1953 г. ён склікаў пленум ЦК КПСС, які зацвердзіў падрыхтаваныя мерапрыемствы. З іх дапамогай планавалася ажыццявіць маштабны мадэрнізацыйны праект, да 1962 г. гэта была асноўная мэта савецкай аграрнай палітыкі.

На наш погляд, у любым мадэрнізацыйным працэсе неабходна адрозніваць два кірункі. Першы звязаны з удасканаленнем і абнаўленнем сродкаў вытворчасці – машын, абсталявання, тэхналагічных працэсаў і інш. Другі мадэрнізацыйны пачатак спалучаны з пошукам і ўкараненнем новых форм арганізацыі і аплаты працы, якія стымулююць, да прыкладу, працу сялянства. У канчатковым выніку мэта мадэрнізацыі – павышэнне прадукцыйнасці працы і развіццё вытворчасці, у тым ліку і сельскагаспадарчай [9, с. 375–376].

У верасні 1953 г. было прынята некалькі рашэнняў, якія павінны былі стварыць неабходныя эканамічныя і сацыяльныя перадумовы з тым, каб дамагчыся поспеху ў рэалізацыі мадэрнізацыйнага праекта. Гэта знайшло адлюстраванне ў адпаведных пастановах, якія савецкімі даследчыкамі былі разгледжаны досыць шырока. Таму неабходна звярнуць увагу на прынцыповыя пытанні: на змены ў планаванні і забеспячэнні калгасаў і саўгасаў новымі сродкамі вытворчасці,

мерапрыемствы, накіраваныя на стымуляванне сялянскай працы, практычную дзейнасць дзяржаўнага кіраўніцтва ўсіх узроўняў па выкананні прынятых рашэнняў і вынікі мадэрнізацыйнага працэсу.

У дакладзе на пленуме, характарызуючы становішча ў сельскай гаспадарцы, першы сакратар ЦК КПСС М. Хрушчоў адзначыў, што ў пасляваенны час, каб прадухіліць заняпад калгасаў і саўгасаў, дзяржава не мела магчымасці накіроўваць у сельскую гаспадарку неабходную колькасць матэрыяльна-тэхнічных і фінансавых рэсурсаў. “У нас не было магчымасці забяспечыць адначасовае развіццё высокімі тэмпамі і цяжкай індустрыі, і сельскай гаспадаркі, і лёгкай прамысловасці”, – сказаў М. Хрушчоў [10, с. 11]. Затым ён вызначыў асноўны чынік правалу сталінскай аграрнай палітыкі. Гэта было парушэнне “прынцыпу матэрыяльнай зацікаўленнасці, ... прыроды арцельнай формы калгасаў” [10, с. 11–13], але ў 1958 г. выказаў думку, што гэта былі “памылкі ў кіраўніцтве сельскай гаспадаркай” [11, с. 336]. Яшчэ пазней была зроблена зусім іншая выснова. “Партыя асудзіла па сутнасці антыкалгасную палітыку цэн, якая праводзілася пры жыцці Сталіна. У той час нарыхтоўчыя цэны былі настолькі нізкія, што калгасы не маглі за кошт продажу прадукцыі пакрываць нават вытворчыя затраты. Праца большасці калгаснікаў не аплочвалася”, – заявіў М. Хрушчоў [12, с. 4].

Пасля верасня 1953 г. было вырашана сталінскую антыкалгасную (па сутнасці антысялянскую) палітыку цэнаў, прытым пад лозунгам умацавання саюза рабочых і сялян, выправіць з дапамогай новых кірункаў аграрнай палітыкі. Дзеля ўдасканалення механізма планавання быў зацверджаны пастаянны нарматыў – плошча ў 100 га. Акрамя таго, пад час вызначэння планавых заданняў калгасам і саўгасам органы Дзяржплана СССР, партыйнае і савецкае кіраўніцтва павінны былі ўсебакова ўлічваць эканамічныя і прыродныя фактары, якія ўплывалі на развіццё раслінаводства і жывёлагадоўлі ў кожнай гаспадарцы. Гэты кірунак аграрнай палітыкі вымагаў вырашэння вельмі актуальнай праблемы – спецыялізацыі аграрнай вытворчасці. У 1946–1952 гг. для сталінскага кіраўніцтва тэма спецыялізацыі калгасаў і саўгасаў не была актуальнай. Але ўжо ў 1954 г. у БССР разгарнулася будаўніцтва прадпрыемстваў харчовай і перапрацоўчай прамысловасці, што запатрабавала “прывязкі” сыравіннай базы, да прыкладу, да прадпрыемстваў па перапрацоўцы малака, вытворчасці цукру і інш.

У жніўні 1956 г. рашэннем бюро ЦК КПБ пад старшынствам сакратара ЦК КПБ М. Малініна была створана “Камісія па распрацоўцы мерапрыемстваў па павелічэнні вытворчасці прадукцыі сельскай гаспадаркі на 100 га зямлі па зонах Беларускай ССР” [13, арк. 195–198]. Да вырашэння праблемы былі прыцягнуты беларускія навукоўцы. У выніку напружанай працы былі складзены 42 картаграмы па прыродна-кліматыхных умовах гаспадарання, глебах Беларусі, эканамічным раяніраванні, карысных выкапнях. Гэта дало магчымасць падрыхтаваць мерапрыемствы па тых пытаннях, якія былі неабходны для правядзення тэрытарыяльна-зональнай спецыялізацыі сельскай гаспадаркі рэспублікі. Гэта быў яе першы этап. У 1960 г. міністр сельскай гаспадаркі СССР В. Мацкевіч падкрэсліў: “Цяпер на чарзе пераход да больш паглыбленай спецыялізацыі... асобных гаспадарак па вытворчасці тых ці іншых відаў прадукцыі” [14, с. 9]. Па нашым вызначэнні, у 1962 г. пачаўся другі этап у ажыццяўленні галіновай унутрыгаспадарчай вытворчатаэхналагічнай спецыялізацыі калгасаў і саўгасаў. У сакавіку 1963 г. пленум ЦК КПБ прыняў пастанову “Аб спецыялізацыі сельскай гаспадаркі Беларусі і мерах па паляпшэнні кіраўніцтва калгасамі і саўгасамі”, у якой гаварылася, што БССР павінна быць раёнам інтэнсіўнай мяса-малочнай жывёлагадоўлі, свінаводства і птушкагадоўлі [15, с. 433].

Важным кірункам аграрнай палітыкі былі змены ў галіне матэрыяльнага стымулявання сялянскай працы, калі пачалася выплата сялянскіх заробкаў грашовымі сродкамі праз штоквартальную выдачу авансаў (25 % ад налічанага заробку). Рэальную палёжку ад новай палітыкі сяляне адчулі праз тры гады, калі авансавыя выплаты пачалі праводзіць 3,4 тыс. беларускіх калгасаў (66 % да агульнай колькасці), калі абавязковыя штогадовыя пастаўкі мяса з калгаснага падворка скараціліся з 36 да 30 кг (на 16 %), малака – з 220 да 100 кг (на 54,5 %) [6, с. 314]. Яшчэ больш істотныя змены адбыліся ў 1959–1961 гг., калі ў калгасах БССР пачаўся пераход на новую сістэму гаспадарання. У справаздачы камісіі, створанай ЦК КПБ для вывучэння становішча ў калгасах Брэсцкай вобласці, адзначалася, што ў 1959 г. у вобласці на грашовую аплату працы

ўжо перайшло 29 калгасаў. Камісія станоўча ацаніла і рэкамендавала да пашырэння практычны вопыт калгаса “Маладая гвардыя” Брэсцкага раёна, які пачаў будаваць працу паляводаў і жы-вёлаводаў на аснове гаспадарчага разліку. Разам з тым, камісія прыйшла да высновы, што ў тых калгасах, дзе не ўкараняецца гаспадарчы разлік, у калгаснікаў “няма стымула для павышэння прадукцыйнасці працы” [16, арк. 47]. Дзякуючы намаганням партыйных камітэтаў, спецыялістаў навукова-даследчага Інстытута эканомікі і арганізацыі сельскай гаспадаркі пераход калгасаў на новую сістэму гаспадарання паскорыўся. У дакладной запісцы ЦК КПБ, адрасаванай у ЦК КПСС 4 красавіка 1961 г., першы сакратар ЦК КПБ К. Мазураў і Старшыня Савета Міністраў БССР Ц. Кісялёў паведамлялі, што ў рэспубліцы “вядзецца вялікая праца па ўкараненні гасразліку ў калгасах і саўгасах... Прымаюцца меры па пераводзе на гасразлік усіх аддзяленняў саўгасаў” [17, арк. 184]. Наступным крокам на шляху да ўкаранення гаспадарча-разліковай формы арганізацыі і матывацыі працы калгаснікаў сталі рашэнні XXII з’езда КПСС, які дэклараваў: “Вытворчая дзейнасць кожнага калгаса павінна ажыццяўляцца на аснове гаспадарчага разліку” [18, с. 258]. У дакладной запісцы сакратара Гродзенскага сельскага абкама партыі В. Міцкевіча, якая была адрасавана ў ЦК КПБ, адзначалася, што ў 1964 г. у калгасах вобласці па вопыту калгаса “Прагрэс” Гродзенскага вытворчага калгасна-саўгаснага ўпраўлення было створана 635 буйных гаспадарча-разліковых вытворчых участкаў (замест 1337 аддзяленняў, паляводчых брыгад і фермаў), з арганізацыяй у іх складзе 770 механізаваных звёнаў усяго цыкла вытворчасці канечнай прадукцыі ў паляводстве [19, арк. 246]. Такі ж працэс адбываўся і ў іншых абласцях БССР.

Новым кірункам аграрнай палітыкі стала змяншэнне падатковай нагрузкі на калгаснае сялянства, дзеля чаго было вырашана “спісаць” сялянскую запазычанасць мінулых гадоў па абавязковых пастаўках прадуктаў жывёлагадоўлі, знізіць зямельны падатак калгаснікаў, якія не мелі кароў, у 1953 г. на 50 %, у 1954 г. – на 30 % [6, с. 417]. Акрамя таго, былі прыняты рашэнні, скіраваныя на індустрыялізацыю сельскай гаспадаркі. Планавалася ўзмацніць і пашырыць працу па электрыфікацыі калгасаў, саўгасаў і МТС, павялічыць пастаўкі на вёску новай тэхнікі, угнаенняў, абсталявання, спецыялістаў. Дзяржава запланавала ў перыяд з 1954 г. па 1 мая 1957 г. паставіць сельскай гаспадарцы не менш за 500 тыс. трактароў агульнага прызначэння ў 15-сілавым вылічэнні і 250 тыс. фізічных прапашных трактароў [10, с. 57], шмат іншай новай тэхнікі.

У сялянскай рэчаіснасці таго часу рашэнні, якія былі прыняты ў 1953 г., выглядалі незвычайна. Упершыню сяляне пачулі, што ў іх з’явілася права на пастаяннай аснове атрымліваць рэальныя грашовыя сродкі, упершыню дзяржава пачала дапамагаць вясцоўцам весці сваю асабістую гаспадарку. Але больш за іншых хрушчоўскія ініцыятывы падтрымала калгаснае кіраўніцтва, асабліва намер адкінуць практыку навешвання ярлыкоў – “вораг калгаснага ладу”, пагрозы і рэпрэсіі ў адносінах да тых кіраўнікоў, хто не выконваў планавыя заданні і прызвычаіўся расцягваць калгасную маёмасць.

На нашу думку, у 1953 г. вызначэнне М. Хрушчовым асноўнай прычыны правалу сталінскай аграрнай палітыкі было аднабаковым і неглыбокім. Калі сказаць па сутнасці справы, то новае кіраўніцтва ЦК КПСС разлічвала, што дастаткова палегчыць фінансава-падатковую эксплуатацыю сялянства, дэлегаваць калгаснаму кіраўніцтву некаторыя правы, якімі дагэтуль валодала дзяржава, як справы ў сельскай гаспадарцы пойдучы ў гару. Надалей жыццёвая практыка засведчыла, што гэтыя разлікі і намаганні далі станоўчы вынік, але ён быў кароткачасовым.

Праз год пасля вераснёўскага пленума ЦК КПСС у мэтах паскарэння развіцця сельскай гаспадаркі, павелічэння вытворчасці збожжа, мяса-малочнай прадукцыі М. Хрушчоў выступіў з ініцыятывай асваення цалінных і абложных зямель у асноўным шляхам будаўніцтва новых саўгасаў. Крытыкі палітыкі М. Хрушчова засяроджвалі ўвагу на тым, што ён зрабіў стаўку на шырокае ўкараненне экстэнсіўных метадаў гаспадарання. Сапраўды, ў 1951–1963 гг. на долю экстэнсіўных фактараў прыходзілася 68,2 % валавага прыросту прадукту савецкай эканомікі [20, с. 305]. Папракалі яго і тым, што ідэя асваення цаліны праводзілася ў жыццё спантанна і жадаемых вынікаў не прынесла. Таму нягоды і нават ахвяры гэтай кампаніі былі марнымі [21, с. 193].

Але і ў першым і ў другім выпадках крытычныя ацэнкі гэтай хрушчоўскай ініцыятывы не былі аб’ектыўнымі. Па-першае, М. Хрушчоў ведаў, што экстэнсіўны метады гаспадарання вы-

карыстоўвалі развітыя капіталістычныя краіны, у тым ліку і ЗША, калі ў гэтай краіне ў 1950-х гадах ішоў працэс пашырэння пасяўных плошчаў. Па-другое, на той час у СССР склалася драматычнае становішча з вытворчасцю хлеба. У 1953 г. у СССР быў нарыхтаваны 31 млн т збожжа, а на харчовыя і гаспадарчыя патрэбы расходавана 32 млн т [7, с. 378, 379]. Безумоўна, адзіным адносна хуткім выйсцем для краіны было маштабнае асваенне цалінных і абложных зямель у Казахстане, Сібіры, Паволжы і на Алтаі, якое пачалося ў 1954 г. Некаторыя члены ЦК КПСС – Малянкоў, Молатаў, Кагановіч крытычна ставіліся да гэтай ініцыятывы, але кіраўніцтва Савецкай Беларусі яе падтрымала, з Беларусі на цаліну было адпраўлена каля 60 тыс. чалавек, шмат аўтатрактарнай тэхнікі, іншых рэсурсаў.

У цэлым хрушчоўскія разлікі спраўдзіліся. Эканамічны эффект ад засваення цаліны быў відавочны. Усяго ў СССР у гаспадарчы зварот было ўведзена каля 42 млн га новых зямель, на якіх было створана 425 саўгасаў, сабекошт вытворчасці адной тоны каласавых на цаліне быў амаль у 2 разы ніжэй за сярэдні паказчык па СССР [7, с. 384, 385]. Усяго за 20 гадоў цаліна дала краіне каля 31 млрд пудоў хлеба, з іх 15,5 млрд пудоў прыпала на Казахстан. Вельмі важным быў і іншы эффект. На яго ў гістарычных выданнях амаль не звярталася ўвагі, а менавіта: 1 студзеня 1958 г. гаспадаркі калгаснікаў (калгасныя двары) былі поўнасьцю вызвалены ад абавязковых паставак сельскагаспадарчых прадуктаў дзяржаве.

Аднак асваенне цаліны запатрабавала значных фінансавых і матэрыяльна-тэхнічных рэсурсаў. У сувязі з гэтым на калгаснае будаўніцтва ў іншых рэспубліках звярталася менш увагі. Таму ў БССР вынікі выканання заданняў пятай пяцігодкі былі правальнымі. У сярэднім ураджайнасць зерневых за гэтую пяцігодку ў БССР ва ўсіх катэгорыях гаспадарак склала толькі 5 ц/га (замест 17 ц/га), ільну – 2,4 ц/га (замест 4 ц/га), бульбы – каля 100 ц/га (замест 155 ц/га па плане) [22, с. 88, 100, 101]. Толькі па асобных паказчыках (павелічэнне пагалоўя кароў, пашырэнне пасяўной плошчы бульбы) заданні пятай пяцігодкі былі выкананы. М. Хрушчоў гэта не задавальняла і ў 1956 г. ён зрабіў кадравыя перастаноўкі, першым сакратаром ЦК КПБ быў абраны К. Мазураў.

У лютым 1956 г. М. Хрушчоў правёў XX з’езд КПСС. Разам з іншымі, гэты з’езд разглядзеў пытанне аб прыняцці заданняў шостага пяцігодкі. У дырэктывах было вызначана, што галоўнай задачай шостага пяцігодкі ў галіне сельскай гаспадаркі з’яўляецца круты ўздым сельскагаспадарчай вытворчасці. Дзеля таго, каб забяспечыць такі ўздым, савецкай краіне патрэбна было за пяць гадоў павялічыць прадукцыйнасць працы ў калгасах прыкладна ў 2 разы [23, с. 117, 156]. К. Мазураву неабходна было павялічыць вытворчасць збожжавых культур у параўнанні з 1955 г. у 2,9 раза, ільновалакна – у 1,4 раза, бульбы – у 1,7 раза, цукровых буракоў – у 6 разоў, мяса – у 1,8 раза, малака – у 2 разы [23, с. 170].

Спраба спаборніцтва з ЗША на ніве аграрнай вытворчасці. Пасля XX з’езда члены прэзідыума ЦК КПСС разумелі, што павелічэнне вытворчасці сельскагаспадарчай прадукцыі ў 2 разы запатрабуе ўзмацнення арганізатарскай працы партыйна-дзяржаўнага кіраўніцтва СССР і ўсіх савецкіх рэспублік. Таму ў мэтах мабілізацыі адміністрацыйна-ўпраўленчага персаналу, працоўных калектываў калгасаў краіны на вырашэнне харчовага пытання вясной 1957 г. пачала “прасоўвацца” новая ініцыятыва. 22 мая 1957 г. у Ленінградзе адбылася нарада работнікаў сельскай гаспадаркі Паўночна-Заходняга рэгіёна РСФСР, на якой выступіў М. Хрушчоў. “Мы дзёрзнулі кінуць выклік Амерыцы ў важнейшай эканамічнай вобласці. Каб дагнаць ЗША па вытворчасці мяса на душу насельніцтва, нам трэба павялічыць яго вытворчасць у 3,2 разы ў параўнанні з 1956 годам... Думаю, калі мы гэта аб’явім, у кожнага з’явіцца жаданне ўступіць у барацьбу, і кожны захоча штосьці зрабіць, каб дапамагчы свайму калгасу, саўгасу, раёну, дапамагчы сваёй вобласці, рэспубліцы, у цэлым краіне і вырашыць гэтую задачу раз і назаўжды”, – абвясціў М. Хрушчоў [24, с. 1].

Даследаванне фактычнага матэрыялу дазволіла ўстанавіць, што ідэя спаборніцтва была выказана старшынёй калгаса імя Камінтэрна Мічурынскага раёна Тамбоўскай вобласці Я. Андрэвай вясной 1957 г. на нарадзе ў Варонежы [25, с. 2]. Пасля 24 мая 1957 г. у СССР разгарнулася шырокая прапагандысцкая кампанія, яе вынікі былі падведзены ў чэрвені 1957 г., калі пленум ЦК КПСС прыйшоў да высновы, што ініцыятыва па спаборніцтве з ЗША сустрэла “падтрымку

і адабрэнне ўсяго савецкага народа” [23, с. 277]. І ўсё ж новыя вытворчыя паказчыкі, якія былі зацверджаны кіраўніцтвам усіх саюзных рэспублік, абласцей, раёнаў, калгасаў і саўгасаў на 1957 г., не былі дасягнуты. Гэтаму перашкодзіла моцная засуха, якая ў 1957 г. ахапіла Ніжняе і Сярэдняе Паволжжа, Паўднёвы Урал і Казахстан.

М. Хрушчоў лічыў, што ў кіраўніцтве сельскай гаспадаркай нельга абаяцца толькі на планавыя дырэктывы, рашэнні з’ездаў і пленумаў ЦК КПСС. У гэтай справе найлепшы вынік дае жывая арганізатарская работа з людзьмі, таму кожны партыйны кіраўнік павінен дасканалы ведаць справу, а працоўныя калектывы калгасаў патрэбна “вучыць і натхняць” [26, с. 305.] Кіруючыся прынцыпам “вучыць і натхняць”, 19 студзеня 1958 г. ён прыехаў у Мінск. Дзяржаўныя ўзнагароды, якія ён прывёз перадавікам вытворчасці, павінны былі сялян натхняць. Званне Героя Сацыялістычнай Працы адразу атрымалі 32 чалавекі, а ордэнамі і медалямі была ўзнагароджана вялікая група калгаснікаў – 4970 чалавек [27, с. 1.] Безумоўна, гэты былі заслужаныя ўзнагароды. Да прыкладу, у 1950 г. у калгасе “Перамога” Бабруйскага раёна стала даяркай Аляксандра Рыгораўна Скакун. У 1954 г. ад кожнай з 17 замацаваных за ёю кароў, яна за год надаіла па 1800 кг малака, а ў 1957 – ужо па 5 тыс. кг, за гэты працоўны подзвіг яна была ўшанавана званнем Героя Сацыялістычнай Працы [28, с. 50–55].

Пад час візіту М. Хрушчоў сустракаўся і гутарыў з наватарамі і лідарамі вытворчасці ў калгасах “Новы быт” і імя Гастэлы, затым правёў нараду перадавікоў сельскай гаспадаркі. Рэспубліка была ўсхвалявана шчодрасцю цэнтральнага кіраўніцтва СССР, таму да выступлення М. Хрушчова беларусы ўважліва прыслухоўваліся. У пачатку прамовы ён агучыў паказчыкі па вытворчасці прадукцыі, якія былі атрыманы ў БССР, параўнаў іх з паказчыкамі 1956 г. У 1957 г. у калгасах Беларусі было атрымана на 100 га сельгасугоддзяў мяса ў жывой вазе 16,1 ц, або на 27 % больш, чым у 1956 г., сярэдні ўдой малака ад каровы ў 1954 г. быў 897 кг, а ў 1957 г. – 1575 кг. М. Хрушчоў заўважыў: “Вось вашы паказчыкі. Яны пакуль скромныя” і дадаў: “У вас, таварышы, ... мала кароў... На 100 га зямлі ў калгасах прыпадае 6 кароў, а ў калгаснікаў – 12,... у 2 разы больш” [29, с. 508, 511]. У прамове М. Хрушчоў адзначыў, што цэнтральнай праблемай у жывёлагадоўлі з’яўляецца вытворчасць кармоў. Шмат увагі ён надаў кукурузе. “Я гаварыў раней і хачу паўтарыць цяпер: няма іншай культуры, якая так аплочвае працу, як кукуруза... Кукурузу ў Беларусі трэба сеяць... Таварышы, я параіў бы Беларусі сеяць цукровыя буракі... Беларусь павінна ўзяцца за вырошчванне буракоў”, – сказаў М. Хрушчоў [29, с. 512, 517]. Была звернута ўвага і на далейшы лёс машынна-трактарных станцый. “Існуюць два гаспадары на адной зямлі – калгасы і МТС. А там дзе два гаспадары, – не можа быць добрага парадку... Паўстае пытанне, ці не лепш машыны прадаць калгасам,” – сказаў М. Хрушчоў [29, с. 522]. Рашэнне аб продажы было прынята ў лютым 1958 г. і гісторыя МТС завяршылася.

Практычная рэалізацыя новых кірункаў аграрнай палітыкі савецкай дзяржавы станоўча адбілася на выніках гаспадарання. За 1954–1958 гг. валавая прадукцыя сельскай гаспадаркі СССР павялічвалася ў сярэднегадавым вылічэнні на 8,6 % [3, с. 44], Беларускай ССР – на 6,4 % [4, с. 202]. Гэта быў адзін з самых спрыяльных перыядаў развіцця савецкай вёскі (пры нэпе – 10 %) [5, с. 256]. Вырасла ўраджайнасць збожжавых, асабліва пшаніцы. У 1958 г. ураджайнасць пшаніцы ў СССР склала 16,2 ц/га [7, с. 421], а ў ЗША у 1960 г. яна склала 17,6 ц/га [30, с. 67], у 1958 г. СССР прадаў на знешніх рынках 5,1 млн т зерня [7, с. 420]. Але акрамя станоўчых вынікаў, засталіся і невырашаныя праблемы. У 1959 г. у калгасах і саўгасах БССР на 100 га сельгасугоддзяў утрымлівалася 17,8 галоў буйной рагатай жывёлы, у тым ліку па 7,1 галавы кароў [22, с. 80], г. зн. запланаваныя паказчыкі (адпаведна 20 і 10 галоў), і не толькі гэтыя, не былі выкананы. У цэлым тэмпы развіцця сельскай гаспадаркі СССР, а таксама і БССР не адпавядалі ідэі крутога ўздыму гэтай галіны, задэклараванаму М. Хрушчовым у верасні 1953 г., не адпавядалі яны і выкліку, кінутаму ЗША.

Безумоўна, калі члены прэзідыума ЦК КПСС абмяркоўвалі вынікі эканамічнага развіцця краіны за 1954–1958 гг., яны, у першую чаргу, звярталі ўвагу на невырашаныя праблемы. Аднак да 1962 г. яшчэ быў запас часу, былі і пэўныя поспехі. У снежні 1959 г. пленум ЦК КПСС разгледзеў пытанне “Аб далейшым развіцці сельскай гаспадаркі” і адзначыў, што ў 1959 г. у СССР было выраблена 62 млн т малака, а вытворчасць масла смятанкавага склала 4 кг на душу

насельніцтва. Гэтыя паказчыкі перавышалі адпаведныя паказчыкі ЗША, дзе ў 1959 г. вытворчасць масла смятанкавага склала 3,7 кг на душу насельніцтва [18, с. 19]. Таму М. Хрушчоў разлічваў, што ў саборніцтве з фермерамі ЗША савецкае калгаснае сялянства здолее перамагчы.

На нечарговым XXI з'ездзе КПСС прмова М. Хрушчова была прысвечана “вялікім перамогам савецкага народа”, здзейсненым пад яго кіраўніцтвам. Ён паставіў пытанне – у якія тэрміны можна будзе пераадолець адставанне СССР, калі прадукцыйнасць працы ў прамысловасці ЗША вышэй чым у СССР ў 2–2,5 разы, у сельскай гаспадарцы – прыкладна ў 3 разы? Яго адказ быў адназначны – рашаючую ролю адыгрываюць тэмпы развіцця вытворчасці, за сямігодку ў СССР яны ў сярэднегадавым вылічэнні складуць 8,6 %, у ЗША – прыкладна 2 %. “Высокія тэмпы – гэта агульная заканамернасць сацыялізму”, – сказаў М. Хрушчоў [31, с. 109]. У сувязі з кінутым раней выклікам ён паўтарыў, што з гэтага моманту кожная партыйная арганізацыя павінна праявіць ініцыятыву дзеля таго, каб пераўзыйсці прадукцыйнасць працы амерыканскіх фермераў [31, с. 133]. Адпаведна заданні рэспублікам былі выданы вельмі напружаныя. Дырэктывы XXI з'езда КПСС, адрасаваныя кіраўніцтву БССР, у 1965 г. прадугледжвалі павелічэнне аб'ёму вытворчасці (у параўнанні з 1958 г.) ільновалакна ў 1,3 раза, бульбы – у 2,1 раза, цукровых буракоў – у 3,2–3,6 раза, збожжа – у 2,3–2,6 раза, мяса і малака – у 1,9–2 раза [31, с. 459]. На гэтым М. Хрушчоў не спыніўся, у 1962 г. яго планы па крутым уздыме сельскагаспадарчай вытворчасці былі прапісаны і ў партыйнай праграме.

Новыя кірункі аграрнай палітыкі. У справаздачным дакладзе на XXII з'ездзе КПСС кіраўніцтва ЦК КПСС дэкларавала, што аснову далейшай аграрнай палітыкі складае дасягненне наступнай мэты, а менавіта: арганізацыя магутнага ўздыму вытворчых сіл сельскай гаспадаркі, што дазволіць вырашыць дзве асноўныя, цесна звязаныя паміж сабой задачы: дасягнуць дастатку высокакаснага харчавання для насельніцтва і сыравіны для прамысловасці [32, с. 76]. Галоўным кірункам палітыкі магутнага ўздыму была задэкларавана электрыфікацыя, усебаковая механізацыя і інтэнсіфікацыя вытворчасці, укараненне навейшых тэхналогій, дасягненняў аграрнай навукі, у тым ліку беларускай, у галіне раслінаводства і жывёлагадоўлі, вытворчасці кармоў і інш. У мэтах умацавання калгасаў дыпламаванымі спецыялістамі, вырашэння сацыяльных пытанняў калгасы былі аб'яўлены “школай камунізму” [32, с. 77] для сялянства. Па разліках кіраўніцтва, калгаснікі за 10-гадовы перыяд навучання ў гэтай “школе” павінны былі ўзброіцца новымі тэхналогіямі, павысіць свой прафесіяналізм і павялічыць агульны аб'ём вытворчасці прадукцыі сельскай гаспадаркі за 10 гадоў прыкладна ў 2,5 раза, а за 20 гадоў – у 3,5 раза. Прадукцыйнасць працы павінна была вырасці адпаведна у 2,5 і 5–6 разоў [32, с. 78]. Калі больш крытычна ацаніць запраграмаваныя паказчыкі, неабходна адзначыць, што трэцяя праграма КПСС утрымлівала шэраг істотных недахопаў. Па-першае, амаль не пралічваліся і эканамічна не абгрунтаваліся складаныя эканамічныя пытанні, якія патрабавалася вырашыць “раз і назаўжды”. Сельская гаспадарка, да прыкладу, не была нават электрыфіцыравана, яна не была забяспечана кваліфікаванымі кадрамі, калгасы толькі-толькі пачалі самастойна карыстацца машынна-трактарнай тэхнікай, яны не мелі сваёй рамонтнай базы, інжынерна-тэхнічных кадраў. Без уліку гэтых фактараў разлічваць на выкананне праграмных задач па павышэнні прадукцыйнасці працы, дасягненні валавых паказчыкаў па вытворчасці збожжавых культур, малака і мяса было заўчасным. Па-другое, той узровень, на якім у 1961 г. знаходзілася сельгасвытворчасць у СССР, таксама не мог быць абраны ў якасці “пункту адліку” ў вызначэнні перспектывы і паказчыкаў яе далейшага развіцця. Таму што па асноўных вытворчых паказчыках у 1961 г. СССР не ўваходзіў у лік лідараў сусветнай эканомікі.

Па-трэцяе, былі дапушчаны пралікі ў вызначэнні эканамічных прыярытэтаў. Статус эканамічнага прыярытэту у трэцяй праграме КПСС атрымалі прамысловасць і гарадская гаспадарка, а аграрная вытворчасць сюды не ўвайшла. У далейшым гэты пралік аказаў рашаючы ўплыў на развіццё ўсёй савецкай планавай сістэмы гаспадарання. Недахопам трэцяй праграмы КПСС было і іншае. “Праграма КПСС уяўляецца мне нейкім гіганцкім каркасам, накіраваным увесь, узводзячыся велізарным будынкам, пакрытым сваеасаблівымі рыштаваннямі, узнімаючыся па якіх з прыступкі на прыступку, працоўныя нашай краіны сваёй працай ствараюць багацці, запаўняюць каркас, узводзяць будынак камунізму”, – гаварыў М. Хрушчоў [26, с. 299].

Відавочна, што ў прынятай партыйнай праграме не надавалася неабходнай увагі актывізацыі чалавечага фактара, калгаснаму сялянству было вызначана месца шэраговага будаўніка камунізму. Нагадаю, што ў 1986 г. XXVII з'езд КПСС на аснове асэнсавання гістарычнага вопыту задэклараваў, што “паспяховае вырашэнне намечаных задач партыя звязвае з павышэннем ролі чалавечага фактара” [33, с. 140]. У 1961 г. гэтага не было зроблена, у выніку трэцяя праграма партыі так і засталася ідэалагічным “каркасам”, якую савецкія сяляне не здолелі запоўніць харчовым багаццем.

Рэарганізацыя сістэмы партыйна-дзяржаўнага кіраўніцтва савецкай эканомікай. Адзначым, што ў справаздачным дакладзе на XXII з'ездзе аб выніках гаспадарання ў БССР нічога не гаварылася. Таму зусім невыпадкова, што пасля з'езда і прыняцця партыйнай праграмы, М. Хрушчоў зноў вырашыў наведаць Беларусь. 10 студзеня 1962 г. ён прыехаў у Мінск, склікаў нараду. Спачатку ўзялі слова кіраўнікі гаспадарак і спецыялісты. У сваім выступленні звеннявы калгаса “Кастрычнік” Хойніцкага раёна В. Кот заўважыў: “Мікіта Сяргеевіч параіў калгасам і саўгасам па-сапраўднаму заняцца вырошчваннем кукурузы. Ажыццяўляючы гэтыя ўказанні, мы пачалі высаваць кукурузу... З кожнага гектара сабрана 835 ц зялёнай масы з пачаткамі... Пачынаючы з мінулага года сельгасарцель пачала сеяць цукровыя буракі”. Начальнік упраўлення Міністэрства сельскай гаспадаркі БССР, кандыдат сельскагаспадарчых навук С. Цішкоў адзначыў, што “ў Беларусі кукуруза доўгі час была не ў пашане”, але пасля нарады 1958 г. у гэтай справе пачаўся “сапраўдны пералом” [34, с. 1, 2].

Пасля старшынь, брыгадзіраў і звеннявых выступіў К. Мазураў. Ён заявіў, што калгасы і саўгасы рэспублікі атрымліваюць “недапушчальна нізкія ўраджаі збожжавых культур, збожжа ўласнай вытворчасці для патрэб жывёлагадоўлі ў калгасах і саўгасах не хапае. Значную частку фуражу яны купляюць у дзяржавы” [35, с. 1], усё гэта негатыўна адбівалася на вытворчасці мяса-малочнай прадукцыі. “Гэта вынік безадказнасці кіруючых партыйных і савецкіх органаў рэспублікі, гэта вынік нізкай дысцыпліны і неарганізаванасці, якія мелі месца ў нашай рабоце ў мінулым годзе. Ніякіх іншых тлумачэнняў даць нельга”, – падсумаваў К. Мазураў [35, с. 1].

Затым было выступленне М. Хрушчоў. На гэты раз ніякіх узнагарод у Беларусь ён не прывёз. “Павінен вам сказаць, што Цэнтральны Камітэт не задаволен становішчам спраў у сельскай гаспадарцы Беларусі. За апошнія тры-чатыры гады калгасы і саўгасы рэспублікі па сутнасці топчуцца на месцы з вытворчасцю сельскагаспадарчых прадуктаў” [26, с. 300–301]. Ён назваў некаторыя лічбы. У адпаведнасці з заданнем сямігодкі ў 1961 г. вытворчасць збожжа ў рэспубліцы павінна была скласці 206 млн пудоў. Фактычна было атрымана 135 млн пудоў (недабор склаў 71 млн пудоў, або 34,4 % планавага задання). Вытворчасць ільну ў 1961 г. павінна была скласці 1 млн 79 тыс. ц, фактычна склала 867 ц (недабор склаў 19,6 %). Незадавальнялі справы і ў жывёлагадоўлі. У 1959 г. у Беларусі было атрымана мяса (у забойнай вазе) 140 тыс. т; у 1960 г. – 148 тыс. т, у 1961 г. – таксама 148 тыс. т. “Вось вынік вашай работы ... Тры гады няма руху наперад... За мінулы год у калгасах і саўгасах рэспублікі загінула 516 тыс. свіней, або 15 % усяго пагалоўя, у тым ліку 395 тыс. парасят, або 20 %. Гэта што, таварышы, – нармальнае з'ява... Не, гэта – абуральнае вядзенне сельскай гаспадаркі, вынік адсутнасці кармоў, дрэннага дагляду жывёлы”, – заключыў М. Хрушчоў [26, с. 301, 306]. Рэзкае крытыка прагучала пад час абмеркавання пытання аб травапольнай сістэме земляробства. “Загрузлі некаторыя вучоныя ў травапольным балоце... За перыяд з 1953 па 1961 г. плошча збожжавых у Беларусі скарацілася на 800 тыс. га. У той жа час пасевы траў павялічыліся з 477 тыс. га да 1 млн 175 тыс. га... Задумайцеся, таварышы, над гэтымі лічбамі! На 800 тыс. га скараціліся плошчы збожжавых ў рэспубліцы! Куды ж вы глядзелі, тав. Мазураў, хто кіруе рэспублікай – Цэнтральны камітэт партыі і Савет Міністраў Беларусі ці травапольшчыкі?... Кіраўнікі Беларускай рэспублікі па сутнасці перасталі займацца вытворчасцю збожжа” [26, с. 324–326]. Пасля гэтай нарады К. Мазураў павінен быў зрабіць адпаведныя высновы адносна вырошчвання ў Беларусі каласавых культур, цукровых буракоў, бульбы, выкаранення травапольных севазваротаў, вытворчасці мяса свініны і інш.

У той жа час матэрыялы шматлікіх абмеркаванняў становішча ў сельскай гаспадарцы засведчылі аб адарванасці старых, прызначаных яшчэ І. Сталіным кадраў, ад патрэб сельскай гаспадаркі. Спрактыкаваныя наменклатуршчыкі ўжо не баяліся рэпрэсій і кіравалі раёнамі

і абласцямі метадам тэлефонаграм і рабочых нарад. У выніку ў 1961 г. краіна не здолела дагнаць ЗША па вытворчасці мяса і малака на душу насельніцтва, што стала прадметам народнага гумару і моцна падрывала аўтарытэт савецкага лідара. Акрамя таго, абапіраючыся на вынікі дзейнасці партыйна-дзяржаўнага кіраўніцтва на працягу 1958–1961 гг., М. Хрушчоў прыйшоў да несудыяльнай высновы: калі нічога не памяняць у рэспубліканскім, абласным, раённым кіраўніцтве сельскай гаспадаркай, праз 10 год пасля прыняцця трэцяй праграмы КПСС вынік можа быць такім жа правальным.

Гэта падштурхнула савецкага лідара да новай ініцыятывы ў кірунку арганізацыйна-кадравай палітыкі. “Калі стане ясна, што вытворчасць мяса, малака і іншых прадуктаў не расце, то трэба зрабіць выснову адносна такога кіраўніка... Мы павінна аб’явіць бязлітасную барацьбу балбатунам, усякага роду пустазвонам”, – настаўляў М. Хрушчоў партыйнае кіраўніцтва саюзных рэспублік [26, с. 294]. Такая барацьба пачалася ў сакавіку 1962 г., калі адбыўся пленум ЦК КПСС, які разглядзеў пытанне “Сучасны этап камуністычнага будаўніцтва і задачы партыі па паляпшэнні кіраўніцтва сельскай гаспадаркай”. “Пры існуючай сістэме кіраўніцтва мы не робім належнага ўплыву на арганізацыю вытворчасці ў калгасах і саўгасах. Мы звяртаемся з агульнымі заклікамі, збіраем нарады, прымаем часам нядрэнные рашэнні. А далей што? У нас няма органа, які б забяспечваў выкананне выпрацаваных рашэнняў, і мы абмяжоўваемся тым, што кідаем заклік: наперад, таварышы! А хто і як пайшоў наперад, ці ўсе атрады рушылі, ці ўсё падрыхтавана для вытворчасці неабходнай колькасці прадуктаў? Аб гэтым ніхто не ведае і адказнасці не патрабуе, ды і няма з каго патрабаваць”, – заявіў М. Хрушчоў [26, с. 403].

Пасля гэтага былі выкладзены новыя прапановы, якія тычыліся змен у сістэме кіраўніцтва. М. Хрушчоў сказаў: “Неабходна скончыць з некіруемасцю ў сельскай гаспадарцы, з самацёкам... Прэзідыум ЦК выносіць на абмеркаванне такую прапанову: стварыць у абласцях калгасна-саўгасныя ўпраўленні... Думаю, гэта правільна” [26, с. 409]. У прынятай пастанове было вырашана стварыць у рэспубліках тэрытарыяльныя міжраённыя калгасна-саўгасныя ўпраўленні па кіраўніцтве сельскагаспадарчай вытворчасцю і, пачынаючы з ЦК, партыйныя камітэты па сельскай гаспадарцы. Пасля гэтага летам 1962 г. пачалася паспешлівая праца па рэарганізацыі кіраўніцтва сельскай гаспадаркай, калі 2–3 раёны аб’ядноўваліся ў адно спецыялізаванае калгасна-саўгаснае вытворчае ўпраўленне. К канцу 1962 г. у БССР было створана 77 такіх упраўленняў. Гэтая рэарганізацыя выклікала пэўную незадаволенасць адміністрацыйна-ўпраўленчага персаналу калгасаў і саўгасаў, яна парушыла існаваўшую сістэму адміністрацыйна-палітычнага раяніравання. Тэрытарыяльна раённыя органы ўлады значна аддаліліся, у новых умовах кіраўніцтву калгасаў і саўгасаў правадзіць нарады, атрымліваць розныя дазволы, узгадняць бягучыя, тыднёвыя і іншыя планы гаспадарчай дзейнасці стала складаней.

У сваю чаргу М. Хрушчоў разумее, што пасля стварэння калгасна-саўгасных упраўленняў надыйшоў час вырашыць пытанне аб далейшай рэарганізацыі ўжо партыйных камітэтаў. Для М. Хрушчова гэтае пытанне было вельмі адказным. Калі ранейшыя яго рашэнні тычыліся ў асноўным гаспадарчага боку, то гэтае закранала палітычную складовую партыйнага кіраўніцтва. Чарговы пленум быў скліканы 19 лістапада 1962 г. У прамове М. Хрушчоў выклаў аргументаваную канцэпцыю перабудовы ўсіх партыйных структур. “Цяпер старыя арганізацыйныя структуры ўжо робяцца ў пэўным сэнсе тормазам у справе кіраўніцтва партыі вытворчасцю... Усё гэта параджае кампанейскі характар у партыйным кіраўніцтве”, – сказаў М. Хрушчоў [36, с. 319, 320]. Яго прапанова тычылася падзелу партыйных структур на прамысловыя і сельскагаспадарчыя.

Пасля пленума ў БССР на рэспубліканскім узроўні было створана два адпаведных бюро ЦК рэспублікі: прамысловае і сельскагаспадарчае, у абласцях было створана два абкамы, пачалі працу два абласныя аддзелы народнай асветы, аховы здароў’я, міліцыі, фінансаў, культуры. Колькасць дзяржаўных устаноў павялічылася ў два разы. На нашу думку, рэарганізацыя савецкай сістэмы партыйна-дзяржаўнага кіраўніцтва прамысловасцю і сельскай гаспадаркай на той час з’яўлялася актуальнай і наспелай праблемай. Задачи, якія былі вызначаны трэцяй праграмай КПСС, нельга было вырашыць без павышэння эфектыўнасці палітычнай, эканамічнай, гаспадарчай дзейнасці партыйна-дзяржаўнага кіраўніцтва СССР, усіх савецкіх рэспублік, у тым ліку і БССР, прычым усіх узроўняў.

І ўсё ж аднымі адміністрацыйнымі мерамі карэнным чынам павысіць выніковасць працы сістэмы дзяржаўнага ўпраўлення было немагчыма. Таму зусім заканамерна, што поруч з рэарганізацыяй, у цэнтры ўвагі М. Хрушчова была праблема інтэнсіфікацыі сельскагаспадарчай вытворчасці. Без вырашэння гэтага наспелага і актуальнага пытання, савецкаму калгасніку надалей спаборнічаць з амерыканскім фермам было вельмі цяжка. У лютым 1964 г. пытанне “Аб інтэнсіфікацыі сельскагаспадарчай вытворчасці на аснове шырокага прымянення ўгнаенняў, развіцця арашэння, комплекснай механізацыі і ўкаранення дасягненняў навукі і перадавога вопыта для хутчэйшага развіцця вытворчасці сельскагаспадарчай прадукцыі” [37, с. 388] стала прадметам абмеркавання чарговага пленума ЦК КПСС. Курс на інтэнсіфікацыю быў аб’яўлены генеральнай лініяй партыі ва ўздыме сельскай гаспадаркі. Складовай інтэнсіфікацыі была прызнана далейшая электрыфікацыя, паглубленая спецыялізацыя аграрнай вытворчасці, яе хімізацыя і іншыя кірункі. На жаль, пасля лістапада 1964 г. гэтую праблему брэжнеўскае кіраўніцтва перастала педаліраваць, яно ўзгадала пра яе ў 1981 г., калі было ўжо позна.

Неабходна звярнуць увагу на тое, што курс на інтэнсіфікацыю не з’яўляўся дэкларатыўным. На гэты час БССР валодала значным патэнцыялам аграрнай навукі: у 1965 г. у БССР налічвалася 8 навукова-даследчых інстытутаў, 5 абласных вопытных станцый, 4 вышэйшыя навучальныя ўстановы, дзе працавалі 1385 навуковых супрацоўнікаў, у тым ліку 25 дактароў навук і 266 кандыдатаў навук. Па выніках даследаванняў, якія былі выкананы ў 1962–1964 гг., навукова-даследчыя інстытуты рэкамендавалі да шырокага ўкаранення 80 тэматычных распрацовак па земляробстве, жывёлагадоўлі, эканоміцы і арганізацыі вытворчасці, механізацыі і электрыфікацыі сельскай гаспадаркі і іншых напрамках развіцця аграрнай вытворчасці [38, арк. 2].

Калі падсумаваць вынікі аграрнай палітыкі СССР, не цяжка заўважыць, што ў цэлым у БССР адзначаныя рэарганізацыі станоўча адбіліся на выкананні планавых заданняў і развіцці сельскай гаспадаркі. Заўважу, што на гэтым не акцэнтавалася ўвага ні палітычных крытыкаў М. Хрушчова, якія імкнуліся “ачарніць” яго імя і справы, ні беларускіх савецкіх гісторыкаў, для якіх хрушчоўскія справы сталі “фігурай замоўчвання”. Але факт застаецца фактам. Амаль усе задачы, вызначаныя сямігодкай кіраўніцтву БССР, былі выкананы. У 1965 г. калгасы і саўгасы рэспублікі атрымалі па 39 ц/га мяса на 100 га ворыва [39, с. 462, 463], 99 % беларускіх калгасаў сталі рэнтабельнымі. За сямігодку валавая прадукцыя сельскай гаспадаркі калгасаў і саўгасаў павялічылася ў 1,7 раза, у тым ліку ў жывёлагадоўлі – у 2,1 раза [40, с. 5, 21]. І ўсё ж у цэлым паказаць амерыканскаму фермеру знакамітую хрушчоўскую “кузькіну маці” калгаснікі СССР не здолелі. Чаго не скажаш аб амерыканцах, якіх менавіта хрушчоўскі выклік падштурхнуў да маштабнай мадэрнізацыі сваёй сельскай гаспадаркі. Праўда, і высновы наконт асобы і дзейнасці М. Хрушчова ў гады перабудовы, у адрозненні ад 1964 г., былі зроблены іншыя. Па сведчанні члена палітбюро ЦК КПСС, сакратара ЦК КПСС В. Мядзведзева, у камандзе М. Гарбачова М. Хрушчова лічылі “асобай неардынарнай, якая карысталася павагай і папулярнасцю” [41, с. 9].

Заклучэнне. Такім чынам, вывучэнне і аналіз выкладзенага матэрыялу дазваляюць зрабіць наступныя абавальныя высновы. Па-першае, дзяржаўная аграрная палітыка СССР, якая праводзілася на працягу 1953–1961 гг., была скіравана на круты ўздым сельскай гаспадаркі, задавальненне спажывецкага попыту на харчовыя тавары. Яе асаблівасцю было матэрыяльна-тэхнічнае ўмацаванне калгасаў і саўгасаў, ажыццяўленне двух этапаў вытворча-тэхналагічнай спецыялізацыі калгасаў і саўгасаў, укараненне новых форм арганізацыі і стымулявання працы калгаснага сялянства, заснаваных на гаспадарчым разліку. Па-другое, рэалізацыя вераснёўскага 1953 г. мадэрнізацыйнага праекту ў асноўным адбывалася з апорай на экстенсіўныя фактары развіцця аграрнай вытворчасці СССР. На рэзкае ўзмацненне тэмпаў эканамічнага развіцця абаяралася кіраўніцтва СССР у спаборніцтве з ЗША у вытворчасці прадукцыі жывёлагадоўлі на душу насельніцтва ў 1957–1961 гг., якое Савецкі Саюз прайграў. Па-трэцяе, у перыяд пасля 1962 г. савецкая аграрная палітыка была нацэлена на магутны ўздым сельскай гаспадаркі, поўнае задавальненне спажывецкага попыту на харчовыя тавары і патрэб сялянства. Разам з тым, партыйнае кіраўніцтва савецкай краіны не надало аграрнай вытворчасці статуса дзяржаўнага прыярытэту. У цэлым арганізацыйна-палітычныя, планавыя-эканамічныя і іншыя мерапрыемствы, якія пасля вераснёўскага 1953 г. пленума ЦК КПСС, XXII з’езда КПСС укараняліся ў калгасна-

саўгасную вытворчасць, дазволілі сельскай гаспадарцы БССР выканаць планавыя заданні сямігодкі, што спрыяла яе далейшаму развіццю. Па-чацвёртае, палітыка партыйна-дзяржаўнага кіраўніцтва СССР па рэарганізацыі сістэмы ўпраўлення савецкай эканомікай была наспелай, нацэленай на ўзмацненне эфектыўнасці і адказнасці дзяржаўнай улады за стан спраў у эканоміцы.

Спіс выкарыстаных крыніц

1. Материалы XXVI съезда КПСС. – М.: Политиздат, 1981. – 223 с.
2. Мартинкевич, В. С. Социально-экономические проблемы сельского хозяйства Белоруссии на этапе развитого социализма / В. С. Мартинкевич. – Минск: Наука и техника, 1975. – 472 с.
3. Венжер, В. Г. Использование закона стоимости в колхозном производстве / В. Г. Венжер. – М., 1965. – 350 с.
4. Гісторыя Беларускай ССР: у 5 т. – Мінск: Навука і тэхніка, 1975. – Т. 5: Беларуская ССР у перыяд стварэння развітога сацыялістычнага грамадства і будаўніцтва камунізму (1945–1974 гг.). – 776 с.
5. Гісторыя Беларусі: у 6 т. – Мінск: Экаперспектыва, 2011. – Т. 6: Беларусь у 1946–2009 гг. – 728 с.
6. История государства и права Белорусской ССР: в 2 т. – Минск: Наука и техника, 1976. – Т. 2: 1937–1975 гг. – 656 с.
7. История социалистической экономики СССР: в 7 т. – М.: Наука, 1980. – Т. 6: Восстановление народного хозяйства СССР. Создание экономики развитого социализма. 1946 – начало 1960-х годов. – 590 с.
8. Касцюк, М. П. Шлях да ісціны: гістарычная навука Беларусі ў канцы XX – пачатку XXI ст. / М. П. Касцюк. – Мінск: Экаперспектыва, 2015. – 252 с.
9. Смехович, Н. В. Восстановление и модернизация сельского хозяйства в БССР (1944–1953 гг.) / Н. В. Смехович // Восень 1939 года ў гістарычным лёсе Беларусі. – Мінск: Беларуская навука, 2010. – С. 368–385.
10. Хрущев, Н. С. Строительство коммунизма в СССР и развитие сельского хозяйства: в 5 т. / Н. С. Хрущев. – М.: Госполитиздат, 1962. – Т. 1: Сентябрь 1953 года – январь 1955 года. – 495 с.
11. Хрущев, Н. С. Строительство коммунизма в СССР и развитие сельского хозяйства: в 5 т. / Н. С. Хрущев. – М.: Госполитиздат, 1962. – Т. 3: Январь 1958 года – май 1959 года. – 544 с.
12. Хрушчоў, М. С. Паспяхова ажыццяўляць рашэнні лютэўскага пленума ЦК КПСС аб інтэнсіфікацыі сельскагаспадарчай вытворчасці. Доклад на нарадзе кіруючых работнікаў партыйных, савецкіх і сельскагаспадарчых органаў 28 лютага 1964 г. / М. С. Хрушчоў. – Мінск: Беларусь, 1964. – 88 с.
13. Стенограмма заседаний Центральной Комиссии «О мероприятиях по увеличению производства продукции сельского хозяйства БССР от 28.12.1956 г.» // НАРБ. – Ф. 31. Оп. 6. Д. 760.
14. Медведев, В. Ф. Специализация в сельскохозяйственном производстве (на примере Брестской области) / В. Ф. Медведев. – Минск: Госиздат БССР, 1961. – 192 с.
15. Коммунистическая партия Белоруссии в резолюциях и решениях съездов и пленумов ЦК. – Минск, 1986. – Т. 5: 1956–1965. – 598 с.
16. Справки инструкторов и уполномоченных ЦК КПБ // НАРБ. Ф. 4-п. Оп. 46. Д. 776.
17. Копии докладных и информаций, посланных в ЦК КПСС, СМ СССР // НАРБ. Ф. 4-п. Оп. 62. Д. 555.
18. Коммунистическая партия Советского Союза в резолюциях и решениях съездов. – М., 1972. – Т. 8: 1959–1965. – 567 с.
19. Отчеты обкомов, райкомов по принятым ЦК КПБ решениям // НАРБ. Ф. 4-п. Оп. 46. Д. 812.
20. Мальшев, П. А. Критерий эффективности социалистического воспроизводства / П. А. Мальшев, И. Г. Шилин. – М.: Мысль, 1973. – 382 с.
21. История Беларуси: вопросы и ответы / сост. Г. Я. Голенченко, В. П. Осмоловского. – Минск, 1993. – 208 с.
22. Народное хозяйство БССР. – Минск, 1963. – 511 с.
23. Коммунистическая партия Советского Союза в резолюциях и решениях съездов, конференций и пленумов ЦК (1898–1971). – М., 1971. – Т. 7: 1955–1959. – 559 с.
24. «В ближайшее время догнать Соединённые Штаты Америки по производству мяса, масла и молока на душу населения». Речь товарища Н. С. Хрущева на совещании работников сельского хозяйства областей и автономных республик Северо-Запада РСФСР в городе Ленинграде 22 мая 1957 года // Правда. – 1957. – 24 мая.
25. Виноградов, И. Почин Евгении Ивановны Андреевой / И. Виноградов // Правда. – 1957. – 12 мая.
26. Хрущев, Н. С. Строительство коммунизма в СССР и развитие сельского хозяйства / Н. С. Хрущев. – М.: Госполитиздат, 1963. – Т. 6: Октябрь 1961 года – март 1962 года. – 479 с.
27. Указ Прэзідыўма Вярхоўнага Савета СССР “Аб узнагароджванні ордэнамі і медалямі калгаснікаў, работнікаў МТС і саўгасаў, спецыялістаў сельскай гаспадаркі, партыйных, савецкіх і камсамольскіх работнікаў Беларускай ССР” // Звязда. – 1958. – 19 студз.
28. Граховский, С. Тропинка на росе / С. Граховский // Дела их золотом горят. – Минск, 1976. – 448 с.
29. Хрущев, Н. С. Строительство коммунизма в СССР и развитие сельского хозяйства: в 5 т. / Н. С. Хрущев. – М.: Госполитиздат, 1962. – Т. 2: Февраль 1955 года – январь 1958 года. – 534 с.
30. Мировая экономика. – М., 1965. – 307 с.
31. Хрущев, Н. С. О контрольных цифрах развития народного хозяйства на 1959–1965 гг. / Н. С. Хрущев. – М.: Госполитиздат, 1959. – 175 с.

32. Программа Коммунистической партии Советского Союза. Принята XXII съездом КПСС. – М.: Госполитиздат, 1973. – 144 с.
33. Материалы XXVII съезда КПСС. – М.: Политиздат, 1986. – 352 с.
34. Багаці беларускай зямлі – на службу народу // Звязда. – 1962. – 12 студз.
35. “Задачи работнікаў сельскай гаспадаркі Беларусі па выкананню рашэнняў XXII з’езда КПСС аб далейшым развіцці сельскай гаспадаркі”. Доклад сакратара ЦК КП Беларусі тав. К. Т. Мазурава на нарадзе работнікаў сельскай гаспадаркі Беларусі 11 студзеня 1962 г. // Звязда. – 1962. – 14 студз.
36. Хрущев, Н. С. Строительство коммунизма в СССР и развитие сельского хозяйства / Н. С. Хрущев. – М.: Госполитиздат, 1963. – Т. 7: Март 1962 года – март 1963 года. – 495 с.
37. Хрущев, Н. С. Строительство коммунизма в СССР и развитие сельского хозяйства / Н. С. Хрущев. – М.: Госполитиздат, 1964. – Т. 8: Май 1963 года – март 1964 года. – 559 с.
38. Отчет об основных итогах научно-исследовательских работ по сельскому хозяйству // НАРБ. Ф. 48. Оп. 9. Д. 6663.
39. Экономика Советской Белоруссии. 1917–1967. – Минск: Наука и техника, 1976. – 542 с.
40. Машэраў, П. М. Справаздача Цэнтральнага Камітэта Кампартыі Беларусі XXVI з’езду / П. М. Машэраў. – Мінск: Беларусь, 1966. – 72 с.
41. Медведев, В. В команде Горбачева. Взгляд изнутри / В. Медведев. – М.: Былина, 1994. – 240 с.

References

1. *Materials XXVI Congress of the CPSU*. Moscow, Politizdat Publ., 1981. – 223 p. (in Russian).
2. Martinkevich V. S. *Social-economic problems of the Byelorussian agriculture at the stage of developed socialism*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975. 472 p. (in Russian).
3. Venzher V. G. *Use of the value law in the collective farm production*. Moscow, 1965. 350 p. (in Russian).
4. *History of the Byelorussian SSR: Vol. 5: Byelorussian SSR during the period of the creation of a developed socialist society and the building communism*. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1975. 776 p. (in Belarussian).
5. *History of Byelorussia*. Vol. 6: *Belarus in 1946–2009*. Minsk, Ekaperspektyva Publ., 2011. 728 p. (in Belarussian).
6. *History of the state and the rights of the Byelorussian SSR*. Vol. 2: *1937–1975*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1976. 656 p. (in Russian).
7. *History of the USSR socialist economy*. Vol. 6: *Restoration of the USSR national economy. The creation of developed socialist economy. 1946 – in the early 1960 ies*. Moscow, Nauka Publ., 1980. 590 p. (in Russian).
8. Kastsiuk M. P. *The way to the truth: historical science of Byelorussia at the end of XX – at the beginning of XXI centuries*. Minsk, Ekaperspektyva Publ., 2015. 252 p. (in Belarussian).
9. Smekhovich N. V. *Agriculture restoration and modernization in the BSSR (1944–1953). Vosen’ 1939 goda u gista-rychnym lese Belarusi* [Autumn of 1939 in the historical destiny of Byelorussia]. Minsk, Beluraskaya navuka, 2010, pp. 368–385 (in Russian).
10. Khrushchev N. S. *Building communism in the USSR and developing agriculture*. Vol. 1: *September 1953 – January 1955*. Moscow, Gospolitizdat Publ., 1962. 495 p. (in Russian).
11. Khrushchev N. S. *Building communism in the USSR and developing agriculture development*. Vol. 3: *January 1958 – May 1959*. Moscow, Gospolitizdat Publ., 1962. 544 p. (in Russian).
12. Khrushchou M. S. *Successful implementation of the CPSU CC February Plenum decision about the agriculture intensification. The report delivered at the meeting of the leaders of Party, soviet, and agriculture organizations on 28 February 1964*. Minsk, Belarus’, 1964. 88 p. (in Belarussian).
13. Shorthand record of the Central Commission meeting “Measures to increase the production of agricultural products in the BSSR on 28.12.1956.” *Natsional’nyi arkhiv Respubliki Belarus’* [The National Archives of the Republic of Belarus], fund 31, list 6, file 760. (in Russian).
14. Medvedev V. F. *Specialization in the production of agricultural products (by the example of the Brest region)*. Minsk, State Publishing House of the BSSR, 1961. 192 p. (in Russian).
15. *Communist Party of Byelorussia in the resolutions and decisions of Central Committee Congresses and Plenums*. Vol. 5: *1956–1965*. Minsk, 1986. 598 p. (in Russian).
16. Information of instructors and authorized representatives of the CC CPB. *Natsional’nyi arkhiv Respubliki Belarus’* [The National Archives of the Republic of Belarus], fund 4-п, list 46, file 776 (in Russian).
17. Report and information copies sent to the CC CPSU, the CM USSR. *Natsional’nyi arkhiv Respubliki Belarus’* [The National Archives of the Republic of Belarus], fund 4-п, list 62, file 555 (in Russian).
18. *Communist Party of the Soviet Union in the Congress resolutions and decisions*. Vol. 8: *1959–1965*. Moscow, 1972. 567 p. (in Russian).
19. Reports of regional and district committees on the CC CPB decisions. *Natsional’nyi arkhiv Respubliki Belarus’* [The National Archives of the Republic of Belarus], fund 4-п, list 46, file 812 (in Russian).
20. Malyshev P. A., Shilin I. G. *Efficiency criterion of the Socialist reproduction*. Moscow, Mysl’ Publ., 1973. 382 p. (in Russian).
21. Golenchenko G. Ia., Osmolovskii V. P. (eds.) *History of Belarus: questions and answers*. Minsk, Belarus’ Publ., 1993. 208 p. (in Russian).
22. *National Economy of the BSSR*. Minsk, 1963. 511 p. (in Russian).

23. *Communist Party of the Soviet Union in the resolutions and decisions of CC congresses, conferences, and plenums (1898–1971)*. Vol. 7: 1955–1959. Moscow, 1971. 559 p. (in Russian).
24. “...in the nearest future, to catch up with the United States of America on meal, oil, and milk production per capita”. Comrade N. S. Khrushchev’s speech at the meeting of agricultural workers of the regions and the Autonomous Republics of the North-West of the RSFSR in the city of Leningrad on 22 May 1957. *Pravda*, 1957, May 24 (in Russian).
25. Vinogradov I. Eugenia Ivanovna Andreeva’s initiative. *Pravda*, 1957, May 12 (in Russian).
26. Khrushchev N. S. *Building communism in the USSR and developing agriculture*. Vol. 6: October 1961 – March 1962. Moscow, Gospolitizdat Publ., 1963. 479 p. (in Russian).
27. Decree of the USSR Supreme Council Presidium “On rewarding collective farmers, MTS workers, joint collective farms, **agricultural specialists, as well as Party, Soviet and Komsomol workers of the Byelorussian SSR with orders and medals**”. *Zvyazda*, 1958, January 19 (in Belarussian).
28. Grakhovskii S. A path on the dew. *Dela ikh zolotom goriat* [Their affairs are glowing with gold]. Minsk, 1976. 448 p. (in Russian).
29. Khrushchev N. S. *Building communism in the USSR and developing agriculture*. Vol. 2: February 1955 – January 1958. Moscow, Gospolitizdat Publ., 1962. 534 p. (in Russian).
30. *World economy*. Moscow, 1965. 307 p. (in Russian).
31. Khrushchev N. S. *Control figures of the national economy development for 1959–1965 years*. Moscow, Gospolitizdat Publ., 1959. 175 p. (in Russian).
32. *CPSU Program. Accepted by the XXII Congress of the CPSU*. Moscow, Gospolitizdat Publ., 1973. 144 p. (in Russian).
33. *Materials XXVII Congress of the CPSU*. Moscow, Politizdat Publ., 1986. 352 p. (in Russian).
34. The wealth of the Belarussian land – to the people. *Zvyazda*, 1962, January 12 (in Belarussian).
35. “Tasks of the agricultural workers of Belarus on the implementation of the CPSU XXII Congress decisions on a further agriculture development.” CC CPB Secretary K. T. Mazurov’s report at the meeting of agricultural workers of Byelorussia on 11 January 1962. *Zvyazda*, 1962, January 14 (in Belarussian).
36. Khrushchev N. S. *Building communism in the USSR and developing agriculture*. Vol. 7: March 1962 – March 1963. Moscow, Gospolitizdat Publ., 1963. 495 p. (in Russian).
37. Khrushchev N. S. *Building communism in the USSR and developing agriculture*. Vol. 8: May 1963 – March 1964. Moscow, Gospolitizdat Publ., 1964. 559 p. (in Russian).
38. Report on the main outcomes of agriculture research. *Natsional’nyi arkhiv Respubliki Belarus’* [The National Archives of the Republic of Belarus], fund 48, list 9, file 6663 (in Russian).
39. *Economy of Soviet Belarus. 1917–1967*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1976. 542 p. (in Russian).
40. Masherau P. M. *CC CPB report to the XXVI Congress*. Minsk, Belarus’ Publ., 1966. 72 p. (in Belarussian).
41. Medvedev V. *In Gorbachev’s team. View from inside*. Moscow, Bylina Publ., 1994. 240 p. (in Russian).

Информация об авторах

Смехович Николай Владимирович – канд. ист. наук, заведующий центром, Институт истории НАН Беларуси (ул. Академическая, 1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: smenic18@mail.ru.

Information about the authors

Smiakhovich Nikolai Vladimirovich – Ph. D. (History), Head of the Department, Institute of History of the National Academy of Sciences of Belarus (1, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: smenic18@mail.ru.

Для цитирования

Смехович, Н. В. Основные направления аграрной политики СССР 1953–1964 гг. и результаты ее выполнения в БССР / Н. В. Смехович // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 92–104.

For citation

Smiakhovich M. U. Main directions of the USSR agricultural policy during 1953–1964 years and the results of their implementation in the BSSR. *Doklady Natsional’noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 92–104 (in Belarussian).

ISSN 0002–354X (print)

АГРАРНЫЕ НАУКИ
AGRARIAN SCIENCES

УДК 636.13.082.22

Поступило в редакцию 26.12.2016

Received 26.12.2016

Ю. И. Герман, академик И. П. Шейко

Научно-практический центр НАН Беларуси по животноводству, Жодино, Республика Беларусь

**ОЦЕНКА ПЛЕМЕННОЙ ЦЕННОСТИ ЛОШАДЕЙ ГАННОВЕРСКОЙ
И ТРАКЕНЕНСКОЙ ПОРОД**

Разработаны алгоритмы оценки племенной (генетической) ценности лошадей верховых пород по количественным признакам собственной продуктивности (развитию, экспертной оценке селекционируемых признаков) лошадей и качеству потомства. Научная значимость исследований, представленная в сообщении, заключается в разработке отсутствующей в республике системы оценки племенной (генетической) ценности лошадей разводимых верховых пород на основе использования фенотипических и генотипических характеристик. Практическое значение разработанной системы заключается в повышении надежности и более ранней оценке лошадей на 2–3 года.

Ключевые слова: лошади верховых пород, племенная ценность, частные индексы, коэффициенты, наследуемость признаков.

Y. I. German, Academician I. P. Sheyko

*Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Animal Husbandry,
Zhodino, Republic of Belarus*

ESTIMATION OF THE BREEDING VALUE OF THE HANNOVER AND TRAKENNER BREEDS OF HORSES

Algorithms for estimation of the breeding (genetic) value of roadster breeds of horses by variable traits of own performance (development, expert assessment of selected traits) and the progeny quality are developed. The scientific significance of the research results presented in this article lies in the development of the breeding (genetic) value assessment system that does not exist in the country, for the bred roadster horses based on phenotypic and genotypic characteristics. The practical significance of the developed system is to improve the reliability and the earlier assessment of horses by 2–3 years.

Keywords: roadster breeds of horses, breeding value, sub-indices, ratios, traits heritability.

Введение. Значительную роль в увеличении спортивной работоспособности и повышении качества лошадей верховых пород имеет селекционно-племенная работа, в основе которой лежат принципы генетики популяций. В связи с этим необходимо более глубокое теоретическое изучение всех сторон селекционной работы и выход ее на новый качественный уровень оценки животных по индексам племенной ценности – статистически рассчитанным алгоритмам, отражающим множественные показатели. Индекс дает оценку племенной ценности лошади одним цифровым выражением.

В настоящее время в республике разводят лошадей различных пород и направлений использования, в частности, для конного спорта – траккененскую, ганноверскую и др. Селекцию их до последнего времени осуществляли руководствуясь следующими нормативными документами: «Зоотехнические правила по определению продуктивности племенных животных» (утверждены Постановлением Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь № 81 от 30 ноября 2006 г.), «Инструкция по бонитировке племенных лошадей заводских пород», 1991 г. [1–4].

Определение племенной ценности лошадей осуществлялось на основе поэтапной оценки жеребцов и кобыл по происхождению, типичности, промерам, работоспособности, качеству потомства. Каждый признак оценивался по 10-балльной шкале, а племенная ценность лошади устанавливалась путем их ранжирования. Теоретической базой осуществляемой селекции являлся метод оценки лошадей по независимым уровням, при котором показатели каждого признака сравниваются с требованиями стандарта.

Преимущества данной оценки – сравнительная простота осуществления, доступность для выполнения даже в условиях индивидуальной селекции. Вместе с тем ее использование не позволяет в полной мере выявить генетический потенциал продуктивности и не соответствует мировому уровню племенной работы.

Лишена многих из указанных недостатков система определения племенной ценности животных на основе расчета селекционных индексов. Индексы записываются в виде одного числового выражения или уравнения, обобщающего всю необходимую информацию об оцениваемом пробанде [5; 6]. При использовании данного метода селекция ведется путем одновременной оценки и улучшения всех признаков, характеризующих племенное животное. Племенная ценность характеризует качество оцениваемого животного в породе и выражается значением комплексного индекса.

Во многих странах мира разработаны и используются различные системы оценки племенной ценности сельскохозяйственных животных, в т. ч. и лошадей. Актуальным является переход к индексной оценке лошадей и в нашей стране. Ее необходимость обусловлена Законом Республики Беларусь «О племенном деле в животноводстве», другими нормативными документами [8].

Актуальность, научная значимость исследований заключается в разработке отсутствующей в республике системы оценки племенной (генетической) ценности лошадей разводимых пород на основе использования фенотипических и генотипических характеристик. Указанная разработка обеспечивает ускорение и прогнозирование селекционного процесса в спортивном коневодстве. Исследования по данной проблеме ранее не проводились. Поэтому нами была поставлена цель – разработать систему оценки племенной (генетической) ценности лошадей ганноверской и тракененской пород.

Задача исследований – выделить основные селекционируемые признаки, определить показатели их наследуемости, частные индексы, весовые коэффициенты и разработать алгоритмы оценки племенной ценности лошадей ганноверской и тракененской пород.

Материалы и методы исследований. Исследования выполнялись в базовых хозяйствах по разведению основных верховых пород лошадей.

Тракененская, ганноверская – учреждение «РЦОПКС и К» Минского, ОАО «Полочаны» Молодечненского, РСУП «Совхоз «Лидский» Лидского районов.



Схема исследований
Scheme of studies

Предмет исследований – селекционные индексы племенной ценности лошадей разводимых верховых пород. Исследования проводились по схеме, представленной на рисунке.

Племенная ценность характеризует качество оцениваемого животного в популяции и выражается значением комплексного индекса, определяемого по формуле

$$I_{\text{комп}} = b_{\Gamma} I_{\Gamma} + b_{\text{T}} I_{\text{T}} + b_{\text{п}} I_{\text{п}} + b_{\text{э}} I_{\text{э}} + b_{\text{р}} I_{\text{р}},$$

где $I_{\text{комп}}$ – комплексный индекс племенной ценности лошадей по собственной продуктивности, %; b_{Γ} ; b_{T} ; $b_{\text{п}}$; $b_{\text{э}}$; $b_{\text{р}}$ – относительные весовые коэффициенты частных индексов племенной ценности каждого из учитываемых признаков при оценке лошадей по генотипу выраженности желательного типа (типичности), промерам, экстерьеру, работоспособности; I_{Γ} ; I_{T} ; $I_{\text{п}}$; $I_{\text{э}}$; $I_{\text{р}}$ – частные индексы племенной ценности лошадей.

Коэффициенты относительной экономической ценности (весовые коэффициенты признаков) устанавливались путем учета желательной направленности отклонения признака от среднепопуляционной величины и анализа экспертных заключений о селекционном и экономическом значении каждого из них.

Расчет частных индексов племенной ценности выполняется по следующим алгоритмам:

$$I_{\Gamma} = h_{\Gamma}^2 (P_{\Gamma} - \bar{P}_{\Gamma} / \bar{P}_{\Gamma}) 100 + 100;$$

$$I_{\text{T}} = h_{\text{T}}^2 (P_{\text{T}} - \bar{P}_{\text{T}} / \bar{P}_{\text{T}}) 100 + 100;$$

$$I_{\text{п}} = h_{\text{п}}^2 (P_{\text{п}} - \bar{P}_{\text{п}} / \bar{P}_{\text{п}}) 100 + 100;$$

$$I_{\text{э}} = h_{\text{э}}^2 (P_{\text{э}} - \bar{P}_{\text{э}} / \bar{P}_{\text{э}}) 100 + 100;$$

$$I_{\text{р}} = h_{\text{р}}^2 (P_{\text{р}} - \bar{P}_{\text{р}} / \bar{P}_{\text{р}}) 100 + 100,$$

где h_{Γ}^2 , h_{T}^2 , $h_{\text{п}}^2$, $h_{\text{э}}^2$, $h_{\text{р}}^2$ – коэффициенты наследуемости оценки лошадей за происхождение (генотип), типичность, промеры, экстерьер, работоспособность, устанавливаемые путем дисперсионного анализа однофакторных комплексов; P_{Γ} , P_{T} , $P_{\text{п}}$, $P_{\text{э}}$, $P_{\text{р}}$ – показатели экспертной оценки каждой пробонитированной лошади по селекционируемым признакам – за происхождение, выраженность желательного типа (типичность), промеры, экстерьер, работоспособность; \bar{P}_{Γ} , \bar{P}_{T} , $\bar{P}_{\text{п}}$, $\bar{P}_{\text{э}}$, $\bar{P}_{\text{р}}$ – средние показатели оценки лошадей за отдельные признаки в селекционном массиве.

Все разводимые в нашей стране породы лошадей существенно различаются между собой по направлению продуктивности, задачам племенной работы. Несмотря на наличие общих методических подходов по установлению комплексного и частных индексов племенной (генетической) ценности лошадей, алгоритмы их расчета в каждой из пород изменялись в зависимости от приоритетности признаков отбора, их весовых коэффициентов, генетической обусловленности и других параметров.

На основе обобщения полученных материалов разработана система оценки племенной (генетической) ценности лошадей разводимых в республике верховых пород, отличающаяся сочетанием классических приемов использования линейных статистических моделей, по которым племенная ценность выражается отклонением величины признака оцениваемого животного от средней по популяции, с принципиально новыми, специфическими для каждой конкретной породы лошадей алгоритмами расчета данного показателя, использование которого обеспечит установление наиболее точного и прогнозируемого качества оцениваемой лошади. Результаты полученной оценки будут использованы в качестве исходной базы для организации их эффективного племенного использования на основе разработки планов индивидуального подбора жеребцов и кобыл по базовым хозяйствам.

Результаты и их обсуждение. В ходе выполнения работ выделили основные селекционируемые признаки лошадей верховых пород, которые постоянно используются в практическом разведении.

Подконтрольный массив верховых лошадей Республики Беларусь, используемых в племенной работе и конном спорте, представлен двумя породами – тракненской, разводимой в учреждении

«РЦОПКС и К» Минского, РУСП «Совхоз «Лидский» Лидского районов, и ганноверской, разводимой в ОАО «Полочаны» Молодечненского, СПК «Прогресс-Вертелишки» Гродненского районов. Небольшие группы племенных лошадей указанных пород имеются в ОАО «Полесская нива» Столинского, КСУП «Тепличное» Гомельского районов, а также более чем в 20 конноспортивных организациях. В небольшом количестве в нашей стране имеются также лошади вестфальской, голштинской, бранденбургской пород, племенная ценность которых будет рассчитываться по индексам, разработанным для ганноверской породы, с которой они сходны как по происхождению, так и по направлению использования.

Как нами установлено, необходимым первоначальным этапом работы по оценке племенной (генетической) ценности сельскохозяйственного животного, в том числе и лошади является выделение основных селекционируемых признаков, т. е. показателей продуктивности, характеризующих фенотип животного.

Продуктивность лошадей верховых пород характеризуют следующие селекционируемые признаки: происхождение, тип, промеры, экстерьер, работоспособность. В связи с тем, что в Беларуси нет выведенных здесь верховых пород лошадей, оценку их по собственной продуктивности (фенотипической ценности) осуществляли руководствуясь инструкцией по бонитировке лошадей заводских пород (Москва, 1991) с учетом внесенных в нее корректировок, касающихся совершенствования и детализации процедуры выполнения данной работы.

Необходимые для разработки индексов показатели наследуемости селекционных признаков определяли по соотношению факториальной (межгрупповой) и общей изменчивости признаков методом дисперсионного анализа однофакторных комплексов. В отдельные комплексы включали дочерей анализированных производителей.

В результате проведенных исследований установлены следующие коэффициенты наследуемости селекционируемых признаков в тракененской породе лошадей: происхождение – 0,35; тип – 0,35; промеры – 0,20; экстерьер – 0,43; работоспособность – 0,15.

Как видно из представленных данных, показатели наследуемости признаков сравнительно низкие, особенно работоспособности, что обусловлено их полигенностью, существенным влиянием паратипических факторов, снизить которое является важнейшей задачей производителей племенной продукции. Вместе с тем нами установлено, что на показатель наследуемости указанных фенотипических признаков существенное влияние оказывают индивидуальные качества использовавшихся производителей, потомство которых нами исследовалось. Данная особенность была установлена при сравнительном анализе потомства (дочерей) жеребцов – 422 Стих, 310 Хирамас, 446 Хитон, 213 Хардинг, 381 Капрал, 434 Фэбо, 185 Гриф, 143 Экватор, 147 Драгун, 354 Вопрос, 508 Гриф Грей тракененской породы; Бурбон 44 голштинской и голландской теплокровной – Каратино Z пород. Коэффициенты наследуемости признаков в голштинской и голландской теплокровной породах оказались более высокими, чем в тракененской в связи с высокой препотентностью указанных выдающихся производителей. Коэффициенты наследуемости промеров – 0,21; типа – 0,49; работоспособности – 0,49. С учетом полученных коэффициентов осуществили расчет частных индексов племенной ценности различных половозрастных групп лошадей тракененской породы (жеребцы – производители, племенные кобылы, ремонтный молодняк).

В основе расчета частных индексов племенной ценности лошадей по отдельным признакам – линейные статистические модели, на основании которых племенная ценность выражается отклонением величины признака оцениваемого животного от средних данных по породе. С использованием полученных данных разработали алгоритм оценки племенной ценности лошадей тракененской породы, цифровым выражением которого является величина комплексного индекса племенной ценности жеребцов-производителей, племенных маток.

Комплексный индекс племенной ценности по собственной продуктивности лошадей тракененской породы включает частные индексы племенной ценности всех используемых при селекции данных животных селекционных признаков с учетом их экономического значения, определяемого величиной относительных весовых коэффициентов. Разработали весовые коэффициенты племенной ценности лошадей, которые оказались следующими: $b_r = 0,20$; $b_{\tau} = 0,17$; $b_{\Pi} = 0,18$; $b_3 = 0,21$; $b_p = 0,24$.

С учетом указанного, алгоритм расчета комплексного индекса племенной ценности лошадей тракененской породы оказался следующим:

$$I_{\text{комп}} = 0,20I_{\text{Г}} + 0,17I_{\text{Т}} + 0,18I_{\text{П}} + 0,21I_{\text{З}} + 0,24I_{\text{Р}}$$

При отсутствии данных о работоспособности исследуемой группы лошадей расчет селекционного индекса осуществляли с использованием следующего алгоритма:

$$I_{\text{комп}} = 0,26I_{\text{Г}} + 0,23I_{\text{Т}} + 0,24I_{\text{П}} + 0,27I_{\text{З}}$$

Нами установлено, что селекционный массив лошадей тракененской породы сравнительно немногочисленный. Наиболее типичное, хорошо отселекционированное конепоголовье находится в РЦОПКС и К Минского района, на базе которого мы исследовали все аспекты данной проблемы. Результаты оценки племенной ценности жеребцов-производителей приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Комплексный индекс племенной ценности жеребцов-производителей тракененской породы

Table 1. Complex index of the genetic value of the stub horses of Trakehner breed

Кличка жеребца-производителя Nickname of stub horse	Год рождения Year of birth	Происхождение Origin		Линия Line	Частные индексы, % Special indices, %				Комплексный индекс, % Complex index, %
		отец Father	мать Mother		$I_{\text{произв}}$	$I_{\text{Г}}$	$I_{\text{П}}$	$I_{\text{З}}$	
Гарвард	2006	494 Визит	1908 Гарда	Пифагорова	104,3	104,3	103,0	100,0	102,7
Гринвич	2008	487 Вазген	2551 Гласность	Прибоя ох	100,0	100,0	100,0	105,4	101,4
Рокки	2004	381 Капрал	Реприка хх	Пифагорова	100,0	104,3	100,0	105,1	102,4
Питсбург	2005	508 Гриф Грей	1473 Песета	Канкара	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Халахен	2003	310 Хирамас	2173 Ханка	Пильгера	108,7	108,7	106,0	105,4	107,2
Фан-Фан	2003	434 Фэбо	2153 Филиппинка	Пильгера	104,3	104,3	103,0	105,4	104,3
<i>Жеребцы спортивного назначения</i> <i>Sporting stub horses</i>									
Гетеборг	2009	508 Гриф Грей	1925 Граха	Канкара	104,3	104,3	103,0	105,4	104,3
Денвер	2008	487 Вазген	1944 Диаспора	Прибоя ох	104,3	104,3	103,0	102,7	103,5
Пехей	2011	Хирохито	2823 Пирофея	Пильгера	100,0	100,0	97,0	100,0	99,3
Средний показатель					102,79				

Лучшие показатели развития селекционируемых признаков имел жеребец Халахен (310 Хирамас – 2173 Ханка), р. 2003 г. Высота в холке – 172 см, обхват груди – 201 см, обхват пясти – 22,5 см. Оценка происхождения, типа – по 10 баллов за каждый из признаков, оценка экстерьера – 9 баллов.

По спортивной работоспособности оценено два производителя – Гарвард (494 Визит – 1908 Гарда), р. 2000 г., Гринвич (487 Вазген – 2551 Гласность), р. 2008 г. Лучшим как по двигательным качествам (9,44 балла), так и прыжковым качествам (9,66 баллов) оказался жеребец Гринвич. Оценены также три жеребца спортивного направления – менее ценные по племенному назначению.

По индексам племенной ценности распределение жеребцов-производителей тракененской породы оказалось следующим: комплексный индекс варьирует от 99,3 % жеребец Пехей, до 107,2 % у жеребца Халахена. Из приведенных в табл. 1 данных видны заметные преимущества жеребца Халахена по сравнению со сверстниками по показателям развития всех селекционируемых признаков, в т. ч. и работоспособности. Данный жеребец имеет и наиболее высокую сумму баллов по результатам оценки по комплексу селекционируемых признаков.

Вместе с тем все оцененные жеребцы-производители будут активно использоваться в племенной работе в связи с различной линейной принадлежностью и специфическими особенностями получаемого в результате кроссов потомства.

Следующим направлением исследований было определение племенной ценности кобыл тракененской породы, которое осуществляли в РЦОПКС и К Минского района. Всего оценено по комплексу признаков 80 кобыл верховых пород, в том числе 59 маток тракененской породы.

По результатам оценки фенотипа все кобылы хозяйства по каждому из селекционируемых признаков (происхождение, тип, промеры, экстерьер, работоспособность) превышают стандарт породы 7 баллов, необходимый для отнесения их к высшему показателю качества (классу бонитировки) лошади. Прослеживаются следующие внутригрупповые изменения по каждому из оцениваемых признаков. При очень высокой средней оценке кобыл по промерам – 9,05 баллов, каждый из показателей этой оценки отличается высокой вариабельностью. Высота в холке изменяется от 159 до 173 см, обхват груди – от 182 до 202 см, обхват пясти – 20,0–22,0 см, общая оценка варьирует от 8,0 до 9,67 баллов.

Средняя оценка по типу $8,30 \pm 0,09$ баллов варьирует от 7,0 баллов (минимальная оценка для отнесения кобылы к классу элита) до 8,75 баллов, по экстерьеру $7,73 \pm 0,08$ баллов варьирует от 7,65 до 10,0 баллов. Оценка по работоспособности – $8,70 \pm 0,86$ баллов варьирует от 7,36 до 9,58 баллов. Приведенные данные свидетельствуют как о высокой отселекционированности важнейших продуктивных признаков племенных маток тракененской породы в РЦОПКС и К Минского района, так и о наличии возможностей дальнейшего их улучшения. Задача увеличения промеров маток не является актуальной в настоящее время. Основные усилия должны быть направлены на дальнейшую типизацию конепоголовья и самое главное – на улучшение спортивной работоспособности.

Учитывая то, что в расчетах частных индексов использовались для сопоставления средние результаты оценки кобыл тракененской породы, выполненной в 2016 г., результаты анализа свидетельствуют о небольшом ухудшении качества кобыл. Комплексный индекс племенной ценности кобыл тракененской породы составил 99,84 %, на 0,16 % ниже, чем в 2013 г.

Как показал проведенный нами анализ данных изменений, они произошли за счет выранжировки и реализации очень качественных по фенотипическим, но плохих по воспроизводительным способностям маток и неравноценной заменой их молодыми кобылами из саморемонта.

Установлены животные, не достигшие стандарта по комплексному индексу племенной ценности 100 %, 33 головы (55,9 %) – величина достаточно высокая. Среди оцененных маток минус вариантными по комплексным индексам племенной ценности за происхождение, тип, промеры, экстерьер оказалось 10 голов.

Очень важным фактором направленного селекционного процесса в данном хозяйстве оказалось то, что здесь активизировалась работа по оценке двигательных и прыжковых качеств лошадей, причем достигаемые на заводских испытаниях результаты постепенно улучшаются. Так, в течение 2013–2016 гг. показатели работоспособности почти всех испытанных кобыл превысили достигнутые на начальном этапе результаты. Частный индекс племенной ценности кобыл по работоспособности составил 101,88 %. Только у 6 испытанных кобыл (10,2 %) данный показатель не достиг 100 %.

Следующим этапом исследований была разработка алгоритма оценки племенной ценности лошадей ганноверской породы. Лошади данной породы в мировом конном спорте являются чаще всего более результативными, чем тракененской. Они более востребованы, что обуславливает их высокий рейтинг и в нашей республике. Ганноверских лошадей в Беларуси пока немного, они рассредоточены по различным конноспортивным организациям. Направленная племенная работа с лошадьми данной породы отечественной и зарубежной селекции осуществляется в основном в ОАО «Полочаны» Молодечненского района.

Схема технических процедур по разработке алгоритма оценки племенной ценности лошадей ганноверской породы сходна с аналогичной работой в тракененской породе. Выделили основные селекционируемые признаки лошадей – происхождение, тип, промеры, экстерьер, работоспособность, причем каждый из них является сложным.

Коэффициенты наследуемости признаков определяли методом дисперсионного анализа однофакторных комплексов, которые формировали из дочерей, используемых в породе производителей.

В итоге исследований были установлены следующие коэффициенты наследуемости признаков в ганноверской породе лошадей: происхождение – 0,21; тип – 0,05; промеры (высота в холке) – 0,11; экстерьер – 0,11; работоспособность – 0,15.

Из приведенных данных видно, что, как и в тракненской породе лошадей, коэффициенты наследуемости признаков в ганноверской так же сравнительно низкие. Комплексный индекс племенной (генетической) ценности каждой лошади определяли путем суммирования частных селекционных индексов по отдельным признакам с применением весовых коэффициентов:

$$I_{\text{комп}} = 0,23I_{\text{Г}} + 0,17I_{\text{Т}} + 0,18I_{\text{П}} + 0,18I_{\text{З}} + 0,24I_{\text{Р}}$$

При отсутствии данных о работоспособности использовали следующий алгоритм расчета комплексного индекса племенной ценности лошадей ганноверской породы:

$$I_{\text{комп}} = 0,29I_{\text{Г}} + 0,23I_{\text{Т}} + 0,24I_{\text{П}} + 0,24I_{\text{З}}$$

Следует отметить наличие значительного сходства алгоритмов расчета племенной ценности лошадей тракненской и ганноверской пород, так как это обусловлено одинаковой направленностью и интенсивностью отбора племенного конепоголовья. В связи с возможностью использовать при разведении ганноверанов производителей различных полукровных пород и необходимостью в связи с этим усилить значение данного селекционного показателя, увеличен, соответственно, и коэффициент экономической значимости данного признака – 0,29.

Как показали наши исследования, качество используемых в настоящее время в ОАО «Полочаны» жеребцов-производителей высокое, однако происхождение их самое разнообразное (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Результаты оценки по комплексу признаков и определения племенной ценности жеребцов-производителей

T a b l e 2. Assessment results through a set of the characters and the determination of the genetic value of stub horses

Кличка Nickname	Год рождения Year of birth	Порода Breed	Промеры, см Measurement, cm			Оценка признаков, частных индексов Assessment of characters, special indices				Индекс племенной ценности, % Index of genetic value, %
			высота в холке withers height	обхват girth		происхождение origin	тип type	промеры Measurement	экстерьер exterior	
				груди chest	пясти pastern					
Волнограф	2006	ган.	173	200	23,0	100,0	100,6	100,6	100,0	100,2
Граф	2002	ган.	171	196	22,0	102,6	100,0	100,6	100,0	100,8
Лескор	1998	бранд	167	197	22,0	100,0	100,0	100,6	87,5	97,1
Орлеан 12/03	2003	ПКС	170	206	23,0	102,6	100,6	100,6	100,0	100,9
Хэмптон	2007	WBP	176	200	23,0	102,6	100,6	100,6	100,0	100,9

Как видно из приведенных данных, параметры собственной продуктивности жеребцов-производителей значительно превышают породный стандарт класса элита. Все жеребцы крупные, высокие, костистые, с хорошо развитой грудной клеткой, имеют прекрасно выраженный тип полукровной лошади для использования в конкуре и троеборье.

По имеющимся исходным данным исследовали показатели развития селекционируемых признаков у кобыл ганноверской породы в ОАО «Полочаны». Установлена оптимальная оценка каждого из них, которая превышает стандарт породы класса элита.

Так, с высотой в холке 170 см и более отобрано 5 маток, в том числе:

Боливия (57 Баварец – 381 Вахта), р. 2001 г. (178–202–24,0 см; 8–9–9–9 баллов);

Ботва (Баббит 25 – 381 Вахта), р. 2003 г. (171–194–22,0 см; 8–8–9–8 баллов);

Верона (69 Возгон – 2270 Осада), р. 2006 г. (170–201–23,0 см; 8–8–8–9 баллов);

Гвиана (377 Гросс – Вербена), р. 2006 г. (170–200–22,5 см; 8–8–9–8 баллов).

ОАО «Полочаны» продает неиспытанный молодняк и о его хорошей потенциальной работоспособности становится известным только из средств массовой информации, преимущественно

российских. Молодняк реализуется, прежде всего, жеребчики, как правило, в раннем возрасте, что не позволяет проследить динамику их развития и работоспособность.

Как и при анализе селекционных материалов по тракененской породе, в качестве исходной базы данных при характеристике кобыл ганноверской породы использовали перспективный стандарт, изложенный в программе совершенствования лошадей ганноверской породы на 2013–2020 годы. Установлено, что многие кобылы не достигают данного стандарта. Из 36 оцененных маток только у 10 кобыл (27,7 %) комплексный индекс племенной ценности превышает 100 %. Подобные особенности характерны и для молодняка данной породы.

Результаты исследований свидетельствуют об эффективности оценки лошадей по племенной (генетической) ценности, которая позволяет выполнить научно обоснованные предложения о направлениях использования имеющегося конепоголовья. Выделены жеребцы-производители, племенные кобылы, ремонтный молодняк которых целесообразно наиболее активно использовать в современных технологических условиях коннозаводства базовых хозяйств.

Выводы.

1. Разработана система оценки племенной (генетической) ценности лошадей разводимых в Беларуси верховых пород, которая характеризуется наличием общих методических подходов по расчету относительного индекса племенной (генетической) ценности животных на основе суммирования отклонений величины исследуемых признаков от среднепопуляционного показателя (стандарта) и с учетом специфических для каждой из пород алгоритмов определения наследуемости, весовых коэффициентов признаков, частных индексов племенной ценности.

2. Выделены основные селекционируемые признаки лошадей ганноверской и тракененской пород и определены коэффициенты их наследуемости в том числе:

в тракененской породе – 0,35 (генотип); 0,35 (тип); 0,20 (промеры); 0,43 (экстерьер); 0,15 (работоспособность);

в ганноверской породе – 0,21 (генотип); 0,05 (тип); 0,11 (промеры); 0,11 (экстерьер); 0,15 (работоспособность);

3. Разработан алгоритм расчета частных индексов племенной ценности лошадей по отдельным признакам с использованием следующей формулы:

$$I_{\text{признак}} = h_{\text{признак}}^2 (P_{\text{признак}} - \bar{P}_{\text{признак}} / \bar{P}_{\text{признак}}) 100 + 100.$$

4. Определены весовые коэффициенты признаков, в том числе:

в тракененской породе – 0,20 (генотип); 0,17 (тип); 0,18 (промеры); 0,21 (экстерьер); 0,24 (работоспособность). Если в хозяйстве отсутствуют данные о работоспособности, используют следующие весовые коэффициенты признаков: 0,26 (генотип); 0,23 (тип); 0,24 (промеры); 0,27 (экстерьер);

в ганноверской породе – 0,23 (генотип); 0,17 (тип); 0,18 (промеры); 0,24 (экстерьер); 0,18 (работоспособность). Если в хозяйстве отсутствуют данные о работоспособности, используют следующие весовые коэффициенты признаков: 0,29 (генотип); 0,23 (тип); 0,24 (промеры); 0,24 (экстерьер).

5. С использованием разработанных алгоритмов и коэффициентов определена племенная (генетическая) ценность жеребцов-производителей, племенных кобыл в ведущих хозяйствах, где разводят лошадей ганноверской и тракененской пород, выделены перспективные для дальнейшего использования особи.

6. Использование разработанной системы обеспечит повышение точности и достоверности оценки качества конепоголовья, позволит в сравнительно раннем возрасте (2–3 года) прогнозировать качество лошади по ее фенотипу, обеспечивая не менее чем двукратную экономию денежных средств на выращивание неперспективного молодняка, которая составляет по расчетным данным не менее 500 долл. США на 1 лошадь в год.

Список использованных источников

1. Об утверждении зоотехнических правил о порядке определения племенной ценности животных [Электронный ресурс]: постановление М-ва сельского хозяйства и продовольствия Респ. Беларусь, 30.11.2006, № 81 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <http://www.pravo.by/document/?guid=3961&p0=W206p0263>. – Дата доступа: 21.11.2016.

2. Об утверждении зоотехнических правил о порядке определения продуктивности племенных животных, племенных стад, оценки фенотипических и генотипических признаков племенных животных [Электронный ресурс]: постановление М-ва сельского хозяйства и продовольствия Респ. Беларусь, 03.09.2013, № 44 // Законодательство Республики Беларусь. – Режим доступа: <http://pravo.newsby.org/belarus/postanov0/pst216.htm>. – Дата доступа: 21.11.2016.
3. Республиканская программа по племенному делу в животноводстве на 2007–2010 годы. Основные зоотехнические документы по селекционно-племенной работе в животноводстве: сб. технолог. документации / Н. А. Попков [и др.]. – Жодино, 2008. – С. 445–459.
4. Инструкция по бонитировке племенных лошадей заводских пород. – М., 1991. – 25 с.
5. Завертяев, Б. П. Краткий словарь селекционно-генетических терминов в животноводстве / Б. П. Завертяев. – М.: Россельхозиздат, 1983. – 88 с.
6. Henderson, C. R. Application of linear models in animal breeding / C. R. Henderson. – University of Guelph, 1984. – 462 p.
7. Калашников, В. В. Теория и практика разведения русского рысака: дис. ... д-ра сельскохозяйственных наук: 06.02.01 / В. В. Калашников. – Санкт-Петербург; Пушкин, 1994. – 55 с.
8. О племенном деле в животноводстве: Закон Респ. Беларусь, 20 мая 2013, № 24-3 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2013. – 21 мая. – № 2/2022.

References

1. On approval of zootechnical rules on the order of determination of the genetic value of animals: ruling by the Agriculture and Food Ministry of the Republic of Belarus, 30 November 2006, No 81. *The National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <http://www.pravo.by/document/?guid=3961&p0=W206p0263>. (accessed 21 November 2016) (in Russian).
2. On approval of zootechnical rules on the order of determination of the productivity of breeding animals, breeding flocks and of assessment of phenotypic and genotypic characters of breeding animals: ruling by the Agriculture and Food Ministry of the Republic of Belarus, 03 September 2013. *Legislation of the Republic of Belarus*. Available at: <http://pravo.newsby.org/belarus/postanov0/pst216.htm>. (accessed 21 November 2016) (in Russian).
3. Popkov N. A., Sheiko I. P., Petrushko I. S., Koronets I. N., Fedorenkova L. A., Karseko N. V., Mostovoi D. E., Sergienia T. V. *Republican program on breeding in livestock for 2007–2010. Basic zootechnical documents on selective breeding in animal breeding*. Zhodino, 2008, pp. 445–459. (in Russian).
4. *Manual on the Valuation of Factory-Breed Horses*. Moscow, 1991. 25 p. (in Russian).
5. Zavertyaev B. P. *Short Dictionary of Breeding and Genetic Terms in Animal Breeding*. Moscow, Rosselkhozizdat, 1983. 88 p. (in Russian).
6. Henderson C. R. *Application of linear models in animal breeding*. University of Guelph, 1984. 462 p.
7. Kalashnikov V. V. *Theory and Practice of Breeding a Russian Trotter*. Saint-Petersburg, Pushkin, 1994. 55 p. (in Russian).
8. On the breeding business in animal breeding: The Law of the Republic of Belarus of 20 May 2013, No 24-3. *Natsional'nyi reestr pravovyykh aktov Respubliki Belarus'* [National Registry of Legal Acts of the Public of Belarus], 2013, no. 2/2022. (in Russian).

Информация об авторах

Герман Юрий Иванович – канд. с.-х. наук, доцент, НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: belhorses@tut.by.

Шейко Иван Павлович – академик, д-р с.-х. наук, профессор, первый заместитель генерального директора, НПЦ НАН Беларуси по животноводству (ул. Фрунзе, 11, 222160, Жодино, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: belniig@tut.by.

Information about the authors

German Yury Ivanovich – Ph. D. (Agrarian), Assistant Professor, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: belhorses@tut.by.

Sheiko Ivan Pavlovich – Academician, D. Sc. (Agrarian), Professor, Vice Deputy General Director, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on Animal Husbandry (11, Frunze Str., 222160, Zhodino, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: belniig@tut.by.

Для цитирования

Герман, Ю. И. Оценка племенной ценности лошадей ганноверской и траккенской пород / Ю. И. Герман, И. П. Шейко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 105–113.

For citation

German Y. I., Sheyko I. P. Estimation of the breeding value of the hannover and trakehner breeds of horses. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 105–113 (in Russian).

Член-корреспондент З. В. Ловкис, А. В. Куликов

НПЦ НАН Беларуси по продовольствию, Минск, Республика Беларусь

АНАЛИЗ ОТХОДООБРАЗОВАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ СПОСОБЕ ОЧИСТКИ КАРТОФЕЛЯ

В сообщении рассмотрены особенности и изложены теоретические основы механического способа очистки картофеля как наиболее часто применяемого при производстве продуктов из картофеля, рассмотрены его достоинства и недостатки, определены рациональные технологические параметры механической очистки. Установлена взаимосвязь между количеством отходов, образующихся в процессе механической очистки картофеля, и размерами клубней. На основании исследования влияния параметров клубней, траектории и скорости их движения в барабанных и валковых очистительных машинах и действующих на клубень сил, установлена зависимость количества образующихся отходов. Проведен анализ количества отходов, образующихся при очистке различного размера клубней картофеля на барабанной очистительной машине МОК-350, разработаны рекомендации по повышению эффективности очистки.

Ключевые слова: картофель, механическая очистка, отходы, кривизна, оборудование.

Corresponding Member Z. V. Lovkis, A. V. Kulikou

Scientific and Practical Center for Foodstuffs, Minsk, Republic of Belarus

ANALYSIS OF WASTE DURING THE MECHANICAL POTATO PEELING

The article describes the features and theoretical fundamentals of the mechanical method for potato peeling as most frequently used for manufacturing potato products, its advantages and disadvantages are considered, rational technological parameters of mechanical peeling are determined. The relationship between the amount of waste formed in the process of mechanical potato peeling and tuber sizes is established. Based on the results of the influence of parameters of tubers, the trajectory and speed of their movement in drum and roll peeling machines and action upon tuber forces, the dependence of the amount of waste is found. The amount of waste forming during the peeling of different-size potato tubers in the drum peeling machine MOK-350 is analyzed, and the recommendations to improve the peeling effectiveness are developed.

Keywords: potato, mechanical cleaning, waste, curvature, equipment.

Интенсивный расход сырья растительного и животного происхождения ставит человечество перед проблемой организации малоотходной энергосберегающей технологии промышленной переработки сырьевых ресурсов. Большое количество отходов производства выбрасывается без переработки, что приводит к потере ценных пищевых и кормовых компонентов и серьезным экологическим проблемам [1–3].

В настоящее время в картофелеперерабатывающей отрасли выделение сухих веществ сырья на получение основной продукции (крахмал, пюре, снеки) составляет около 60 % [4; 5]. Почти половина перерабатываемого сырья переходит в отходы. Исходя из опыта работы промышленности и из литературных данных установлено, что очистка картофеля является процессом, при котором образовывается наибольшее количество отходов [6].

Все существующие способы очистки картофеля условно подразделяются на три основные группы: механические, термические, химические [7; 8].

В настоящее время наиболее широко применяемыми являются механические и термические способы очистки картофеля.

В литературе широко представлены результаты исследований отхообразование при термическом способе очистки картофеля [9].

Количество отходов, образующихся в процессе как механической, так и термической очистки, зависит от качества сырья, технологических режимов процесса и применяемого оборудова-

ния. В общем случае количество образующихся отходов при очистке ($Q_{\text{отх}}$) находится в функциональной зависимости

$$Q_{\text{отх}} = f(R_{\text{ср}}; \tau; K_c),$$

где $R_{\text{ср}}$ – геометрический показатель размера картофельного клубня, м; τ – продолжительность процесса очистки, с; K_c – коэффициент, характеризующий способ очистки.

Механический способ очистки заключается в удалении наружных тканей картофеля шероховатыми поверхностями (преимущественно абразивными), при этом снимается кожица, глазки и часть мякоти клубня с различными дефектами. Перед очисткой проводится инспектирование, калибровка и мойка клубней.

Механический способ очистки не обеспечивает полного удаления с поверхности клубней глазков и других различных дефектов, вследствие чего очищенный картофель необходимо подвергать ручной доочистке.

Количество отходов, образующихся в процессе очистки – это не что иное, как количество сырья, перешедшего в отходы в процессе очистки.

Численное значение отходов, как показал анализ процесса термической очистки, в конечном итоге зависит от усредненного радиуса клубня картофеля и от толщины проваренного слоя поверхности клубня, косвенно от температуры пара на процессе очистки и продолжительности температурного воздействия.

При термическом способе очистки глубина проварки слоя поверхности клубня не зависит от формы и размера клубня, находящегося в движении, поскольку все зоны его поверхности одинаково доступны для контакта с паром высокого давления.

При механическом способе очистки наружные ткани картофеля истираются шероховатыми поверхностями рабочих органов очистительной машины, при этом по мере увеличения толщины слоя обработанной поверхности клубня, увеличивается количество удаляемой кожицы, глазков, всевозможных дефектов и, одновременно, здоровой части мякоти клубня. При этом по мере увеличения продолжительности очистки клубня доля истираемой здоровой части клубня постоянно возрастает.

В настоящее время для механической очистки корнеклубнеплодов широкое применение нашли отечественные барабанные очистительные машины серии КОУ и МОК, валковые машины [7; 8; 10].

Конструктивной особенностью барабанных машин для механической очистки корнеклубнеплодов является то, что машина снабжена вертикальным цилиндрическим барабаном, на внутреннюю поверхность которого нанесен прочный абразивный слой. Днище барабана, внутренняя поверхность которого также снабжена абразивным слоем, подключено к приводу и способно вращаться в заданном режиме.

Принцип действия машины состоит в том, что в барабан загружают порцию сырья и включают привод днища машины. В начальный послепусковой период идет интенсивное истирание клубней на поверхности соприкосновения их с абразивной поверхностью днища. Под воздействием сил трения между абразивной поверхностью и клубнями последние приобретают сложную траекторию движения внутри барабана: во-первых, они приобретают окружную скорость внутри барабана и соответственно центростремительное ускорение; во-вторых, центробежная сила отбрасывает клубни на внутреннюю стенку неподвижного барабана машины, при этом под воздействием силы трения о боковую абразивную стенку осуществляется истирание поверхности клубней и возникает вращающий момент каждого в отдельности клубня, соприкасающегося с неподвижной абразивной поверхностью, в результате чего находящиеся в круговом движении внутри барабана клубни приобретают вращательное движение вокруг некоторых, импровизированных на данный момент собственных осей вращения. Следует отметить, что положение собственных осей вращения в клубнях относительно собственных морфологических осей (длина, наибольший диаметр, наименьший диаметр) под воздействием сил трения об абразивные поверхности и сил взаимодействия между клубнями постоянно меняется, в результате чего по ис-

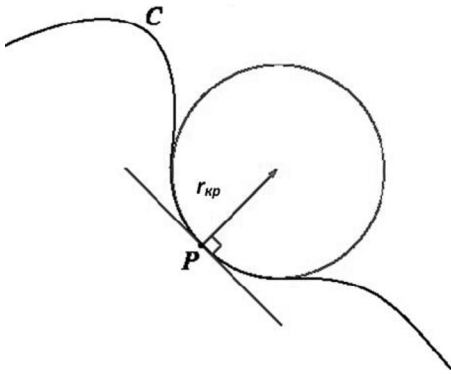


Рис. 1. Схема «кривизны кривой линии»
Fig. 1. Driving “the curvature of the curve”

длиной, то вторая производная по $t - f''(t) = K_p$; K_p – называется «кривизной кривой» в точке $P = f(t)$.

Величина, обратная кривизне кривой ($1/K_p = r_{кр}$) называется радиусом кривизны.

Радиус кривизны совпадает с радиусом соприкасающейся окружности в данной точке кривой. Центр этой окружности называется центром кривизны.

Рассмотрим сущность кривизны линии (поверхности) на процессе механической очистки клубней картофеля. Представим два возможных случая воздействия абразивной поверхности на клубни (рис. 2).

В соответствии с рис. 2, *a* клубню K изначально сообщается некоторая линейная скорость V , с которой он попадает на абразивную поверхность L . В начальный момент соприкосновения с абразивной поверхностью между клубнем и поверхностью возникает сила трения, которую можно определить из уравнения

$$N_{тр} = m_k g S b,$$

где $N_{тр}$ – удельная сила трения, Н; m_k – масса клубня, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; S – площадь соприкосновения между клубнем и абразивной поверхностью, м²; b – коэффициент трения между картофельным клубнем и абразивной поверхностью.

Далее клубень за счет силы трения $N_{тр}$, направленной противоположно движущей силе F , теряет скорость до нуля и останавливается на абразивной поверхности. Для продолжения процесса перемещения клубня по абразивной поверхности требуется новый импульс усилия для придания клубню некоторой скорости относительно абразивной поверхности и так далее, до полной очистки поверхности клубня.

Характерным показателем для данного процесса очистки является то, что сила прижатия клубня к абразивной поверхности определяется силой тяжести клубня $m_k g$.

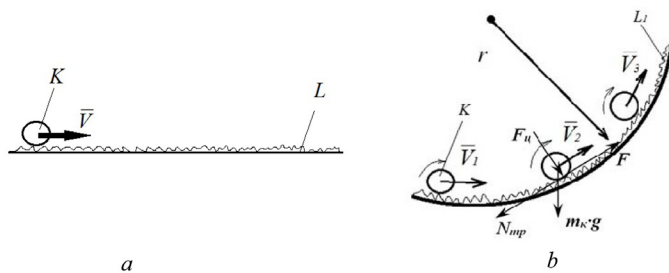


Рис. 2. Схема воздействия абразивной поверхности на картофельные клубни: *a* – прямолинейная абразивная поверхность; *b* – криволинейная абразивная поверхность

Fig. 2. Driving impact on the abrasive surface of potato tubers: *a* – a rectilinear abrasive surface; *b* – curved abrasive surface

течении некоторого промежутка времени очистки клубни оказываются всесторонне равномерно истертыми.

Валковые машины для механической очистки корнеклубнеплодов от кожуры состоят из ряда параллельно установленных, вращающихся с одинаковой скоростью горизонтальных валов, на поверхности которых вмонтированы цилиндрические абразивные элементы, которые и осуществляют процесс.

Для установления взаимосвязи между количеством отходов, образующихся в процессе механической очистки картофеля, и размерами клубней воспользуемся понятием «кривизна поверхности» [11–13].

Установлено, что если имеющая место во всех точках определения кривая C функции $y = f(t)$ (рис. 1) выражена

Для данного случая очистки на горизонтальной абразивной поверхности $r_{кр} = \infty$ и соответственно кривизна равна нулю ($K = 0$).

На криволинейной поверхности в соответствии с рис. 2, *b* клубню K изначально также сообщается некоторая линейная скорость V , с которой он попадает на абразивную криволинейную поверхность L_1 с радиусом кривизны $r_{кр}$. Попадая на вогнутую очистительную поверхность со скоростью \bar{V} (отметим, что вектор скорости клубня всегда направлен по касательной к поверхности клуб-

ня в точке его соприкосновения с кривой очищающей поверхностью), клубень обязан изменить направление своего движения в соответствии с кривизной очищающей поверхности, т. е., попадая на криволинейную поверхность, клубень движется в некоторый период времени по окружности. В этот период на него действует центростремительное ускорение, направленное к центру вращения, и центробежная сила, направленная по радиусу от центра кривизны

$$F_{ц} = \frac{m_k V^2}{r_{кр}},$$

где $F_{ц}$ – центробежная сила, Н; m_k – масса клубня, кг; V – линейная скорость клубня, м/с; $r_{кр}$ – радиус кривизны поверхности, на которой в данный момент находится клубень, м.

$$V = \omega r_{кр},$$

где ω – угловая скорость, рад/с.

Сопоставляя два значения величины прижатия клубня к очищающей поверхности $m_k g$ и $\frac{m_k V^2}{r_{кр}}$ можем отметить, что на криволинейной поверхности сила прижатия клубня к абразивной поверхности больше силы прижатия клубня к горизонтальной поверхности в $\frac{m_k V^2}{r_{кр}} = \frac{V^2}{r_{кр} g}$

раз. Таким образом, сила прижатия очищаемого элемента клубня к кривой очищающей поверхности прямо пропорциональна квадрату линейной скорости, с которой он перемещается по кривой и обратно пропорциональна радиусу кривизны очищаемой поверхности. Для данного случая $r_{кр}$ имеет некоторое определенное значение, $k > 0$.

Сопоставляя оба вышеописанных случая можно определить линейную скорость, с которой клубень перемещается по криволинейной поверхности, и кривизну очищающей поверхности в очистительных машинах, что определяет степень давления продукта на очищающую поверхность.

Эти параметры являются важнейшими при проектировании механических очистительных машин и выборе режимов очистки корнеклубнеплодов.

Учитывая кривизну и радиус кривизны поверхности, а также взаимосвязь между ними, представим схематически положение картофельных клубней с усредненными радиусами r_1 и r_2 среди массы картофеля в очистительной барабанной машине (рис. 3).

Для механической барабанной машины с радиусом очистительного барабана R_m радиус кривизны поверхности барабана и геометрический радиус окружности в сечении барабана совпадают. Кривизна окружности в сечении барабана является постоянной величиной и равна $1/R_m$, приобретает конкретное числовое значение.

В соответствии с представленной схемой клубни картофеля в очистительном барабане раскладываются некоторым слоем толщиной δ . Практически свободного пространства как перед клубнем с большим радиусом, так и перед клубнем с малым радиусом – нет. Оба клубня, перемещаясь по внутренней стенке барабана очистительной машины, некоторое время Δt испытывают сопротивление движению, создаваемое абразивной поверхностью и частично истираются. В то же время вращаясь вокруг собственных осей, находясь в стесненном состоянии, они перемещаются на одинаковое расстояние ΔL по внутренней поверхности очистительного барабана за тот же промежуток времени Δt .

Следовательно, для одного кратковременного соприкосновения клубней с очищающей поверхностью

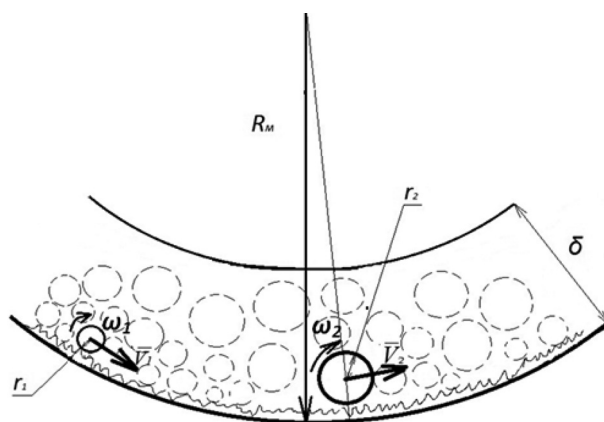


Рис. 3. Схема положения картофельных клубней в барабанной очистительной машине

Fig. 3. Scheme of the provisions of potato tubers in a drum cleaning machines

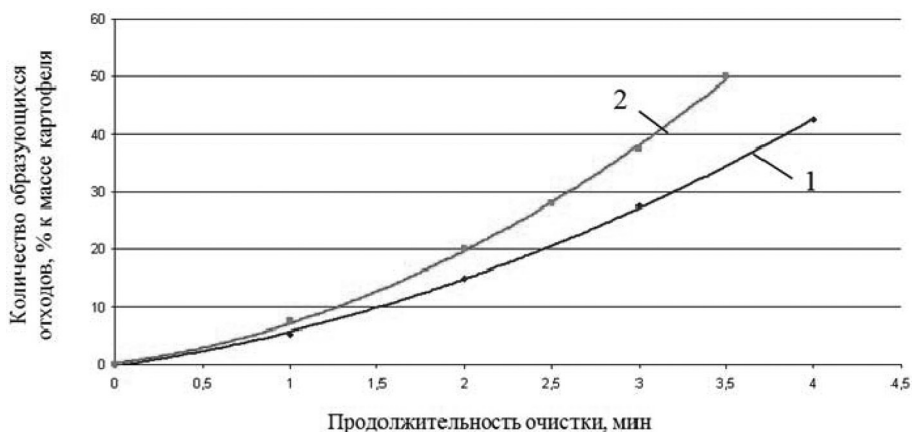


Рис. 4. Влияние продолжительности очистки на количество отходов, образующихся при очистке картофеля на очистительной машине МОК-350: 1 – усредненный радиус очищаемых клубней 35 мм; 2 – усредненный радиус очищаемых клубней 24 мм

Fig. 4. Effect of treatment on the amount of waste generated during cleaning of a potato on a cleaning machine MOK-350: 1 – average radius of treated tubers 35 mm; 2 – average radius of 24 mm of treated tubers

$$\Delta L = 2\pi r_1 V_1 \Delta\tau = 2\pi r_2 V_2 \Delta\tau, \text{ м,}$$

где V_1 и V_2 – соответственно окружные скорости перемещения клубней картофеля вокруг собственных осей при перемещении на ΔL за время $\Delta\tau$ (с).

Для множества соприкосновений клубней с очищающей поверхностью барабана очистительной машины перемещение составит

$$L = \sum \Delta L = \sum_0^{\tau} 2\pi r_1 V_1 \Delta\tau = \sum_0^{\tau} 2\pi r_2 V_2 \Delta\tau,$$

т. е. $r_1 V_1 = r_2 V_2$ или $\frac{r_1}{r_2} = \frac{V_2}{V_1}$.

При прохождении клубнями картофеля по очищающей поверхности одного и того же расстояния L клубень с меньшим средним радиусом соприкоснется с данной поверхностью во столько раз чаще, во сколько раз его радиус меньше. Это позволяет сделать следующий вывод: количество отходов, снимаемых с каждого в отдельности клубня на одной и той же очищающей поверхности, отнесенное к начальным массам клубней, обратно пропорционально значению их усредненных радиусов.

Отсюда следует, что перед механической очисткой картофеля с целью снижения потерь сырья с отходами обязательно необходимо проводить предварительную калибровку, после чего подавать в очистительную машину только клубни близкого по интервалу значений усредненного радиуса.

Анализ конструктивных особенностей устройств для механической очистки корнеклубнеплодов показывает, что помимо исследованных параметров линейной скорости клубня в барабане и кривизны барабана на работоспособность машины, качество очищенных клубней и количество образующихся отходов влияют размер частиц абразива на абразивной поверхности и особенности конструкции разгонного днища очистительной машины, а также коэффициент изношенности абразивной поверхности.

На рис. 4 представлены результаты исследований в виде зависимости влияния продолжительности очистки на количество отходов на очистительной машине МОК-350 [14] для клубней картофеля с усредненным радиусом клубней 24 и 35 мм.

Выводы. Анализ качества получаемого очищенного картофеля и представленных графиков позволяет сделать выводы:

1. Перед механической очисткой картофеля с целью снижения потерь сырья с отходами, необходимо проводить предварительную калибровку, после чего подавать в очистительную машину клубни близкого по интервалу значений усредненного радиуса.

2. Продолжительность процесса механической очистки зависит от качества картофеля (наличия и глубины залегания глазков, формы и дефектов клубня), состояния очистительного аппарата и не должна превышать 3 мин, при этом уровень отходообразования может составлять до 25 % от массы очищаемого картофеля.

3. Проведение глубокой механической очистки картофеля (продолжительность очистки увеличивают до 5 мин) повышает количество отходов до 50 %, однако при этом практически полностью отпадает необходимость в процессе доочистки. Целесообразность осуществления данного процесса должна определяться технологами предприятия.

Список использованных источников

1. Жалейко, Г. А. Переработка отходов / Г. А. Жалейко. – Минск: Белорусский научно-исследовательский центр «Экология», 1991. – 215 с.
2. Денщикова, М. Т. Отходы пищевой промышленности и их использование / М. Т. Денщикова. – М.: Пищепромиздат, 1963. – 162 с.
3. Воротеницкая, С. Л. Комплексное использование сырья и отходов в пищевой промышленности / С. Л. Воротеницкая, Б. И. Суменков, А. Б. Шахов // Консервная промышленность. – 1974. – № 10. – С. 5–8.
4. О картофеле, который мы перерабатываем / М. П. Шабета [и др.] // Картофелеводство: сб. науч. тр. – Минск, 2008. – Вып. 15. – С. 358.
5. Куликов, А. В. К анализу вопроса отходообразования в крахмальном производстве / А. В. Куликов, М. П. Шабета // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2010. – № 2. – С. 39–44.
6. Ловкис, З. В. Картофелеперерабатывающая отрасль Республики Беларусь: состояние и перспективы развития / З. В. Ловкис, А. В. Куликов // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2011. – № 2. – С. 24–30.
7. Дытнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии / Ю. И. Дытнерский. – М.: Химия, 1995. – 600 с.
8. Малахов, Н. Н. Процессы и аппараты пищевых производств / Н. Н. Малахов, Ю. М. Плаксин, В. А. Ларин. – Орел: Изд. ОГТУ, 2001. – 687 с.
9. Куликов, А. В. Анализ отходообразования при паровом способе очистки картофеля / А. В. Куликов, М. П. Шабета // Инновационные технологии в пищевой промышленности: тез. докл. IX Междунар. науч.-практ. конф., 8–9 окт. 2010 г. – Минск, 2010. – С. 173–175.
10. Ловкис, З. В. Комплекс для производства картофельного крахмала / З. В. Ловкис, Д. А. Зайченко, А. В. Куликов // Агропанорама. – 2008. – № 1 (65). – С. 14–17.
11. Краткий курс высшей математики [Электронный ресурс] // Научная библиотека избранных естественнонаучных изданий. – Режим доступа: http://stusernam.ru/book_msh.php?id=198. – Дата доступа: 16.11.2016.
12. Кривизна плоских линий [Электронный ресурс] // Math24.ru. Дифференциальные уравнения. – Режим доступа: <http://www.math24.ru/кривизна-плоских-линий.html>. – Дата доступа: 18.11.2016.
13. Кривизна и радиус кривизны кривой [Электронный ресурс] // Научная библиотека избранных естественнонаучных изданий. – Режим доступа: http://sernam.ru/lect_math2.php?id=85. – Дата доступа: 18.11.2016.
14. Ефимова, В. А. О картофелечистках [Электронный ресурс] / В. А. Ефимова, Т. А. Непочатых // Ценник. Главное – цена! – Режим доступа: <http://cennik.in.ua/index.php/uk/articlesuk/14-pitanie/8-potato>. – Дата доступа: 20.11.2016.

References

1. Zhaleiko G. A. *Recycling*. Minsk, Belarusian Research Center “Ecology”, 1991. 215 p. (in Russian).
2. Denshchikov M. *Food industry wastes and their use*. Moscow, Pishchepromizdat Publ., 1963. 162 p. (in Russian).
3. Vorotenietskaya S. L., Sumenkov B. I., Shakhov A. B. Integrated use of raw material and wastes in food industry. Canning industry. *Konservnaia promyshlennost'* [Canning industry], 1974, no. 10, pp. 5–8 (in Russian).
4. Shabeta M. P., Romanov S. L., Sokolova Z. A., Luz'ko O. N. About the potato we are processing. *Kartofelevodstvo: sbornik nauchnykh trudov* [Potato growing: a collection of scientific works]. Minsk, 2008, is. 15, pp. 358 (in Russian).
5. Kulikov A. V., Shabeta M. P. Analysis of the waste formation in starch production. *Pishchevaia promyshlennost': nauka i tekhnologii* [Food industry: science and technology], 2010, no. 2, pp. 39–44 (in Russian).
6. Lovkis Z. V., Kulikov A. V. Potato processing industry of the Republic of Belarus: state-of-art-of the problem and development perspectives. *Pishchevaia promyshlennost': nauka i tekhnologii* [Food industry: science and technology], 2011, no. 2, pp. 24–30 (in Russian).
7. Dytnerskiy Yu. I. *Processes and apparatus of chemical technology*. Moscow, Chemie Publ., 1995. 600 p. (in Russian)
8. Malakhov N. N., Plaksin Yu. M., Larin V. A. *Processes and devices of food production*. Orel, Orel State Technical University, 2001. 687 p. (in Russian).

9. Kulikov A. V., Shabeta M. P. Analysis of the waste formed when using the steam method of potato peeling. *Innovatsionnye tekhnologii v pishchevoi promyshlennosti: tezisy dokladov IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 8–9 oktiabria 2010 g.* [Innovation technologies in food industry: Book of Abstracts of the IX International Scientific-Practical Conference, 8–9 October 2010]. Minsk, 2010, pp. 173–175 (in Russian).

10. Lovkis Z. V., Zaichenko D. A., Kulikov A. V. Potato starch production complex. *Agropanorama* [Agropanorama], 2008, no. 1, pp. 14–17 (in Russian).

11. Short course of higher mathematics. *Scientific library of selected natural science publications*. Available at: http://stusernam.ru/book_msh.php?id=198 (accessed 16 November 2016) (in Russian).

12. Curvature of flat lines. *Math24.ru. Differential Equations*. Available at: <http://www.math24.ru/кривизна-плоских-линий.html> (accessed 18 November 2016) (in Russian).

13. Curvature and the curvature radius of the curve. *Scientific library of selected natural science publications*. Available at: http://sernam.ru/lect_math2.php?id=85 (accessed 18 November 2016) (in Russian).

14. Efimova V. A., Nepochatykh T. A. About potato peelers. *Price list. The main thing is the price!* Available at: <http://cennik.in.ua/index.php/uk/articlesuk/14-pitanie/8-potato> (accessed 20 November 2016) (in Russian).

Информация об авторах

Ловкис Зенон Валентинович – член-корреспондент, д-р техн. наук, профессор, генеральный директор, НПЦ НАН Беларуси по продовольствию (ул. Козлова, 29, 220037, Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@belproduct.com.

Куликов Алексей Валентинович – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, НПЦ НАН Беларуси по продовольствию (ул. Козлова, 29, 220037, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kand2009@tut.by.

Для цитирования

Ловкис, З. В. Анализ отходообразования при механическом способе очистки картофеля / З. В. Ловкис, А. В. Куликов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 114–120.

Information about the authors

Lovkis Zenon Valentinovich – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, General Director, Scientific and Practical Center for Foodstuffs (29, Kozlov Str., 220037, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: info@belproduct.com.

Kulikov Aleksey Valentinovich – Ph. D. (Engineering), Senior researcher, Scientific and Practical Center for Foodstuffs (29, Kozlov Str., 220037, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kand2009@tut.by.

For citation

Lovkis Z. V., Kulikou A. V. Analysis of waste during the mechanical potato peeling. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 114–120 (in Russian).

ISSN 0002–354X (print)

УДК 636.2.034:637.116

Поступило в редакцию 03.02.2017

Received 03.02.2017

В. О. Китиков*НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, Минск, Республика Беларусь***ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ВАКУУМНОГО КОНТУРА
ДОИЛЬНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИ ЩАДЯЩЕГО ПРОЦЕССА
МАШИННОГО ДОЕНИЯ КОРОВ***(Представлено членом-корреспондентом В. В. Азаренко)*

В сообщении приведены результаты исследований, цель которых – обоснование режимных параметров рабочего вакуумного контура доильных установок с повышенной стабильностью давления, обеспечивающих бесстрессовое молоковыведение. Бесстрессовость является одним из необходимых условий физиологически щадящего процесса машинного доения коров, позволяющего увеличить продуктивное долголетие животных и их молочную продуктивность, а также снизить уровень удельных затрат при производстве молока.

В результате исследований разработан рабочий вакуумный контур с повышенной стабильностью давления, отличающийся новой функциональной и пространственной структурой. Обоснован эффективный диапазон давления в рабочем вакуумном контуре, а также параметры стабильности давления, включая градиент давления по длине трубопроводов, временную нестабильность, амплитуду пульсаций давления и коэффициент релаксации этих пульсаций.

Ключевые слова: машинное доение, бесстрессовость, рабочий вакуумный контур.

V. O. Kitikov*Scientific and Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization,
Minsk, Republic of Belarus***RATIONALE OF VACUUM OPERATING CIRCUITS REGIME PARAMETERS OF MILKING MACHINES FOR
PHYSIOLOGICALLY SPARING PROCESS OF COWS MACHINE MILKING***(Communicated by Corresponding Member V. V. Azarenko)*

There are the research results, whose purpose is to justify the regime parameters of the vacuum operating circuit of milking units with high pressure stability, providing stress-free lactation. The “stress-free milking mode” is one of the necessary conditions for the physiologically sparing process of cow machine milking, allowing one to increase the productive longevity of animals and their milk productivity and to reduce unit costs in the milk production.

As a result of research, a working vacuum circuit with an increased pressure stability of pressure has been developed, which is characterized by a new functional and spatial structure. Justified is the effective pressure range in the vacuum operating circuit, as well as pressure stability parameters, including a pressure gradient along the pipeline length, a temporary instability, an amplitude of pressure pulsations, and relaxation coefficient of these pulsations.

Keywords: machine milking, stress-free, vacuum operating circuit.

Введение. Одной из главных научно-технических задач в молочной отрасли в настоящее время является совершенствование процесса машинного доения. Жесткий режим работы доильного оборудования часто приводит к травмированию животных. Следствием этого является высокая заболеваемость коров маститом (иногда до 30 % стада), что негативно отражается на их молочной продуктивности (количество и качество молочного сырья) [1–3]. Так как уровень удельных затрат в значительной степени определяется молочной продуктивностью коров и только в процессе машинного доения реализуется непосредственный контакт вымени с рабочими органами доильного аппарата, несовершенство этого процесса сводит на нет усилия коллектива всей отрасли. В связи с этим, не умаляя значимости сбалансированного кормления, условий содержания животных в коровнике и зооветеринарной профилактики, можно утверждать, что в настоящее время именно процесс машинного доения играет ключевую роль в повышении молочной продуктивности, так как если процесс машинного доения и доильное оборудование не-

эффективны (травмируют коров), то генетический потенциал, кормление и условия преддоильного содержания животных не имеют решающего значения.

В работе [1] показано, что процесс машинного доения нуждается в инновационной модернизации, связанной прежде всего с привлечением новейших знаний из молекулярной биологии и учетом физиологического состояния животных. В результате анализа процесса машинного доения установлено, что на полноту забора молока из вымени животных большое влияние оказывают величина давления разрежения в рабочем вакуумном контуре и стабильность этого давления.

Стресс животных на ферме вызывается целым рядом причин, которые в основном обусловлены несовершенством процесса машинного доения. Бесстрессовость является необходимым условием доения, так как появляющийся при стрессе в крови животных адреналин блокирует окситоцин, благодаря которому молоко из альвеол переходит в цистерну вымени. Для реализации физиологически щадящего процесса машинного доения большое значение имеет правильный выбор такого параметра, как давление разрежения в рабочем вакуумном контуре. Как показал опыт отечественных и зарубежных хозяйств, повышение давления разрежения приводит к увеличению заболеваемости маститом, а его чрезмерное уменьшение – к неполному выдаиванию коров. В обоих случаях неправильно выбранный диапазон давления приводит к снижению молочной продуктивности.

Давление разрежения в рабочем вакуумном контуре – это движущая сила, которая обеспечивает молоковыведение и транспортирование молока в технологические емкости. Очевидно, что чем больше перепад давления между выменем животного и коллектором доильного аппарата, тем больше скорость молоковыведения, и наоборот. Перепад давления не должен вызывать болевых ощущений у животных. Анализируя работы отечественных и зарубежных ученых, а также сложившуюся практику в молочном животноводстве, можно прийти к выводу, что номинальный уровень давления разрежения должен находиться в диапазоне 38–50 кПа [3–6]. В связи с тем, что в научно-технической литературе нет четких сведений об оптимальной величине давления разрежения, и даже в какой-то степени эти данные противоречат друг другу, обоснование диапазона давления разрежения в рабочем вакуумном контуре для реализации физиологически щадящего процесса машинного доения представляет научный и практический интерес.

Кроме величины давления, одной из причин гидродинамического травмирования животного является нестабильность давления, а также высокая амплитуда его пульсации, возникающие при съеме–надевании подвесной части доильного аппарата, что отрицательно сказывается на количестве и качестве молочного сырья

Цель работы – обоснование режимных параметров рабочего вакуумного контура, способствующих реализации физиологически щадящего процесса машинного доения.

Материалы и методы исследований. Рабочий вакуумный контур выполняет две ключевые функции в процессе машинного доения – выведение молока из вымени в коллектор и транспортирование его к месту охлаждения и временного хранения. Рабочий контур представляет собой гидравлическую систему, содержащую несколько типов гидравлических трактов, отличающихся по своим характеристикам. К гидравлическим трактам относятся трубопроводы с однофазным воздушным потоком и трубопроводы, по которым движется двухфазный поток молоковоздушной смеси (молокопроводы); молокосорники, где благодаря значительному объему внутреннего пространства, скорость потока стремится к нулю, в связи с чем происходит разделение жидкой и газообразной фаз (молока и воздуха); и доильные стаканы, в которых осуществляется смена тактов сосания и сжатия при молоковыведении.

Стабильность давления в рабочем вакуумном контуре определяется четырьмя характеристиками: градиентом давления по длине трубопроводов (Па/м), временной нестабильностью (Па), амплитудой пульсаций давления, вызываемой надеванием–снятием доильных стаканов (Па) и коэффициентом релаксации этих пульсаций (Па·с).

В настоящее время для большинства белорусских молочных ферм характерно применение доильного оборудования, разработанного в 1960–1970-е годы, которое на сегодняшний день

является морально устаревшим. Рабочий вакуумный контур этого оборудования содержит в себе следующие элементы: доильные аппараты, вакуумную систему, систему вакуумных и молочно-вакуумных трубопроводов, молокоприемник с системой отделения молока от воздуха и молочным насосом, один ресивер с одним воздушным клапаном мембранного или пружинного принципа действия, необходимым для стабилизации давления в контуре [7; 8].

Анализ этих экспериментальных данных, полученных в результате тестирования известного рабочего вакуумного контура, позволил сделать вывод о том, что стабильность давления в контуре является недостаточной, что приводит к возникновению стресса животных в процессе машинного доения. В частности, градиент давления в контуре приводит к тому, что треть коров в группе выдаивается при давлении разрежения ≈ 44 кПа, треть – при ≈ 46 кПа, а еще одна треть – при ≈ 48 кПа. Так как коровы занимают доильные места случайным образом, то при каждой дойке они выдаиваются при разных значениях давления разрежения. Низкая стабильность давления при машинном доении не позволяет сформировать у животных устойчивый условный рефлекс молоковыведения. Однако более существенным недостатком известного контура является недопустимо высокая амплитуда пульсации давления до 45 кПа, вызываемая случайным характером начала и окончания доения коров на соседних доильных местах. Травмирование вымени животного в результате гидродинамического удара, при котором давление в подсосковом пространстве изменяется от 50 до 95 кПа, вызывает выброс адреналина, блокирующего комфортный процесс доения, и, как следствие – снижение удоев и качества молока, неоправданно высокую выбраковку животных из-за мастита [1; 9].

Комплекс мероприятий, направленных на повышение стабильности давления в рабочем вакуумном контуре, включает разработку новых принципов его функционирования и структурную реорганизацию, в том числе симметричность, закольцованность, увеличение объема ресиверов, существенное увеличение количества управляемых воздушных клапанов [10].

Принцип симметричности заключается в расположении двух пар «ресивер–молокоприемник» симметрично относительно центра доильного зала (рис. 1). Симметричность предопределяет равенство давлений в контуре вдоль оси симметрии контура.

Принцип закольцованности позволяет создать замкнутый контур, что дополнительно обеспечивает повышение однородности давления.

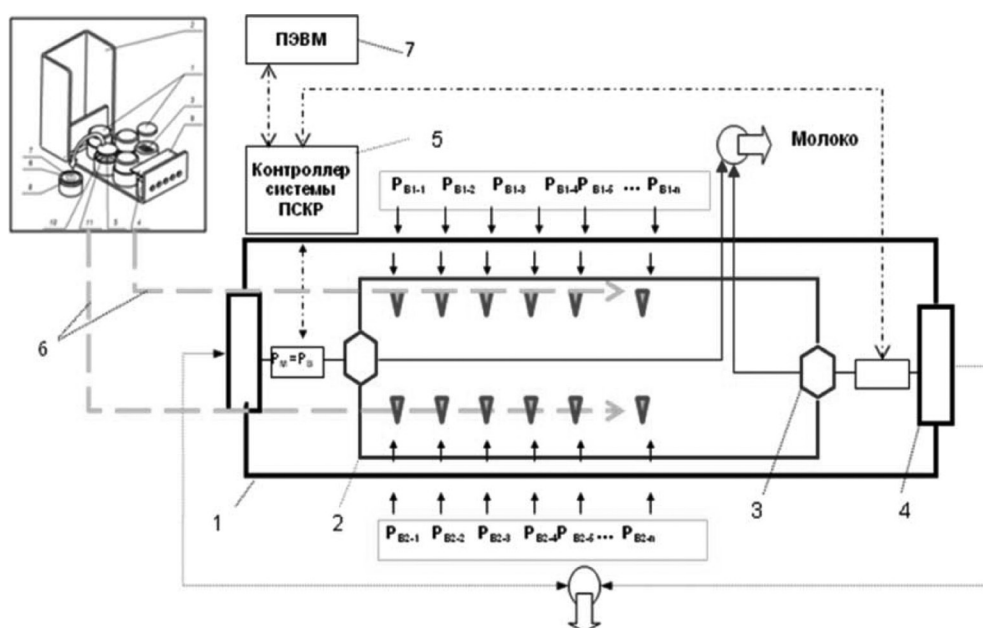


Рис. 1. Схема рабочего вакуумного контура с повышенной стабильностью давления: 1 – вакуумпровод; 2 – молокопровод; 3 – молокоприемник; 4 – ресивер; 5 – контроллер; 6 – система воздушных клапанов; 7 – компьютер

Fig. 1. Schematic view of the working vacuum circuit with increased pressure stability: 1 – vacuum line; 2 – milk line; 3 – milk collector; 4 – receiver; 5 – controller; 6 – air valve system; 7 – computer

Наличие большого числа воздушных клапанов (один на каждое доильное место) позволяет оперативно стабилизировать давление при различных вариантах изменения его величины, например, при окончании доения на соседнем доильном месте, и не допускает скачков давления на других доильных местах. Вместе с тем стабилизация давления в такой системе при большом количестве управляемых факторов становится чрезвычайно сложной и может быть реализована только при наличии автоматизированного управления на основе применения информационной управляющей системы, которая для своего функционирования требует фундаментального изучения массообменных процессов в рабочем контуре.

С учетом описанных выше принципов был разработан новый рабочий вакуумный контур, включающий в себя доильные аппараты, два симметрично расположенных молокоприемных узла с системой отделения молока от воздуха и молочными насосами, вакуумную систему, вакуумпроводы, два симметрично расположенных ресивера, контроллер децентрализованной системы полноконтурного параметрического контроля, обеспечивающий непрерывный контроль и стабилизацию давления в контуре. Система включает в себя n -количество воздушных электромагнитных клапанов и датчиков давления, а также систему управления, реализованную в виде отдельного контроллера, взаимодействующего с датчиками, персональный компьютер (ПК) и исполнительные механизмы (см. рис. 1). Эти устройства обеспечивают стабильность давления в процессе машинного доения в режиме автоматизированного управления за счет работы их в противофазе с неуправляемым натеканием, что является важнейшим преимуществом предложенного контура.

Результаты и их обсуждение. Можно предположить, что оптимальный режим машинного доения должен в некоторой степени имитировать естественный процесс взаимодействия теленка и коровы. Анализ такого взаимодействия показывает, что воспроизведение естественного процесса в полном объеме для промышленного производства молока неприемлемо. Давление разрежения, которое создает теленок, составляет величину 17–20 кПа. Теленок делает 8 подходов в сутки, высасывая в общей сложности до 12 кг молока. Время одного подхода составляет ≈ 5 мин. Так как общее время сосания около 40 мин, то максимальная скорость молоковыведения составляет 0,3 кг/мин. Однако такая скорость доения при промышленном производстве молока не обеспечит требуемый уровень рентабельности.

Время нахождения окситоцина в крови животных ограничено 4–5 мин [11]. Поэтому при разовом удое в 10 кг/гол/дойка, скорость забора молока из вымени животных должна равняться 2–2,5 кг/мин, что на порядок превышает скорость «естественного» выдаивания.

Так как полное выдаивание коров без окситоцина в крови невозможно, то для обеспечения полноты альвеолярного выдаивания приходится повышать скорость забора молока из вымени за счет повышения давления разрежения в рабочем вакуумном контуре. Высокий уровень давления разрежения (48–50 кПа) позволяет выдоить корову за относительно небольшое время, однако при этом существенно увеличивается вероятность гидродинамического травмирования вымени, и, следовательно, заболевания маститом. Низкий уровень давления разрежения (38–42 кПа) приводит к снижению вероятности заболевания коров маститом, однако при этом проблематично организовать полноту альвеолярного выдаивания за время действия гормона (4–5 мин), а это отрицательно скажется и на величине удоев, и на величине жирности, так как только последние порции альвеолярного молока обладают максимально высокой жирностью (15–20 %). Поэтому уровень давления в рабочем вакуумном контуре это своего рода компромисс, между производительностью процесса, количеством и качеством молочного сырья и здоровьем животных.

Для определения приемлемого диапазона давления рассмотрим процесс натекания газа¹ из объема доильного зала в рабочий вакуумный контур (негерметичные уплотнения узлов, калиброванные отверстия в коллекторе, воздушные клапаны). Сразу после включения вакуумного насоса разность давления между магистральным вакуум-проводом и атмосферой будет невелика, и скорость натекания газа в контур не будет превосходить нескольких метров в секунду. При дальнейшем медленном понижении давления в контуре скорость натекания газа будет повышаться (рис. 2).

¹ Имеется в виду воздух, нормальные условия: $P_N = 1,01325 \cdot 10^5$ Па, $T_N = 20$ °.

Создаваемые насосом в вакуумном контуре возмущения давления распространяются со скоростью звука против движения газа в вакуумном контуре из атмосферы. Возмущение давления из вакуумного контура будет передаваться в атмосферу доильного зала до тех пор, пока скорость натекания газа не достигнет скорости звука.

После этого возмущения давления не смогут выйти в атмосферу, так они будут сноситься звуковым потоком газа. Продолжающееся понижение давления в вакуумном контуре не изменит характер натекания газа из атмосферы в контур, и скорость натекания газа в вакуумный контур будет постоянной, равной скорости звука. При дальнейшем уменьшении давления в вакуумном контуре ($P < P_{кр}$, см. рис. 2) наступает явление «запирания» отверстия, через которое натекает газ, несмотря на то что давление в вакуумном контуре продолжает уменьшаться.

Согласно [12], массовый расход воздуха dM / dt (кг/(м²·с)), натекающего в рабочий вакуумный контур, определяется соотношением

$$\frac{dM}{dt} = \begin{cases} \left(\frac{2}{1+k} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{k\rho_0 p_0} \sqrt{\left(\frac{k+1}{k-1} \right) \left(\frac{1+k}{2} \right)^{\frac{2}{k-1}} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, & p \geq p_0 \left(\frac{2}{1+k} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \\ \left(\frac{2}{1+k} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{k\rho_0 p_0}, & p < p_0 \left(\frac{2}{1+k} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \end{cases}$$

где $k = 1,4$ – показатель адиабаты для двухатомного газа (воздух); $\rho_0 = 1,202$ кг/м³ – плотность воздуха при нормальных условиях.

Две ветви этой функции соответствуют двум режимам натекания воздуха в рабочий вакуумный контур: верхняя – возрастающему дозвуковому, нижняя – постоянному звуковому, сопровождаемому известным явлением «запирания» потока. Критическое значение давления, при котором происходит смена режима течения, равно

$$p_{кр} = p_0 \left(\frac{2}{1+k} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,5285 p_0 = 53,53 \text{ кПа}. \quad (1)$$

Из (1) следует один очень важный вывод: переход воздуха из дозвукового режима натекания в звуковой, который осуществляется при критическом давлении $p_{кр} = 0,5283 p_0 = 53,530$ кПа (что соответствует давлению разрежения в рабочем вакуумном контуре $\Delta p = p_0 - p = 101,325 - 53,530 = 47,795 \approx 47,8$ кПа), приводит к возникновению в термодинамически неустойчивом недорасширенном потоке воздуха, имеющем сложную пространственную газодинамическую структуру, автоколебаний, приводящих к наличию скачков уплотнения и областей разрежения (эффект Гартмана [13]). Пульсации давления газа в вакуумном контуре вызывают болевое ощущение и травмирование вымени при машинном доении, что провоцирует стресс у животных со всеми вытекающими отсюда последствиями: выделение в кровь адреналина, блокирующего окситоцин, и, как следствие этого, неполное выдаивание, снижение жирности, увеличение содержания соматических клеток, увеличение вероятности заболевания маститом, снижение продуктивного долголетия.

Поэтому для реализации бесстрессового дозвукового режима натекания, давление в рабочем вакуумном контуре должно быть больше критического $p > 53,5$ кПа, что соответствует давлению разрежения $\Delta p < 47,8$ кПа. По-видимому, этим можно объяснить тот факт, что на практике, еще в начале XX в., был оставлен безопасный интервал верхней границы давления разрежения

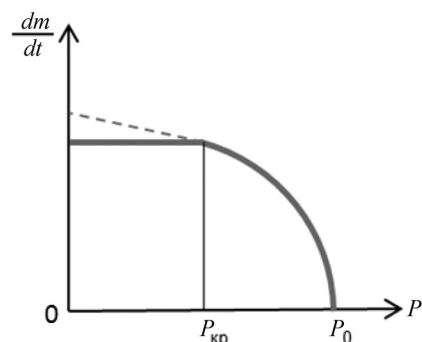


Рис. 2. Зависимость скорости натекания воздуха от давления разрежения в рабочем вакуумном контуре

Fig. 2. Air flow velocity as a function of rarefaction pressure in the working vacuum circuit

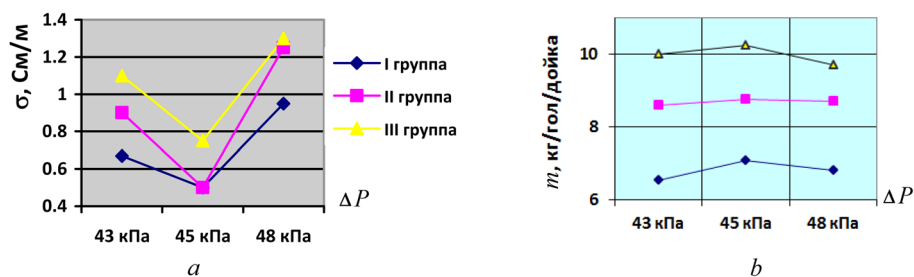


Рис. 3. Зависимость электропроводности молока (а) и разового удоя (b) от давления разрежения в рабочем вакуумном контуре

Fig. 3. Electrical conductivity of milk (a) and one-time milk (b) as a function of rarefaction pressure in the working vacuum circuit

при машинном доении, равный 50 кПа. Верхняя граница давления была определена эмпирически и, по-видимому, недостаточно точно.

Процесс машинного доения достаточно полно характеризуется двумя параметрами, которые учитывают и молочную продуктивность, и здоровье коров [10]:

1) σ – электропроводность молока (См/м). Это универсальный комплексный параметр, так как он характеризует не только качество молочного сырья (чем выше жирность молока и ниже содержание соматических клеток, тем ниже электропроводность), но, что самое главное, состояние здоровья основного «технологического объекта» – коровы (чем лучше здоровье коровы, тем ниже содержание соматических клеток, и, следовательно, ниже электропроводность молока). Электропроводность молока, которое допускается для употребления в качестве продукта питания, не должна превышать 0,85 См/м;

2) m – разовый удой молока (кг/гол/дойка). Этот параметр количественно характеризует полноту выдаивания животных, которая зависит от физиологического состояния коров, времени суток и времени лактационного периода, а также условий преддоильного содержания.

На рис. 3 приведены зависимости электропроводности молока и разового удоя от давления разрежения в рабочем вакуумном контуре [14].

Экспериментальные данные, приведенные на рис. 3, а, подтверждают сделанный ранее вывод: давление разрежения более 48 кПа недопустимо, так как возникающие пульсации автоколебаний «недорасширенного» потока газа приводят к болевым ощущениям и травмированию вымени, что вызывает стресс у животных, приводящий к недопустимому уровню концентрации соматических клеток и, следовательно, к росту электропроводности получаемого молока. Данные, приведенные на рис. 3, b, также подтверждают этот вывод, так как из-за частичной блокировки окситоцина адреналином, появляющегося в крови животных при стрессе, падают удои.

Нижняя допустимая граница давления разрежения обусловлена необходимостью реализации процесса молоковыведения за время действия окситоцина. Если скорость забора молока недостаточна, то это отразится на молочной продуктивности, так как падают и удои, и жирность молока. Из экспериментальных данных, приведенных на рис. 3, а, видно, что при давлении разрежения меньше 43 кПа электропроводность возрастает, что обусловлено в данном случае уменьшением жирности молока. Эту же тенденцию подтверждают данные, приведенные на рис. 3, b: при давлении разрежения менее 43 кПа начинают падать удои.

В [10; 15] приведены результаты измерения зависимости давления разрежения в разработанном рабочем вакуумном контуре от его длины. Анализ экспериментальных данных показал, что на каждом доильном месте градиент давления не превышает величину 0,01 кПа/м, что обусловлено симметричностью и закольцованностью пространственной структуры рабочего вакуумного контура. Другие параметры стабильности давления разрежения в разработанном контуре следующие: временная нестабильность $\pm 0,3$ кПа, амплитуда пульсаций при надевании–съемке доильных аппаратов не более 6 кПа, коэффициент релаксации давления 6 кПа·с. Для сравнения в известном вакуумном контуре соответствующие величины равны: 0,1 кПа/м (в 10 раз больше); ± 2 кПа (в 7 раз больше); 45 кПа (в 7,5 раза больше); 26 кПа·с (в 4,5 раза больше). Полученные параметры стабильности давления разрежения в рабочем вакуумном контуре обеспечивают бес-

стрессовый характер машинного доения, способствуют формированию условного рефлекса молоковыведения и создают условия для разработки физиологически щадящего процесса машинного доения [10].

Выводы.

1. Разработка рабочего вакуумного контура доильных установок с повышенной стабильностью давления является базовым условием инновационной модернизации процесса машинного доения коров. В предложенном рабочем вакуумном контуре стабильность давления (градиент давления в трубопроводах, временная нестабильность, амплитуда пульсаций и коэффициент релаксации давления) достигается за счет:

разработки специальных принципов проектирования пространственной структуры рабочего вакуумного контура (симметричность контура, закольцованность, увеличение объема ресиверов, существенное увеличение количества управляемых воздушных клапанов);

построения балансной математической модели массообменных процессов, связанных с движением воздушных и жидкостных потоков, позволяющей разработать программное обеспечение для автоматизированного управления величиной давления в рабочем вакуумном контуре;

встраивания информационных управляющих систем для автоматизированного управления давлением в рабочем вакуумном контуре, что обеспечило полноконтурный децентрализованный контроль давления, превышение максимальной скорости контролируемого натекания воздуха по сравнению с максимальной скоростью неконтролируемого натекания.

2. В результате теоретического изучения процессов натекания воздуха в рабочий вакуумный контур из атмосферы установлено, что при давлении в контуре $p_{кр} = 53,5$ кПа (давление разрежения 47,8 кПа) происходит переход натекания атмосферного воздуха из дозвукового режима в звуковой, что сопровождается автоколебаниями с высокой амплитудой давления, травмирующими вымя животного, вызывающими болевое ощущение у коров при машинном доении (стресс), что, в свою очередь, приводит к снижению молокоотдачи. Поэтому верхняя граница давления разрежения при машинном доении не должна превышать 47,8 кПа.

3. В ходе экспериментальной проверки установлено, что в диапазоне давления разрежения 38–47 кПа стабильность давления в рабочем вакуумном контуре характеризуется следующими величинами: градиент давления в трубопроводе длиной 42 м составляет 0,01 кПа/м, временная нестабильность $\pm 0,3$ кПа, амплитуда пульсации давления при надевании–съеме доильных стаканов менее 6 кПа, коэффициент релаксации давления менее 6 кПа·с. Для сравнения, в известном рабочем вакуумном контуре аналогичные параметры равны: 0,1 кПа/м, ± 2 кПа, 45 кПа, 20 кПа·с соответственно.

Обоснованные параметры рабочего вакуумного контура с повышенной стабильностью давления, способствуя бесстрессовому характеру доения, создают предпосылки для реализации физиологически щадящего процесса машинного доения.

Список использованных источников

1. Китиков, В. О. Стратегическое направление машинного доения коров / В. О. Китиков, А. Н. Леонов // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2013. – № 4. – С. 91–104.
2. Барановский, М. Повышение качества молока при машинном доении коров / М. Барановский, А. Курак, Т. Агейчик // Гл. зоотехник. – 2006. – № 6. – С. 70–71.
3. Курак, А. С. Повышение эффективности технологии машинного доения / А. С. Курак. – Жодино: НАНБ ин-т животноводства, 2003. – 84 с.
4. Kupczyk, A. Doskonalenie warunków doju mechanicznego: rozprawa habilitacyjna / A. Kupczyk. – Warszawa, 1999. – 115 s.
5. Harms, J. Automatisches Melken – Eine Möglichkeit auch für das Berggebiet / J. Harms, G. Wendl // ART-Schriftenreihe – Ettenhausen, 2010. – N 12. – P. 13–18.
6. Винников, И. К. Динамика стабилизации вакуума в доильных установках / И. К. Винников, С. А. Дмитренко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 3. – С. 14–16.
7. Цой, Ю. А. Процессы и оборудование доильно-молочных отделений животноводческих ферм / Ю. А. Цой. – М.: Радуга, 2010. – 424 с.
8. Технологические основы и техническое обеспечение процессов производства молока и говядины / Н. В. Карзавец [и др.]; под общ. ред. В. Н. Дашкова. – Минск: БГАТУ, 2010. – 484 с.
9. Китиков, В. О. Базовые условия развития технологий молочного скотоводства с применением информационных управляющих систем / В. О. Китиков, А. Н. Леонов // Вестн. ВНИИМЖ. Сер. Механизация, автоматизация и технологии в животноводстве. – 2013. – № 3 (11). – С. 52–58.

10. Китиков, В. О. Научные основы создания технологического оборудования и физиологически щадящего процесса машинного доения коров: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / В. О. Китиков. – Минск, 2015. – 60 с.
11. Кокорина, Э. П. Условные рефлексы и продуктивность животных / Э. П. Кокорина. – М.: Агропромиздат, 1986. – 335 с.
12. Лойцянский, А. Г. Механика жидкости и газа / А. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1973. – 340 с.
13. Глазнев, В. Н. Эффект Гартмана. Область существования и частоты колебаний / В. Н. Глазнев, Ю. Г. Коробейников // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т. 42, № 4. – С. 62–67.
14. Барановский, М. В. Оптимизированные параметры вакуумметрического давления при доении коров на установках УДА-24Е / М. В. Барановский, А. С. Курак, В. О. Китиков // Тр. XIV Междунар. симп. по машинному доению сельскохозяйств. животных. – Углич, 2008. – С. 232–239.
15. Китиков, В. О. Анализ эффективности эксплуатации доильных машин с рабочим вакуумом 43 и 48 кПа / В. О. Китиков, И. Н. Таркановский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – Минск, 2008. – Вып. 42. – С. 171–176.

References

1. Kitikov V. O., Leonov A. N. Strategic direction in the development of dairy machine. *Vestsi Natsyional'noi akademii navuk Belarusi. Seriya agrarnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, agrarian series], 2013, no. 4, pp. 91–104 (in Russian).
2. Baranovskii M., Kurak A., Ageichik T. *Improving the milk quality during cow machine milking. Glavnyi zootekhnik* [Glavnyi Zootekhnik], 2006, no. 6, pp. 70–71 (in Russian).
3. Kurak A. S. *Improving the machine milking technology efficiency. Zhodino, NASB Institute of Animal Husbandry*, 2003. 84 p. (in Russian).
4. Kupczyk A. *Doskonalenie warunków doju mechanicznego: rozprawa habilitacyjna*. Warszawa, 1999. 115 s. (in Poland).
5. Harms J., Wendl G. Automatisches Melken – Eine Möglichkeit auch für das Berggebiet. *ART-Schriftenreihe – Ettenhausen*, 2010, no. 12, pp. 13–18.
6. Vinnikov I. K., Dmitrenko S. A. Dynamics of vacuum stabilization in milking machines. *Mekhanizatsiia i elektrifikatsiia sel'skogo khoziaistva* [Mechanization and electrification of agriculture], 2009, no. 3, pp. 14–16 (in Russian).
7. Tsoi Yu. A. *Processes and equipment of milking parlors of cattle farms*. Moscow, Raduga Publ., 2010. 424 p. (in Russian).
8. Kazarovets N. V., Dashkov V. N., Kitikov V. O., Sorokin E. P. *Technological bases and technical support of milk and beef production*. Minsk, Belarusian State Agrarian and Technical University, 2010. 484 p. (in Russian).
9. Kitikov V. O., Leonov A. N. Basic conditions for the development of dairy cattle breeding technologies with the application of information controlling systems. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva. Seriya Mekhanizatsiia, avtomatizatsiia i tekhnologii v zhivotnovodstve* [Journal of VNIIMZH], 2013, vol. 11, no. 3, pp. 52–58 (in Russian).
10. Kitikov V. O. *Research fundamentals of designing technological equipment and physiologically sparing process of cow machine milking*. Minsk, 2015. 60 p. (in Russian).
11. Kokerina E. P. *Conditioned reflexes and animal productivity*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 335 p. (in Russian).
12. Loitsyanskii A. G. *Mechanics of liquid and gas*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 340 p. (in Russian).
13. Glaznev V. N., Korobeinikov Yu. G. Hartmann effect. Region of existence and oscillation frequencies. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2001, vol. 42, no. 4, pp. 616–620. doi.org/10.1023/a:1019247529314.
14. Baranovskii M. V., Kurak A. S., Kitikov V. O. Optimized parameters of vacuum pressure during cow milking on devices UDA-24E. *Trudy XIV Mezhdunarodnogo cimpoziuma po mashinnomu doeniiu sel'skokhoziaistvennykh zhivotnykh* [Proceedings of the XIV International Symposium on Machine Milking of Farm Animals]. Uglich, 2008, pp. 232–239 (in Russian).
15. Kitikov V. O., Tarkanovskii I. N. Analysis of the efficiency of use of milking machines with a working vacuum of 43 and 48 кПа. *Mekhanizatsiia i elektrifikatsiia sel'skogo khoziaistva: mezhvedomstvennyi tematiceskii sbornik* [Mechanization and electrification of agriculture: Interdepartmental thematic collection]. Minsk, 2008, vol. 42, pp. 171–176 (in Russian).

Информация об авторе

Китиков Вадим Олегович – д-р техн. наук, НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kitsikau@tut.by.

Для цитирования

Китиков, В. О. Обоснование режимных параметров рабочего вакуумного контура доильных установок для физиологически щадящего процесса машинного доения коров / В. О. Китиков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 2. – С. 121–128.

Information about the author

Kitikov Vadim Olegovich – D. Sc. (Engineering), Scientific and Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization (1, Knorin Str., 220049, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kitsikau@tut.by.

For citation

Kitikov V. O. Rationale of vacuum operating circuits regime parameters of milking machines for physiologically sparing process of cows machine milking. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 2, pp. 121–128 (in Russian).