

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

Выходит шесть номеров в год

Журнал основан в июле 1957 года

МИНСК, БЕЛОРУССКАЯ НАУКА, 2014, ТОМ 58, № 4

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Редакционная коллегия:

В. Г. Гусаков (главный редактор),
С. Я. Килин (заместитель главного редактора),
С. А. Чижик (заместитель главного редактора),
И. М. Богдевич, Н. А. Борисевич, П. А. Витязь,
И. Д. Волотовский, И. В. Гайшун, А. Е. Дайнеко, И. В. Залуцкий,
О. А. Ивашкевич, Н. А. Изобов, Н. С. Казак, А. А. Коваленя,
Ф. Ф. Комаров, И. В. Котляров, В. А. Лабунов, Ф. А. Лахвич, О. Н. Левко,
А. И. Лесникович, В. Ф. Логинов, А. А. Махнач, А. А. Михалевич, В. А. Орлович,
О. Г. Пенязьков, Ю. М. Плескачевский, А. Ф. Смянович,
Л. М. Томильчик, В. М. Федосюк, Л. В. Хотылева, И. П. Шейко,
ведущий редактор **Т. П. Петрович**

Адрес редакции:

220072, Минск, ул. Академическая, 1, к. 119,

тел. 284-19-19

<http://nasb.gov.by/rus/publications/dan/>

E-mail: doklady@open.by

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

Таныгина А. Н. Двухшаговый метод Ньютона–Канторовича для приближенного решения нелинейных операторных уравнений с регулярно гладкими операторами	5
Янович Л. А., Худяков А. П. Формулы интерполяции с произвольным числом матричных узлов и произвольными входными параметрами	11
Белокурский М. С., Деменчук А. К. Решение задачи Еругина о существовании нерегулярных решений линейной системы с треугольным периодическим коэффициентом	17
Бенедиктович В. И. Серединные собственные значения субкубического внешнепланарного графа . . .	23
Бахтин В. И., Воробей П. Н. Вычисление хаусдорфовых размерностей фракталов Морана с помощью кодирующих пространств	31
Лиходед Н. А., Толстикова А. А. Функции, задающие зависимости зернистых алгоритмов	35

ФИЗИКА

Комаров Ф. Ф., Ксенофонтов М. А., Ткачев А. Г., Кривошеев Р. М., Островская Л. Е., Родионова В. Н., Тогамбаева А. К. Влияние углеродных наноматериалов на структуру, электрофизические свойства полиуретана и эффективность экранировка от ЭМИ	42
---	----

ХИМИЯ

- Кривогуз Ю. М., Крауклис А. В., Песецкий С. С., Жданок С. А., Борисевич К. О.** Влияние многостенных нанотрубок на прививку транс-этилен-1,2-дикарбоновой кислоты к макромолекулам полиолефинов 47
- Григорьева Д. В., Горудко И. В., Соколов А. В., Шамова Е. В., Васильев В. Б., Панасенко О. М., Черенкевич С. Н.** Регуляция миелопероксидазой Ca^{2+} -сигнализации в нейтрофилах 55
- Хлебус М. В., Рубинов Д. Б., Грибовский М. Г., Лахвич Ф. А.** Синтез производных 5-аминолевулиновой кислоты с циклогексановыми β -ди- и β -трикетонами 61
- Вайнер А. А., Колупаев Ю. Е., Ястреб Т. О., Хрипач В. А.** Индуцирование солеустойчивости 24-эпибрассинолидом проростков проса (*Panicum miliaceum*) с участием активных форм кислорода 67

БИОЛОГИЯ

- Сапунова Л. И., Костеневич А. А., Лобанок А. Г., Тамкович И. О., Кулиш С. А., Бажанов Д. П., Яцевич К. К.** Ферментативная активность бактерий рода *Arthrobacter* и их генотипическая идентификация 71
- Зубрицкая Г. П., Лукьяненко Л. М., Венская Е. И., Слобожанина Е. И.** Индуцированная амилоидами модификация мембран эритроцитов человека. Влияние антиоксидантов 78
- Головач В. А., Зафранская М. М., Буланова К. Я., Сяхович В. Э., Цеколова А. С., Квач С. В., Зинченко А. И., Бокуть С. Б.** Особенности связывания бис-(3',5')-циклического димерного гуанозинмонофосфата с тетрамерами гемоглобина человека 82
- Самсонова А. С.** Технология и эффективность применения микробного препарата Экобел 87
- Михайлова М. Е., Романишко Е. Л.** Оценка полиморфизма *ESR1-PVUII* гена эстрогенового рецептора у свиней с использованием метода ПЦР-ПДРФ и технологии HRM-анализа 91

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Какарека С. В., Круковская О. Ю.** Особенности распределения диоксида азота в атмосферном воздухе улично-дорожной сети Минска 96

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Витязь П. А., Шматов А. А., Девойно О. Г.** Упрочнение быстрорежущих и штамповых сталей методом термоциклической обработки 101
- Тютюма В. Д.** Решение тепловой задачи в сдвиговом потоке локально-неравновесного течения вязкой жидкости 106

АГРАРНЫЕ НАУКИ

- Зайцева Н. Б., Гришанова О. В., Шейко Р. И., Янович Е. А., Бурнос А. Ч.** Анализ воспроизводительных качеств свиноматок различных генотипов 110

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

- Котляров И. В.** Политические партии Беларуси как симулякры социального пространства (социологическое измерение) 115

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ. 2014. Т. 58, № 4

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

Редактор Т. П. Петрович

Компьютерная верстка Н. И. Кашуба

Сдано в набор 14.08.2014. Выпуск в свет 29.08.2014. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 140 экз. Заказ 150.

Цена номера: индивидуальная подписка – 58 650 руб.; ведомственная подписка – 141 919 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, 2014

DOKLADY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

Published bimonthly

The journal has been published since July, 1957

MINSK, BELORUSSKAYA NAUKA, 2014, Vol. 58, N 4

Founder – National Academy of Sciences of Belarus

Editorial Board:

V. G. Gusakov (Editor-in-Chief),
S. Ya. Kilin (Associate Editor-in-Chief),
S. A. Chizhik (Associate Editor-in-Chief),
I. M. Bogdevich, N. A. Borisevich, A. Ye. Daineko, V. M. Fedosyuk, I. V. Gaishun,
O. A. Ivashkevich, N. A. Izobov, N. S. Kazak, L. V. Khotyleva, A. A. Kovalenya,
F. F. Komarov, I. V. Kotlyarov, V. A. Labunov, F. A. Lakhvich, O. N. Levko,
A. I. Lesnikovich, V. F. Loginov, A. A. Makhnach, A. A. Mikhalevich, V. A. Orlovich,
O. G. Penyazkov, Yu. M. Pleskachevsky, I. P. Sheiko, A. F. Smeyanovich, L. M. Tomilchik,
P. A. Vitiaz, I. D. Volotovskii, I. V. Zalutsky,
lead editor **T. P. Petrovich**

Address of the Editorial Office:

220072, Minsk, 1 Akademicheskaya Str., room 119

telephone: 284-19-19

<http://nasb.gov.by/eng/publications/dan/>

E-mail: doklady@open.by

CONTENTS

MATHEMATICS

- Tanyhina A. N.** Two-step Newton–Kantorovich method for approximate solution of nonlinear operator equations with regularly smooth operators 5
- Yanovich L. A., Hudyakov A. P.** Interpolation formulas with an arbitrary number of matrix nodes and arbitrary input parameters 11
- Belokursky M. S., Demenchuk A. K.** Solution of Erugin’s problem on the existence irregular solutions of the linear system with triangular periodic coefficient 17
- Benediktovich V. I.** Median eigenvalues of a subcubic outerplanar graph 23
- Bakhtin V. I., Vorobei P. N.** Calculation of Hausdorff dimensions of Moran’s fractals by means of encoding spaces. 31
- Likhoded N. A., Tolstikov A. A.** Functions assigning the dependences of grained algorithms. 35

PHYSICS

- Komarov F. F., Ksenofontou M. A., Tkachev A. G., Kryvasheyev R. M., Ostrovskaya L. E., Rodionova V. N., Togambaeva A. K.** Influence of carbon nanomaterials on the structure, electrophysical properties of polyurethane and EMR shielding efficiency 42

CHEMISTRY

- Krivoguz Yu. M., Krauklis A. V., Pesetskii S. S., Zhdanok S. A., Borisevich K. O.** Effect of multiwalled nanotubes on grafting of trans-ethylene-1,2-dicarboxylic acid onto polyolefin macromolecules 47
- Grigorieva D. V., Gorudko I. V., Sokolov A. V., Shamova E. V., Vasiliev V. B., Panasenko O. M., Cherenkevich S. N.** Regulation of Ca²⁺-signaling in neutrophils by myeloperoxidase 55
- Khlebus M. V., Rubinov D. B., Gribovsky M. G., Lakhvich F. A.** Synthesis of 5-aminolevulinic acid derivatives with cyclohexane β -di- and β -triketones. 61
- Vayner A. A., Kolupaev Yu. E., Yastreb T. O., Khripach V. A.** 24-Epibrassinolide induces salt tolerance of millet (*Panicum miliaceum*) seedlings involving reactive oxygen species 67

BIOLOGY

- Sapunova L. I., Kastsianevich A. A., Lobanok A. G., Tamkovich I. O., Kulish S. A., Bazhanau D. P., Yatsevich K. K.** Enzymatic activity of *Arthrobacter* genus bacteria and their genotypic identification 71
- Zubritskaya G. P., Lukyanenko L. M., Venskaya E. I., Slobozhanina E. I.** Amyloid-induced modification human erythrocyte membranes. Influence of antioxidants 78
- Golovach V. A., Zaphranskaya M. M., Bulanova K. Ya., Syakhovich V. E., Shchokolova A. S., Kvach S. V., Zinchenko A. I., Bokut S. B.** Peculiarity of bis-(3' 5')-cyclic dimeric guanosine monophosphate binding to human hemoglobin tetramers 82
- Samsonova A. S.** Technology and application efficiency of microbial preparation Ecobel. 87
- Mikhailova M. E., Ramanishka E. L.** Evaluation of the polymorphism ESR1-PVUII of the estrogen receptor gene in pigs using the PCR-RFLP method and the HRM-analysis technology 91

EARTH SCIENCES

- Kakareka S. V., Krukowskaya O. Y.** Peculiarities of the nitrogen dioxide distribution in the atmospheric air of the road network in Minsk 96

TECHNICAL SCIENCES

- Vitiaz P. A., Shmatov A. A., Devoino O. G.** Strengthening of high speed and stamp steels by the thermocycling heat treatment method 101
- Tyutyuma V. D.** Solution of a thermal problem in a shear locally nonequilibrium viscous fluid flow 106

AGRARIAN SCIENCES

- Zaytseva N. B., Grishanova O. V., Sheyko R. I., Yanovich E. A., Burnos A. Ch.** Analysis of reproductive qualities of different-genotype sows. 110

SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES

- Kotliaroy I. V.** Political parties of Belarus as simulacra of social area (sociological dimension) 115

МАТЕМАТИКА

УДК 517.988

А. Н. ТАНЫГИНА

**ДВУХШАГОВЫЙ МЕТОД НЬЮТОНА–КАНТОРОВИЧА
ДЛЯ ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ОПЕРАТОРНЫХ УРАВНЕНИЙ
С РЕГУЛЯРНО ГЛАДКИМИ ОПЕРАТОРАМИ**

(Представлено членом-корреспондентом В. В. Гороховиком)

Белорусский государственный университет, Минск

Поступило 30.06.2014

В работах [1; 2] был проведен анализ сходимости метода Ньютона–Канторовича [3] для решения операторных уравнений вида

$$f(x) = 0, \quad (1)$$

где $f: X \rightarrow Y$ – нелинейное отображение, дифференцируемое в каждой внутренней точке замкнутого шара $\overline{B}(x_0, R) \subset X$; X, Y – банаховы пространства; x_0 – известное начальное приближение. Последовательные приближения по методу Ньютона–Канторовича задаются равенствами

$$x_{n+1} = x_n - [f'(x_n)]^{-1} f(x_n) \quad (n = 0, 1, \dots). \quad (2)$$

Авторами указанных работ было введено новое понятие гладкости оператора f , названное *регулярной гладкостью*. В работе [4] было показано, что условие регулярной гладкости может быть заменено на более простое условие

$$\|f'(x'') - f'(x')\| \leq \omega((\chi - r - \|x'' - x'\|)^+ + \|x'' - x'\|) - \omega((\chi - r - \|x'' - x'\|)^+), \quad (3)$$

где $r = \|x' - x_0\|$; $\lambda^+ = \max\{\lambda, 0\}$, в записи которого приращение производной оператора f мажорируется приращением непрерывной строго возрастающей вогнутой скалярной функции $\omega: [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$, обладающей свойством $\omega(0) = 0$; $\chi \in [0, \omega^{-1}(1)]$ – некоторая постоянная.

Цель работы – установление результатов, аналогичных результатам из [4], для двухшагового метода Ньютона–Канторовича вида

$$\begin{cases} x_{n+1} = y_n - [f'(x_n)]^{-1} f(y_n) & (n = 0, 1, \dots), \\ y_n = x_n - [f'(x_n)]^{-1} f(x_n) & (n = 0, 1, \dots). \end{cases} \quad (4)$$

Метод (4) отличается от метода (2) тем, что в методе (4) $[f'(x_n)]^{-1}$ подсчитываются лишь на каждом втором шаге.

В работе [5] было проведено исследование сходимости метода (4) с использованием мажорант Канторовича [3]; при этом оператор f предполагался удовлетворяющим модифицированному условию Липшица

$$\|f'(x'') - f'(x')\| \leq k(\rho) \|x'' - x'\|, \quad \forall x', x'' \in \overline{B}(x_0, \rho), \quad 0 < \rho < R, \quad (5)$$

где k – неубывающая функция. В данной работе также будет использован принцип мажорант, однако рассматриваемое здесь условие (3) является более общим, чем условие (5), что позволяет

применить полученные результаты к более широкому классу нелинейных операторных уравнений вида (1).

1. Пусть $\Omega(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau$, число $a > 0$ удовлетворяет неравенству $\|f(x_0)\| \leq a$, $\chi \in [0, \omega^{-1}(1)]$. Без ограничения общности будем считать, что $f'(x_0) = I$. Обозначим через Φ функцию числового аргумента $t \in [0, \chi]$:

$$\Phi(t) = a - \Omega(\chi) + \Omega(\chi - t) - t(1 - \omega(\chi)). \quad (6)$$

Определим числовые последовательности $\{t_n\}$ и $\{s_n\}$ следующими рекуррентными соотношениями:

$$t_{n+1} = s_n + \frac{a - \Omega(\chi) + \Omega(\chi - s_n) - s_n(1 - \omega(\chi))}{1 - [\omega(\chi) - \omega(\chi - t_n)]}, \quad t_0 = 0; \quad (7)$$

$$s_n = t_n + \frac{a - \Omega(\chi) + \Omega(\chi - t_n) - t_n(1 - \omega(\chi))}{1 - [\omega(\chi) - \omega(\chi - t_n)]}, \quad (8)$$

$n = 0, 1, \dots$

Л е м м а. Пусть существует постоянная $\chi \in [0, \omega^{-1}(1)]$ такая, что выполнено неравенство

$$a \leq \Omega(\chi) - \chi\omega(\chi) + \chi \quad (9)$$

и функция (6) имеет единственный нуль t^* на отрезке $[0, \chi]$. Тогда последовательности $\{t_n\}$ и $\{s_n\}$ определены корректно, монотонно возрастают и сходятся к t^* , причем для любого $n = 0, 1, \dots$

$$t_n \leq s_n \leq t_{n+1} \leq t^*.$$

Д о к а з а т е л ь с т в о. Поскольку t^* – единственный нуль функции Φ , $\Phi(0) = a > 0$ и Φ непрерывна на $[0, \chi]$, то Φ принимает на отрезке $[0, t^*]$ неотрицательные значения. В силу свойств функции ω функция $\Phi'(t) = -\omega(\chi - t) - (1 - \omega(\chi))$ является отрицательной на отрезке $[0, t^*]$ (за исключением случая, когда $t = t^* = \chi = \omega^{-1}(1)$). Таким образом, функция

$$u(t) = -\frac{\Phi(t)}{\Phi'(t)}$$

неотрицательна на $[0, t^*]$. Следовательно, если для некоторого $n = 0, 1, \dots$ $t_n \in [0, t^*]$ и $s_n \in [0, t^*]$, то

$$s_n - t_n = \frac{a - \Omega(\chi) + \Omega(\chi - t_n) - t_n(1 - \omega(\chi))}{1 - [\omega(\chi) - \omega(\chi - t_n)]} = -\frac{\Phi(t_n)}{\Phi'(t_n)} \geq 0,$$

$$t_{n+1} - s_n = \frac{a - \Omega(\chi) + \Omega(\chi - s_n) - s_n(1 - \omega(\chi))}{1 - [\omega(\chi) - \omega(\chi - t_n)]} = -\frac{\Phi(s_n)}{\Phi'(t_n)} \geq 0,$$

откуда вытекает, что $t_n \leq s_n \leq t_{n+1}$ и, в частности, последовательность $\{t_n\}$ является монотонно возрастающей.

Покажем, что $t + u(t)$ – неубывающая функция на $[0, t^*]$.

Действительно,

$$(t + u(t))' = 1 + u'(t) = 1 + \left(\frac{\Phi(t)}{\omega(\chi - t) + 1 - \omega(\chi)} \right)' =$$

$$1 + \frac{\Phi'(t)(\omega(\chi - t) + 1 - \omega(\chi)) + \Phi(t)\omega'(\chi - t)}{(\omega(\chi - t) + 1 - \omega(\chi))^2} = \frac{\Phi(t)\omega'(\chi - t)}{(\omega(\chi - t) + 1 - \omega(\chi))^2} \geq 0$$

на $[0, t^*]$. Следовательно, если $t_n \leq t^*$, то

$$s_n = t_n + u(t_n) \leq t^* + u(t^*) = t^*.$$

Покажем, что $t_n \leq t^*$ для любого $n = 0, 1, \dots$. Для $n = 0$ неравенство верно: $t_0 = 0 \leq t^*$. Если предположить, что $t_n \leq t^*$, то в силу свойств функции ω имеем

$$t_{n+1} = s_n - \frac{\Phi(s_n)}{\Phi'(t_n)} \leq s_n - \frac{\Phi(s_n)}{\Phi'(s_n)} \leq t^* + u(t^*) = t^*,$$

откуда по индукции следует справедливость неравенства $t_n \leq t^*$ для любого $n = 0, 1, \dots$.

Таким образом, для любого $n = 0, 1, \dots$ имеют место неравенства

$$t_n \leq t^*, \quad s_n \leq t^*,$$

и, следовательно,

$$t_n \leq s_n \leq t_{n+1} \leq t^*.$$

Докажем, что последовательности $\{t_n\}$ и $\{s_n\}$ сходятся к t^* . Действительно, последовательность $\{t_n\}$ монотонно возрастает и ограничена. Следовательно, она сходится к некоторому $t^{**} \in [0, t^*]$. В силу принципа сжатой переменной последовательность $\{s_n\}$ также сходится к t^{**} . Переходя в равенстве $s_n = t_n + u(t_n)$ к пределу при $n \rightarrow \infty$, получим, что $t^{**} = t^{**} + u(t^{**})$, откуда $\Phi(t^{**}) = 0$. Поскольку t^* – единственный нуль функции Φ на отрезке $[0, \chi]$, то $t^{**} = t^*$.

Последовательности $\{t_n\}$ и $\{s_n\}$ определены корректно, поскольку для любого $n = 0, 1, \dots$ $t_n \leq \chi$ и $s_n \leq \chi$. Действительно, в силу условия (9) $\Phi(\chi) \leq 0 < a = \Phi(0)$ и, следовательно, существует $\theta \in (0, \chi]$ такое, что $\Phi(\theta) = 0$. Значит, $\theta = t^* = \lim_{n \rightarrow \infty} t_n$ и $t_n < \theta \leq \chi$ для любого $n = 0, 1, \dots$. В силу строгой монотонности функции ω значение $\omega(\chi - t_n) > 0$ для любого $n = 0, 1, \dots$. Случай $t_n = \theta$ исключен, иначе последовательность $\{t_n\}$ является стационарной. Лемма доказана.

2. Сформулируем основную теорему о сходимости метода (4).

Т е о р е м а. Пусть существует постоянная $\chi \in [0, \omega^{-1}(1)]$ такая, что выполнено неравенство (9), оператор f удовлетворяет на $B(x_0, R)$ условию (3) с таким χ и функция (6) имеет единственный нуль $t^* \leq R$ на отрезке $[0, \chi]$. Тогда

1) уравнение (1) имеет единственное решение x^* в шаре $\overline{B(x_0, t^*)}$;

2) последовательные приближения $\{x_n\}$, заданные соотношениями (4), определены для всех $n = 0, 1, \dots$, принадлежат шару $B(x_0, t^*)$ и сходятся к x^* ;

3) для всех $n = 0, 1, \dots$ справедливы оценки

$$\|x_{n+1} - x_n\| \leq t_{n+1} - t_n, \quad (10)$$

$$\|x^* - x_n\| \leq t^* - t_n, \quad (11)$$

где последовательность $\{t_n\}$ определена с помощью рекуррентных соотношений (7) и (8), монотонно возрастает и сходится к t^* .

Д о к а з а т е л ь с т в о. Доказательство первых двух утверждений теоремы повторяет доказательство аналогичных утверждений из [4], поэтому достаточно доказать справедливость оценок

$$\|x_{n+1} - y_n\| \leq t_{n+1} - s_n \quad (12)$$

и

$$\|y_n - x_n\| \leq s_n - t_n, \quad (13)$$

которые влекут справедливость оценки (10), а следовательно, и оценки (11).

Пусть $n = 0$. Тогда

$$\|y_0 - x_0\| = \|[f'(x_0)]^{-1} f(x_0)\| = \|f(x_0)\| \leq a = s_0 - t_0,$$

$$\|x_1 - y_0\| = \|[f'(x_0)]^{-1} f(y_0)\| = \|f(y_0)\| = \|f(y_0) - f(x_0) - f'(x_0)(y_0 - x_0)\| \leq$$

$$\int_0^1 \|f'((1-t)x_0 + ty_0) - f'(x_0)\| \|y_0 - x_0\| dt \leq$$

$$\int_0^1 (\omega(\chi - \|(1-t)x_0 + ty_0 - x_0\|)^+ + \|(1-t)x_0 + ty_0 - x_0\|) dt -$$

$$\begin{aligned} & \omega((\chi - \|(1-t)x_0 + ty_0 - x_0\|)^+) \|y_0 - x_0\| dt = \\ & \int_0^1 (\omega((\chi - t\|y_0 - x_0\|)^+ + t\|y_0 - x_0\|) - \omega((\chi - t\|y_0 - x_0\|)^+)) \|y_0 - x_0\| dt. \end{aligned}$$

Поскольку $\|y_0 - x_0\| \leq s_0 - t_0$, то $\chi - t\|y_0 - x_0\| \geq \chi - t(s_0 - t_0)$ при $0 \leq t \leq 1$, откуда в силу вогнутости и монотонности функции ω

$$\begin{aligned} & \omega((\chi - t\|y_0 - x_0\|)^+ + t\|y_0 - x_0\|) - \omega((\chi - t\|y_0 - x_0\|)^+) \leq \\ & \omega((\chi - t(s_0 - t_0))^+ + t(s_0 - t_0)) - \omega((\chi - t(s_0 - t_0))^+). \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \|x_1 - y_0\| & \leq \int_0^1 (\omega((\chi - t(s_0 - t_0))^+ + t(s_0 - t_0)) - \omega((\chi - t(s_0 - t_0))^+)) (s_0 - t_0) dt = \\ & \int_0^{s_0 - t_0} (\omega((\chi - \theta)^+ + \theta) - \omega((\chi - \theta)^+)) d\theta = \int_0^{s_0} (\omega((\chi - \theta)^+ + \theta) - \omega((\chi - \theta)^+)) d\theta. \end{aligned}$$

Поскольку $0 \leq \theta \leq s_0$, а в силу леммы $s_0 \leq \chi$, то $\chi - \theta \geq 0$ и окончательно получаем

$$\begin{aligned} \|x_1 - y_0\| & \leq \int_0^{s_0} (\omega(\chi) - \omega(\chi - \theta)) d\theta = \omega(\chi)s_0 + \int_0^{s_0} \omega(\chi - \theta) d(\chi - \theta) = \omega(\chi)s_0 + \int_{\chi}^{\chi - s_0} \omega(\tau) d\tau = \\ & \omega(\chi)s_0 + \int_0^{\chi - s_0} \omega(\tau) d\tau - \int_0^{\chi} \omega(\tau) d\tau = \omega(\chi)s_0 + \Omega(\chi - s_0) - \Omega(\chi) = t_1 - s_0. \end{aligned}$$

Таким образом, оценки (12) и (13) верны при $n = 0$. Предположим, что оценки (12) и (13) имеют место для всех $n < k$ и докажем их справедливость при $n = k$.

По предположению индукции

$$\begin{aligned} \|x_{k-1} - x_0\| & \leq \sum_{j=1}^{k-1} \|x_j - x_{j-1}\| \leq \sum_{j=1}^{k-1} (t_j - t_{j-1}) = t_{k-1}, \\ \|x_k - x_0\| & \leq \|x_k - x_{k-1}\| + \|x_{k-1} - x_0\| \leq t_k - t_{k-1} + t_{k-1} = t_k \end{aligned}$$

и

$$\|y_{k-1} - x_0\| \leq \|y_{k-1} - x_{k-1}\| + \|x_{k-1} - x_0\| \leq s_{k-1} - t_{k-1} + t_{k-1} = s_{k-1}.$$

Докажем оценку $\|y_k - x_k\| \leq s_k - t_k$. Имеем

$$\|y_k - x_k\| = \|[f'(x_k)]^{-1} f(x_k)\| \leq \|[f'(x_k)]^{-1}\| \|f(x_k)\|.$$

Обратимость оператора $f'(x_k)$ была доказана в [4] и там же было показано, что

$$\|[f'(x_k)]^{-1}\| \leq \frac{1}{1 - [\omega(\chi) - \omega(\chi - t_k)]}.$$

Далее,

$$\begin{aligned} \|f(x_k)\| & = \|f(x_k) - f(y_{k-1}) - f'(x_{k-1})(x_k - y_{k-1})\| \leq \\ & \int_0^1 \|f'((1-t)y_{k-1} + tx_k) - f'(x_{k-1})\| \|x_k - y_{k-1}\| dt \leq \\ & \int_0^1 (\omega(\chi - \|x_{k-1} - x_0\| - \|(1-t)y_{k-1} + tx_k - x_{k-1}\|)^+ + \|(1-t)y_{k-1} + tx_k - x_{k-1}\|) - \\ & \omega(\chi - \|x_{k-1} - x_0\| - \|(1-t)y_{k-1} + tx_k - x_{k-1}\|)^+) \|x_k - y_{k-1}\| dt. \end{aligned}$$

Пользуясь предположением индукции, получим

$$\begin{aligned} \|(1-t)y_{k-1} + tx_k - x_{k-1}\| &= \|y_{k-1} - x_{k-1} + t(x_k - y_{k-1})\| \leq \|y_{k-1} - x_{k-1}\| + t\|x_k - y_{k-1}\| \leq \\ & s_{k-1} - t_{k-1} + t(t_k - s_{k-1}) = (1-t)s_{k-1} + tt_k - t_{k-1}, \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} \chi - \|x_{k-1} - x_0\| - \|(1-t)y_{k-1} + tx_k - x_{k-1}\| &\geq \chi - t_{k-1} - ((1-t)s_{k-1} + tt_k - t_{k-1}) = \\ & \chi - ((1-t)s_{k-1} + tt_k) > 0. \end{aligned}$$

Следовательно, в силу вогнутости функции ω

$$\begin{aligned} \|f(x_k)\| &\leq \int_0^1 (\omega(\chi - t_{k-1}) - \omega(\chi - s_{k-1} - t(t_k - s_{k-1}))) (t_k - s_{k-1}) dt = \\ & \omega(\chi - t_{k-1})(t_k - s_{k-1}) - \int_0^1 \omega(\chi - s_{k-1} - t(t_k - s_{k-1}))(t_k - s_{k-1}) dt = \\ & \omega(\chi - t_{k-1})(t_k - s_{k-1}) + \int_{\chi - s_{k-1}}^{\chi - t_k} \omega(\theta) d\theta = \omega(\chi - t_{k-1})(t_k - s_{k-1}) + \int_0^{\chi - t_k} \omega(\theta) d\theta - \int_0^{\chi - s_{k-1}} \omega(\theta) d\theta = \\ & \omega(\chi - t_{k-1})(t_k - s_{k-1}) + \Omega(\chi - t_k) - \Omega(\chi - s_{k-1}). \end{aligned}$$

В силу определения последовательностей $\{t_k\}$ и $\{s_k\}$ для любого $k = 0, 1, \dots$ имеет место равенство

$$(1 - \omega(\chi) + \omega(\chi - t_k))(t_{k+1} - s_k) = a - \Omega(\chi) + \Omega(\chi - s_k) - s_k(1 - \omega(\chi)),$$

откуда

$$\begin{aligned} a - \Omega(\chi) &= -\Omega(\chi - s_k) + s_k(1 - \omega(\chi)) + (t_{k+1} - s_k)(1 - \omega(\chi)) + \omega(\chi - t_k)(t_{k+1} - s_k) = \\ & \omega(\chi - t_k)(t_{k+1} - s_k) - \Omega(\chi - s_k) + t_{k+1}(1 - \omega(\chi)). \end{aligned}$$

Заменяя в последнем выражении k на $k-1$, получим

$$a - \Omega(\chi) = \omega(\chi - t_{k-1})(t_k - s_{k-1}) - \Omega(\chi - s_{k-1}) + t_k(1 - \omega(\chi)). \quad (14)$$

С учетом равенства (14) оценка для $\|f(x_k)\|$ может быть переписана в виде

$$\|f(x_k)\| \leq a - \Omega(\chi) + \Omega(\chi - t_k) - t_k(1 - \omega(\chi)),$$

откуда

$$\|y_k - x_k\| \leq \frac{a - \Omega(\chi) + \Omega(\chi - t_k) - t_k(1 - \omega(\chi))}{1 - [\omega(\chi) - \omega(\chi - t_k)]} = s_k - t_k.$$

Докажем оценку $\|x_{k+1} - y_k\| \leq t_{k+1} - s_k$. Имеем

$$\begin{aligned} \|x_{k+1} - y_k\| &= \|[f'(x_k)]^{-1} f(y_k)\| \leq \|[f'(x_k)]^{-1}\| \|f(y_k)\|, \\ \|f(y_k)\| &= \|f(y_k) - f(x_k) - f'(x_k)(y_k - x_k)\| \leq \int_0^1 \|f'((1-t)x_k + ty_k) - f'(x_k)\| \|y_k - x_k\| dt \leq \\ & \int_0^1 (\omega(\chi - \|x_k - x_0\| - \|(1-t)x_k + ty_k - x_k\|)^+ + \|(1-t)x_k + ty_k - x_k\|) - \\ & \omega(\chi - \|x_k - x_0\| - \|(1-t)x_k + ty_k - x_k\|)^+) \|y_k - x_k\| dt. \end{aligned}$$

Поскольку $\|x_k - x_0\| \leq t_k$ и при $0 \leq t \leq 1$

$$\|(1-t)x_k + ty_k - x_k\| = \|x_k - tx_k + ty_k - x_k\| = t\|y_k - x_k\| \leq t(s_k - t_k),$$

то

$$\chi - \|x_k - x_0\| - \|(1-t)x_k + ty_k - x_k\| \geq \chi - t_k - t(s_k - t_k) = \chi - ((1-t)t_k + ts_k) > 0,$$

и, следовательно,

$$\|f(y_k)\| \leq \int_0^1 (\omega(\chi - t_k) - \omega(\chi - t_k - t(s_k - t_k)))(s_k - t_k) dt =$$

$$\begin{aligned} & \omega(\chi - t_k)(s_k - t_k) - \int_0^1 \omega(\chi - t_k - t(s_k - t_k))(s_k - t_k) dt = \\ & \omega(\chi - t_k)(s_k - t_k) + \int_{\chi - t_k}^{\chi - s_k} \omega(\theta) d\theta = \omega(\chi - t_k)(s_k - t_k) + \int_0^{\chi - s_k} \omega(\theta) d\theta - \int_0^{\chi - t_k} \omega(\theta) d\theta = \\ & \omega(\chi - t_k)(s_k - t_k) + \Omega(\chi - s_k) - \Omega(\chi - t_k). \end{aligned}$$

В силу определения последовательностей $\{t_k\}$ и $\{s_k\}$ для любого $k = 0, 1, \dots$ имеет место равенство

$$(1 - \omega(\chi) + \omega(\chi - t_k))(s_k - t_k) = a - \Omega(\chi) + \Omega(\chi - t_k) - t_k(1 - \omega(\chi)),$$

откуда

$$a - \Omega(\chi) = -\Omega(\chi - t_k) + t_k(1 - \omega(\chi)) + (s_k - t_k)(1 - \omega(\chi)) + \omega(\chi - t_k)(s_k - t_k)$$

или

$$a - \Omega(\chi) = \omega(\chi - t_k)(s_k - t_k) - \Omega(\chi - t_k) + s_k(1 - \omega(\chi)). \quad (15)$$

С учетом равенства (15) оценка для $\|f(y_k)\|$ может быть переписана в виде

$$\|f(y_k)\| \leq a - \Omega(\chi) + \Omega(\chi - s_k) - s_k(1 - \omega(\chi)),$$

откуда

$$\|x_{k+1} - y_k\| \leq \frac{a - \Omega(\chi) + \Omega(\chi - s_k) - s_k(1 - \omega(\chi))}{1 - [\omega(\chi) - \omega(\chi - t_k)]} = t_{k+1} - s_k.$$

Таким образом, оценки (12) и (13) имеют место и при $n = k$. Теорема доказана.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф13М-036).

Литература

1. Galperin A., Waksman Z. // J. Comp. Appl. Math. 1991. Vol. 35. P. 207–215.
2. Galperin A., Waksman Z. // Numer. Funct. Anal. and Optimiz. 1994. Vol. 15, N 7–8. P. 813–858.
3. Канторович Л. В., Акилов Г. П. Функциональный анализ в нормированных пространствах. М., 1959.
4. Забрейко П. П., Таныгина А. Н. // Докл. НАН Беларуси. 2013. Т. 57, № 6. С. 8–12.
5. Appel J., De Pascale E., Evkhuta N. A., Zabrejko P. P. // Math. Nachr. 1995. Vol. 172. P. 5–14.

A. N. TANYHINA

anast-minsk@yandex.ru

TWO-STEP NEWTON–KANTOROVICH METHOD FOR APPROXIMATE SOLUTION OF NONLINEAR OPERATOR EQUATIONS WITH REGULARLY SMOOTH OPERATORS

Summary

Two-step Newton–Kantorovich method for approximate solution of nonlinear equations with operators satisfying a modified condition of regular smoothness is considered. Using majorants, the convergence of this method is proved and estimates for the convergence rate are obtained.

УДК 517.548.5+519.652

Член-корреспондент Л. А. ЯНОВИЧ¹, А. П. ХУДЯКОВ²

**ФОРМУЛЫ ИНТЕРПОЛЯЦИИ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ЧИСЛОМ
МАТРИЧНЫХ УЗЛОВ И ПРОИЗВОЛЬНЫМИ ВХОДНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

¹Институт математики НАН Беларуси, Минск

²Брестский государственный университет им. А. С. Пушкина

Поступило 18.06.2014

Введение. Линейные формулы операторного интерполирования, по аналогии со случаем скалярных функций, используют обычно два узла интерполирования и соответственно имеют более простую структуру в сравнении с аналогичными формулами более высоких порядков [1; 2]. Однако для приложений важно, чтобы при приближенной замене нелинейного оператора линейным оператором интерполяционного типа совпадение значений этих операторов было по возможности в наибольшем числе различных точек. Это обычно позволяет увеличить точность приближения, что является одной из важных задач теории аппроксимации.

Другим классом интерполяционных формул, также полезных при решении практических задач, являются формулы, содержащие произвольные числовые величины или произвольные функции. Наличие в приближенных формулах произвольных параметров позволяет в каждом конкретном случае выбрать их с целью улучшения отдельных свойств численных алгоритмов, построенных на основе этого вида формул.

Работа посвящена построению интерполяционных формул такого класса. Для функций, заданных на множествах гладких матриц, получены интерполяционные матричные многочлены, содержащие произвольные матрицы, показана инвариантность построенных формул для отдельных классов матричных многочленов первой степени. Предложен способ построения на основе данного интерполяционного матричного многочлена фиксированной степени других интерполяционных многочленов той же степени, но с большим числом узлов.

Интерполяционные формулы, содержащие произвольные матрицы. Пусть $C^n(T)$ – пространство непрерывно дифференцируемых n раз на $T \subset \mathbb{R}$ матриц $A(t)$ и оператор $F(A) : C^n(T) \rightarrow Y$, где Y – также некоторое множество матриц. Обозначим через $\mathcal{P}_1(A)$ матричный многочлен на $C^n(T)$ первой степени вида

$$\mathcal{P}_1(A) = C_0(t) + \sum_{k=0}^n \sum_{j=0}^m C_{kj}(t) A^{(k)}(t_j) + \sum_{v=0}^n \int_{0T} P_v(t, s) A^{(v)}(s) ds, \tag{1}$$

где $P_v(t, s)$ – матрицы, для которых соответствующие интегралы в предыдущем равенстве существуют; $C_0(t)$ и $C_{kj}(t)$ – произвольные функциональные матрицы ($t, t_j, s \in T$).

Введем обозначение

$$S_{nm}(H) = \frac{1}{(m+1)(n+1)} \sum_{k=0}^n \sum_{i=0}^m [A_1^{(k)}(t_i) - A_0^{(k)}(t_i)]^{-1} H^{(k)}(t_i),$$

где t_0, t_1, \dots, t_m – некоторые фиксированные точки отрезка T ; $A_0(t), A_1(t), H(t) \in C^n(T)$. Через $F[A_0, A_1]H$ обозначим линейный по переменной H на $C^n(T)$ оператор вида

$$F[A_0, A_1]H = [F(A_1) - F(A_0)]S_{nm}(H) + \int_0^1 \delta F[G(\cdot, \tau); H(\cdot) - (A_1(\cdot) - A_0(\cdot))]S_{nm}(H) d\tau, \tag{2}$$

где $G(t, \tau)$ – произвольно заданная на $T \times [0, 1]$ матрица такая, что интеграл в (2) существует, а $\delta F[A; H]$ – дифференциал Гато оператора F в точке A по направлению H .

Т е о р е м а 1. Матричный многочлен

$$L_1(A) = F(A_0) + F[A_0, A_1](A - A_0), \quad (3)$$

где оператор $F[A_0, A_1]$ на пространстве $C^n(T)$ задается равенством (2), будет для $F(A)$ интерполяционным относительно узлов $A_0(t)$ и $A_1(t)$ многочленом первой степени. Формула (3) инвариантна для многочленов вида (1).

Д о к а з а т е л ь с т в о. Интерполяционные условия $L_1(A_k) = F(A_k)$ ($k = 0, 1$) выполняются, так как $F[A_0, A_1](A_1 - A_0) = F(A_1) - F(A_0)$. Покажем, что формула (3) точна для линейных операторов $F(A)$ вида (1). Очевидно, что если $F(A) = C_0(t)$, то $L_1(A) = C_0(t)$. Пусть $F(A) = A^{(k)}(t_j)$ в фиксированной точке t_j или $F(A) = A^{(k)}(t)$, где t – произвольная точка отрезка T ($j = 0, 1, \dots, m; k = 0, 1, \dots, n$). Тогда дифференциал Гато $\delta F[A; H]$ будет соответственно равен $\delta F[A; H] = H^{(k)}(t_j)$ или $\delta F[A; H] = H^{(k)}(t)$ по любому направлению $H(t) \in C^n(T)$.

Так как в нашем случае

$$H(t) = A(t) - A_0(t) - [A_1(t) - A_0(t)]S_{nm}(A - A_0),$$

причем матрица $S_{nm}(A - A_0)$ от переменной t не зависит, то для $F(A) = A^{(k)}(t_j)$ в силу структуры формулы (2) будем иметь

$$\begin{aligned} L_1(A) &= A_0^{(k)}(t_j) + [A_1^{(k)}(t_j) - A_0^{(k)}(t_j)]S_{nm}(A - A_0) + \\ &A^{(k)}(t_j) - A_0^{(k)}(t_j) - [A_1^{(k)}(t_j) - A_0^{(k)}(t_j)]S_{nm}(A - A_0) = A^{(k)}(t_j). \end{aligned}$$

Аналогично доказывается этот факт и для $F(A) = A^{(k)}(t)$, где t – произвольная точка T . Из вышеизложенного следует справедливость теоремы 1.

Рассмотрим далее в качестве примера определенный на матричном пространстве $C^n(T)$ дифференциальный оператор вида

$$F(A) = f(t, A, A^{(1)}, \dots, A^{(n)}), \quad (4)$$

где $A^{(k)} = \frac{d^k}{dt^k} A(t)$ ($k = 1, 2, \dots, n$), а $f(t, U_0, U_1, \dots, U_n)$ – функция числовой переменной t и матричных переменных $U_k = U_k(t)$ ($k = 0, 1, \dots, n$). Для этого оператора дифференциал Гато $\delta F[A; H]$ в точке A по направлению H ($A, H \in C^n(T)$) задается равенством

$$\delta F[A; H] = \sum_{k=0}^n \frac{\partial}{\partial A^{(k)}} f(t, A(t), A^{(1)}(t), \dots, A^{(n)}(t)) H^{(k)}(t), \quad (5)$$

и соответственно интерполяционный многочлен (3) для оператора (4) может быть записан в виде

$$\begin{aligned} L_1(A) &= F(A_0) + \frac{F(A_1) - F(A_0)}{(m+1)(n+1)} \sum_{k=0}^n \sum_{i=0}^m [A_1^{(k)}(t_i) - A_0^{(k)}(t_i)]^{-1} [A^{(k)}(t_i) - A_0^{(k)}(t_i)] + \\ &\int_0^1 \delta F \left[G(\cdot, \tau); A(\cdot) - A_0(\cdot) - \frac{A_1(\cdot) - A_0(\cdot)}{(m+1)(n+1)} \sum_{k=0}^n \sum_{i=0}^m [A_1^{(k)}(t_i) - A_0^{(k)}(t_i)]^{-1} [A^{(k)}(t_i) - A_0^{(k)}(t_i)] \right] d\tau, \quad (6) \end{aligned}$$

где $A_0(t)$ и $A_1(t)$ – узлы интерполирования; t_i – фиксированные точки отрезка $T \subset \mathbb{R}$. В этой формуле дифференциал Гато $\delta F[A; H]$ имеет вид (5) и берется в точке $G(t, \tau)$, где матрица $G(t, \tau)$ для любого параметра $\tau \in [0, 1]$ принадлежит пространству $C^n(T)$ по направлению $H(t) = A(t) - A_0(t) - [A_1(t) - A_0(t)]S_{nm}(A - A_0)$. В частном случае при $n = 0$ на множестве непрерывных функций формула вида (6) получена в работе [3].

Построим аналогичную формулу для функций $F(A, B)$ двух матричных переменных $A(t) \in C^{n_1}(T)$ и $B(t) \in C^{n_2}(T)$ ($T \subset \mathbb{R}$). Как и раньше, пусть заданы на T фиксированные точки t_0, t_1, \dots, t_m . Через $S_{n_1 m}(A)$ и $S_{n_2 m}(B)$ обозначим соответственно суммы

$$S_{n_1 m}(A) = \frac{1}{(n_1 + 1)(m + 1)} \sum_{k=0}^{n_1} \sum_{i=0}^m (A_1^{(k)}(t_i) - A_0^{(k)}(t_i))^{-1} (A^{(k)}(t_i) - A_0^{(k)}(t_i)), \quad (7)$$

$$S_{n_2 m}(B) = \frac{1}{(n_2 + 1)(m + 1)} \sum_{k=0}^{n_2} \sum_{i=0}^m \left(B_1^{(k)}(t_i) - B_0^{(k)}(t_i) \right)^{-1} \left(B^{(k)}(t_i) - B_0^{(k)}(t_i) \right), \quad (8)$$

где $(A_0(t), B_0(t))$ и $(A_1(t), B_1(t))$ – узлы интерполирования таковы, что обратные матрицы в (7) и (8) существуют для указанных здесь значений k и i . Введем также вектор $H(t) = (H_1(t), H_2(t))$ с матричными координатами

$$\begin{aligned} H_1(t) &= A(t) - A_0(t) - [A_1(t) - A_0(t)] S_{n_1 m}(A), \\ H_2(t) &= B(t) - B_0(t) - [B_1(t) - B_0(t)] S_{n_2 m}(B). \end{aligned}$$

Обозначим через $\mathcal{P}_1(A, B)$ заданный на $C^{n_1}(T) \times C^{n_2}(T)$ функциональный матричный многочлен вида

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_1(A, B) &= C_0(t) + \sum_{k=0}^{n_1} \sum_{j=0}^m A_{kj}(t) A^{(k)}(t_j) + \\ &+ \sum_{k=0}^{n_2} \sum_{j=0}^m B_{kj}(t) B^{(k)}(t_j) + \int_T \left[C_{v_1}(t, s) A^{(v_1)}(s) + C_{v_2}(t, s) B^{(v_2)}(s) \right] ds, \end{aligned} \quad (9)$$

где $C_0(t)$, $A_{kj}(t)$, $B_{kj}(t)$, $C_{v_1}(t, s)$, $C_{v_2}(t, s)$ – произвольно заданные матрицы ($t, s \in T$); v_1 и v_2 – неотрицательные целые числа ($0 \leq v_1 \leq n_1$, $0 \leq v_2 \leq n_2$).

Т е о р е м а 2. *Оператор*

$$\begin{aligned} L_1(A, B) &= F(A_0, B_0) + [F(A_1, B_1) - F(A_0, B_1)] S_{n_1 m}(A) + \\ &+ [F(A_0, B_1) - F(A_0, B_0)] S_{n_2 m}(B) + \int_0^1 \delta F[G_1(\cdot, \tau), G_2(\cdot, \tau); H(\cdot)] d\tau, \end{aligned} \quad (10)$$

где матрицы $G_1(t, \tau) \in C^{n_1}(T)$, $G_2(t, \tau) \in C^{n_2}(T)$ для каждого числового параметра $\tau \in [0, 1]$, будет интерполяционным матричным многочленом первой степени для $F(A, B)$ и узлов (A_0, B_0) , (A_1, B_1) . Формула (10) инвариантна относительно матричных многочленов вида (9).

Д о к а з а т е л ь с т в о. Так как $S_{n_1 m}(A_0) = S_{n_2 m}(B_0) = 0$, $S_{n_1 m}(A_1) = S_{n_2 m}(B_1) = I$, а вектор $H(t) \equiv 0$ в узлах интерполирования (A_0, B_0) и (A_1, B_1) , то очевидно, что равенства $L_1(A_0, B_0) = F(A_0, B_0)$ и $L_1(A_1, B_1) = F(A_1, B_1)$ имеют место.

Покажем инвариантность формулы (10) относительно матричных многочленов вида (9). В тривиальном случае, когда $F(A, B) = C_0(t)$ это очевидно. Если $F(A, B) = A^{(v_1)}(t_j)$, $F(A, B) = B^{(v_2)}(t_j)$, где t_j – фиксированная точка из T , или $F(A, B) = A^{(v_1)}(t)$, $F(A, B) = B^{(v_2)}(t)$ в случае произвольной точки $t \in T$, дифференциал Гато $\delta F[A, B; H]$ этих операторов в любой точке $(A, B) \in C^{n_1}(T) \times C^{n_2}(T)$ по направлению $H(t) = (H_1(t), H_2(t))$ задается соответственно равенствами $\delta F[A, B; H] = H_1^{(v_1)}(t_j)$, $\delta F[A, B; H] = H_2^{(v_2)}(t_j)$ или $\delta F[A, B; H] = H_1^{(v_1)}(t)$, $\delta F[A, B; H] = H_2^{(v_2)}(t)$.

Учитывая эти равенства и структуру вектора $H(t)$, легко проверяется точность формулы (10) для указанных выше линейных операторов. Например, если $F(A, B) = A^{(v_1)}(t)$, то третье слагаемое в (10) обращается в ноль, а интегральное слагаемое будет равно

$$A^{(v_1)}(t) - A_0^{(v_1)}(t) - \left[A_1^{(v_1)}(t) - A_0^{(v_1)}(t) \right] S_{n_1 m}(A),$$

которое в сумме с первыми двумя слагаемыми равенства (10) дает $A^{(v_1)}(t)$.

Рассмотрим построение аналогичной формулы для случая функций от n матричных переменных. Пусть, как и раньше, $C^{n_k} = C^{n_k}(T)$ – множество матриц $A_k = A_k(t)$, непрерывно дифференцируемых n_k раз на отрезке $T \subset \mathbb{R}$, $X = C^{n_1} \times C^{n_2} \times \dots \times C^{n_n}$ – декартово произведение этих множеств и оператор $F: X \rightarrow Y$, где Y – также некоторое множество матриц $B(t)$, $t \in T \subset \mathbb{R}$. Будем предполагать, что функция от n матричных переменных $F(A) = F(A_1, A_2, \dots, A_n)$ дифференцируема по Гато на X , т. е. $\delta F[A; H] = \sum_{k=1}^n \delta_{A_k} F[A; H_k]$, где $H = (H_1, H_2, \dots, H_n) \in X$,

$\delta_{A_k} F[A; H_k]$ – частный дифференциал Гато оператора F в точке $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$ по переменной A_k и направлению H_k ($A_k, H_k \in C^{n_k}(T)$, $k = 1, 2, \dots, n$).

Введем далее ряд обозначений. Пусть заданы узлы интерполирования $\bar{A}_0(t) = (A_{1,0}(t), A_{2,0}(t), \dots, A_{n,0}(t))$, $\bar{A}_1(t) = (A_{1,1}(t), A_{2,1}(t), \dots, A_{n,1}(t))$ и известны также значения функции $F(A)$ в точках $\tilde{A}_k(t) = (A_{1,0}(t), A_{2,0}(t), \dots, A_{k,0}(t), A_{k+1,1}(t), \dots, A_{n,1}(t))$ для $k = 0, 1, \dots, n$, где $\tilde{A}_0(t) = \bar{A}_1(t)$, а $\tilde{A}_n(t) = \bar{A}_0(t)$.

Пусть

$$\sigma_{n_v m}(A_v) = \frac{1}{(n_v + 1)(m + 1)} \sum_{k=0}^{n_v} \sum_{i=0}^m (A_v^{(k)}(t_i) - A_{v,0}^{(k)}(t_i)) (A_{v,1}^{(k)}(t_i) - A_{v,0}^{(k)}(t_i))^{-1},$$

где t_i – фиксированные точки из T , и вектор $H(t) = (H_1(t), H_2(t), \dots, H_n(t))$ с координатами $H_k(t) = A_k(t) - A_{k,0}(t) - [A_{k,1}(t) - A_{k,0}(t)] \sigma_{n_k m}(A_k)$ ($k = 1, 2, \dots, n$).

Пусть $\mathcal{P}_1(A)$ – матричный многочлен на X вида

$$\mathcal{P}_1(A) = B_0(t) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{n_k} \sum_{j=0}^m B_{ikj}(t) A_i^{(k)}(t_j) + \sum_{v=1}^n \sum_{k=0}^{n_k} \int_{C_{v,k}(t,s)} C_{v,k}(t,s) A_v^{(k)}(s) ds, \quad (11)$$

где $B_0(t)$, $B_{ikj}(t)$ – произвольно заданные матрицы; $C_{v,k}(t,s)$ – матрицы, для которых существуют интегралы в (11), а $A_v^{(k)}(s)$ – k -ая производная v -й компоненты вектора $A(s) = (A_1(s), A_2(s), \dots, A_n(s))$; n_k – любое фиксированное неотрицательное целое число, $t, s, t_0, t_1, \dots, t_m \in T$.

Т е о р е м а 3. Для функционального матричного многочлена

$$L_1(A) = F(\bar{A}_0) + \sum_{v=1}^n [F(\tilde{A}_{v-1}) - F(\tilde{A}_v)] \sigma_{n_v m}(A_v) + \int_0^1 \delta F[G(\cdot, \tau); H(\cdot)] d\tau, \quad (12)$$

где $G(t, \tau) = (G_1(t, \tau), G_2(t, \tau), \dots, G_n(t, \tau))$ – заданный на $T \times [0, 1]$ любой матричный вектор, для которого интеграл в (12) существует; A_v – v -я компонента вектора $A(t)$, выполняются интерполяционные условия $L_1(\bar{A}_0) = F(\bar{A}_0)$, $L_1(\bar{A}_1) = F(\bar{A}_1)$. Формула (12) точна для матричных многочленов вида (11).

Д о к а з а т е л ь с т в о. Имеют место следующие равенства: $\sigma_{n_v m}(A_{v,0}) = 0$, $\sigma_{n_v m}(A_{v,1}) = I$ ($v = 1, 2, \dots, n$). Кроме того, вектор $H(t) \equiv 0$ в узлах \bar{A}_0 и \bar{A}_1 . Из этого следует, что $L_1(\bar{A}_0) = F(\bar{A}_0)$ и $L_1(\bar{A}_1) = F(\bar{A}_1)$.

Если $F(A) = A_i^{(k)}(t_j)$ ($j = 0, 1, \dots, m$; $k = 0, 1, \dots, n_i$; $i = 1, 2, \dots, n$), то $\delta F[A; H] = H_i^{(k)}(t_j)$. Учитывая структуру компонент вектора $H(t)$, получим

$$H_i^{(k)}(t_j) = A_i^{(k)}(t_j) - A_{i,0}^{(k)}(t_j) - [A_{i,1}^{(k)}(t_j) - A_{i,0}^{(k)}(t_j)] \sigma_{n_i m}(A_i). \quad (13)$$

Далее

$$\begin{aligned} \sum_{v=1}^n [F(\tilde{A}_{v-1}) - F(\tilde{A}_v)] \sigma_{n_v m}(A_v) &= \sum_{v=1}^n [F(A_{1,0}(t), A_{2,0}(t), \dots, A_{v-1,0}(t), A_{v,1}(t), \dots, A_{n,1}(t)) - \\ &F(A_{1,0}(t), A_{2,0}(t), \dots, A_{v,0}(t), A_{v+1,1}(t), \dots, A_{n,1}(t))] \sigma_{n_v m}(A_v) = \\ &\sum_{v=1}^{i-1} [A_{i,1}^{(k)}(t_j) - A_{i,1}^{(k)}(t_j)] \sigma_{n_v m}(A_v) + [A_{i,1}^{(k)}(t_j) - A_{i,0}^{(k)}(t_j)] \sigma_{n_i m}(A_i) + \\ &\sum_{v=i+1}^n [A_{i,0}^{(k)}(t_j) - A_{i,0}^{(k)}(t_j)] \sigma_{n_v m}(A_v) = [A_{i,1}^{(k)}(t_j) - A_{i,0}^{(k)}(t_j)] \sigma_{n_i m}(A_i). \end{aligned} \quad (14)$$

Тогда из соотношений (12)–(14) следует, что $L_1(A) = A_i^{(k)}(t_j)$.

Аналогично доказывается это равенство и для $F(A) = A_v^{(k)}(s)$ ($k = 0, 1, \dots, n_v$; $v = 1, 2, \dots, n$) и s – произвольная точка из T . Таким образом, формула (12) точна для многочленов вида (11).

Формулы с произвольным числом узлов. Один из подходов построения на основе известных интерполяционных матричных многочленов фиксированной степени других интерполяционных многочленов той же степени, но с большим числом узлов, предлагается в приведенной далее теореме 4.

В этом пункте рассмотрим интерполирование операторов $F: X \rightarrow Y$ от одной матричной переменной $A \in X$, где X и Y – некоторые заданные множества матриц. Начнем с общего случая.

Т е о р е м а 4. Пусть $L_k(F; A)$ – интерполяционный операторный многочлен степени k с узлами A_0, A_1, \dots, A_k . Тогда для матричного многочлена той же степени

$$\tilde{L}_k(F; A) = L_k(F; A) + \sum_{v=k+1}^n r_k(A_v) \langle \varphi_v, A \rangle, \quad (15)$$

где $r_k(A) = F(A) - L_k(F; A)$, а $\langle \varphi_v, A_i \rangle = \delta_{vi}I$, I – единичная матрица, δ_{vi} – символ Кронекера ($k+1 \leq v \leq n$, $0 \leq i \leq n$) будут выполняться интерполяционные условия $\tilde{L}_k(F; A_i) = F(A_i)$ для $i = 0, 1, \dots, n$. Если интерполяционный многочлен $L_k(F; A)$ точен для какого-либо оператора F , то и многочлен $\tilde{L}_k(F; A)$ также будет точным и для этого оператора.

Д о к а з а т е л ь с т в о. Совпадение $\tilde{L}_k(F; A)$ с $F(A)$ при $A = A_i$ ($i = 0, 1, \dots, k$) имеет место, так как матричный многочлен $L_k(F; A)$ является интерполяционным для F относительно этих узлов, а по условию теоремы $\langle \varphi_v, A_i \rangle = 0$ для $k+1 \leq v \leq n$ и $0 \leq i \leq k$.

Интерполяционные условия в узлах A_i для $k+1 \leq i \leq n$ также выполняются в силу равенств $\langle \varphi_v, A_i \rangle = \delta_{vi}I$ при $v = k+1, k+2, \dots, n$ и структуры операторов $r_k(A)$.

Утверждение теоремы о точности формулы (15) справедливо в силу того, что при условии точности для всех $A \in X$ интерполяционного многочлена $L_k(F; A)$ для оператора F значения $r_k(A_v) = 0$, так как узлы интерполирования A_v так же берутся из множества X .

Приведем несколько примеров интерполяционных формул вида (15). Рассмотрим случай линейной интерполяции в пространстве непрерывных матриц. Пусть $X = C[a, b]$, $F[A_0, A_1]H = \int_0^1 \delta F[A_0 + \tau(A_1 - A_0); H] d\tau$, где $A_0 = A_0(t)$, $A_1 = A_1(t)$ и $H = H(t)$ – непрерывные на $[a, b]$ матрицы. Если в функциональном матричном многочлене

$$L_{n_1}(F; A) = F(A_0) + F[A_0, A_1](A - A_0) + \sum_{v=2}^n r(A_v) \int_a^b p(\tau) A_v(\tau) A(\tau) d\tau,$$

где $r(A) = F(A) - F(A_0) - F[A_0, A_1](A - A_0)$, а $p(\tau)$ – некоторая заданная на $[a, b]$ неотрицательная функция или матрица, A_k ($k = 0, 1, \dots, n$) таковы, что $\int_a^b p(\tau) A_v(\tau) A_k(\tau) d\tau = \delta_{kv}I$ ($k, v = 0, 1, \dots, n$), тогда будут выполняться интерполяционные условия $L_{n_1}(A_k) = F(A_k)$ для $k = 0, 1, \dots, n$.

Пусть $\{\mathcal{P}_n(t)\}_{n=0}^{\infty}$ ортонормальная на $[a, b]$ относительно весовой функции $p(t) \geq 0$ система алгебраических многочленов. В качестве узлов интерполирования выберем следующие матрицы: $A_0(t) = [a_{ij}^0(t)]$ и $A_1(t) = [a_{ij}^1(t)]$, элементы которых $a_{ij}^0(t)$ и $a_{ij}^1(t)$ – алгебраические многочлены не выше некоторой фиксированной степени m ; матрицы $A_v(t) = [a_{ij}^v(t)]$ ($2 \leq v \leq n$) имеют следующую структуру: $a_{ii}^v(t) = \mathcal{P}_{m+v-1}(t)$, а $a_{ij}^v(t)$ для $i \neq j$ – алгебраические многочлены степени не выше $m-1$.

Тогда для матричного многочлена

$$L_{n_2}(F; A) = F(A_0) + F[A_0, A_1](A - A_0) + \sum_{v=2}^n r(A_v) \int_a^b p(\tau) \mathcal{P}_{m+v-1}(\tau) A(\tau) d\tau$$

будут выполняться равенства $L_{n_2}(F, A_i) = F(A_i)$ ($i = 0, 1, \dots, n$).

Приведем еще одну формулу линейной интерполяции с числом узлов больше двух. Пусть $X = C[0, 2\pi]$ – пространство функциональных непрерывных на $[0, 2\pi]$ и 2π -периодических матриц $A(t)$ и оператор $F: C[0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{R}$ или $F: C[0, 2\pi] \rightarrow C[0, 2\pi]$.

Будем считать, что элементами $a_{ij}^0(t)$ и $a_{ij}^1(t)$ матриц $A_0(t)$ и $A_1(t)$ являются тригонометрические многочлены степеней не выше m , а узлы интерполирования $A_v(t)$ для $v = 2, 3, \dots, n$ имеют элементы следующего вида: диагональные элементы $a_{ii}^v(t) = a_v \cos m_v t + b_v \sin m_v t$, где a_v и b_v – любые, а m_v – целые числа такие, что $a_v + b_v \neq 0$ и $m < m_2 < m_3 < \dots < m_n$.

Обозначим через $L_1(A)$ матричный тригонометрический многочлен

$$L_1(A) = F(A_0) + \int_0^1 \delta F [A_0(\cdot) + \tau(A_1(\cdot) - A_0(\cdot)); A(\cdot) - A_0(\cdot)] d\tau. \quad (16)$$

Тогда соответственно многочлен

$$L_{n_1}(F; A) = L_1(A) + \frac{1}{\pi} \sum_{\nu=2}^n \frac{1}{a_\nu + b_\nu} [F(A_\nu) - L_1(A_\nu)] \int_0^{2\pi} [a_\nu \cos m_\nu t + b_\nu \sin m_\nu t] A(t) dt \quad (17)$$

будет интерполяционным для оператора $F(A)$ и узлов A_ν для $\nu = 0, 1, \dots, n$.

Пусть $F(A) = [A'(t)]^2 = \left[\frac{d}{dt} A(t) \right]^2$, $A(t + 2\pi) = A(t)$, и узлы $A_\nu(t)$ такой же структуры как и в формуле (17). Тогда $\delta F[A; H] = A'(t)H'(t) + H'(t)A'(t)$ и для данной функции $F(A)$ и $H(t) = A(t) - A_0(t)$ формула (16) примет вид

$$L_1(A) = \frac{1}{2} [(A'_1(t) + A'_0(t))A'(t) + A'(t)(A'_1(t) + A'_0(t)) - A'_0(t)A'_1(t) - A'_1(t)A'_0(t)]. \quad (18)$$

Обозначив через $r_1(A) = [A'(t)]^2 - L_1(A)$, где $L_1(A)$ задается формулой (18), или несколько в другом виде

$$r_1(A) = \frac{1}{2} [(A'(t) - A'_0(t) - A'_1(t))A'(t) + A'(t)(A'(t) - A'_0(t) - A'_1(t)) + A'_0(t)A'_1(t) + A'_1(t)A'_0(t)],$$

получим, что формула (17) примет вид

$$L_{n_1}(A) = L_1(A) + \frac{1}{\pi} \sum_{\nu=2}^n \frac{r_1(A_\nu)}{a_\nu + b_\nu} \int_0^{2\pi} [a_\nu \cos m_\nu t + b_\nu \sin m_\nu t] A(t) dt,$$

для которой выполняются интерполяционные равенства $L_{n_1}(A_\nu) = [A'_\nu]^2$ ($\nu = 0, 1, 2, \dots, n$).

Аналогичные формулы на множествах скалярных функций получены в [4–6].

Литература

1. Макаров В. Л., Хлобыстов В. В., Янович Л. А. Интерполирование операторов. Киев, 2000.
2. Makarov V. L., Khlobystov V. V., Yanovich L. A. Methods of operator interpolation. Kyiv, 2010.
3. Манюк Е. М., Янович Л. А. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 1999. № 4. С. 10–15.
4. Yanovich L. A., Ignatenko M. V. // J. of Numerical and Applied Mathematics. 2010. N 1 (100). P. 117–129.
5. Игнатенко М. В., Янович Л. А. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 2011. № 1. С. 5–11.
6. Янович Л. А., Худяков А. П. // Докл. НАН Беларусі. 2012. Т. 56, № 4. С. 5–10.

L. A. YANOVICH, A. P. HUDYAKOV

yanovich@im.bas-net.by; hudand1985@mail.ru

INTERPOLATION FORMULAS WITH AN ARBITRARY NUMBER OF MATRIX NODES AND ARBITRARY INPUT PARAMETERS

Summary

The interpolation formulas for operators of one, two and many functional matrix variables containing arbitrary matrices are constructed. The classes of matrix polynomials, for which interpolation formulas are exact, are defined. The method of construction based on a given fixed degree interpolation matrix polynomial of other interpolation polynomials of the same degree, but with more number of nodes is proposed.

УДК 517.925

М. С. БЕЛОКУРСКИЙ¹, А. К. ДЕМЕНЧУК²**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ЕРУГИНА О СУЩЕСТВОВАНИИ НЕРЕГУЛЯРНЫХ РЕШЕНИЙ
ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ С ТРЕУГОЛЬНЫМ ПЕРИОДИЧЕСКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ**

(Представлено академиком Н. А. Изобовым)

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины²Институт математики НАН Беларуси, Минск

Поступило 30.06.2014

Как известно, периодическая дифференциальная система при определенных условиях может иметь периодические решения, период которых несоизмерим с периодом самой системы [1–6 и др.]. Такие периодические решения присущи достаточно широкому классу дифференциальных систем и названы сильно нерегулярными. Отметим также, что в ряде прикладных задач по преобразованию энергии источника высокочастотных колебаний в низкочастотные, колебательные процессы реализуются на собственной частоте колебаний системы, в общем случае несоизмеримой с частотой внешней силы [7].

В [3, § 36] Н. П. Еругин рассматривал линейную систему вида

$$\dot{x} = (AP(t) + B)x, \quad t \in R, \quad x \in R^n, \quad n \geq 2, \quad (1)$$

где A, B – постоянные $(n \times n)$ -матрицы; $P(t)$ – непрерывная ω -периодическая $(n \times n)$ -матрица. В системе (1) матрицы A и $P(t)$ будем называть стационарным и периодическим коэффициентами соответственно. Для системы (1) с диагональным периодическим коэффициентом $P(t)$ Н. П. Еругин изучены вопросы существования сильно нерегулярных периодических решений, при этом, в частности, было доказано, что если матрица A невырожденная, то искомые решения у системы (1) отсутствуют. Случай не диагональной матрицы $P(t)$ остался неизученным.

Следует отметить, что системы вида (1) рассматриваются при решении задач управления асимптотическими инвариантами, в том числе показателями Ляпунова, стационарных управляемых систем при помощи периодических управлений [8; 9], а также задач стабилизации линейных систем управления периодической обратной связью, включая проблему Брокетта [10; 11].

В настоящей работе выясним вопросы существования сильно нерегулярных периодических решений системы (1) с верхним треугольным периодическим коэффициентом

$$p_{ij}(t) \equiv 0, \quad i < j \quad (i, j = 1, \dots, n), \quad (2)$$

где $p_{ij}(t)$ – элементы матрицы $P(t)$.

1. Вначале рассмотрим случай, когда стационарный коэффициент является невырожденным, т. е.

$$\det A \neq 0. \quad (3)$$

Покажем, что это условие, по меньшей мере, уже не является достаточным для отсутствия сильно нерегулярных периодических решений у системы (1) с треугольным периодическим коэффициентом (2), в отличие от рассмотренного в [3, § 36] случая системы (1) с диагональным коэффициентом.

Пусть $x(t)$ – Ω -периодическое решение системы (1), при этом считаем, что хотя бы одна из его компонент отлична от стационарной, а отношение ω/Ω является иррациональным числом. Тогда в силу [5] вектор $x(t)$ удовлетворяет системе

$$\dot{x} = (A\hat{P} + B)x, \quad (AP(t) - A\hat{P})x = 0,$$

где $\hat{P} = \frac{1}{\omega_0} \int_{\omega_0}^{\omega} P(\tau) d\tau$ – среднее значение ω -периодического коэффициента. В силу условия (3) последняя система примет вид

$$\dot{x} = (A\hat{P} + B)x, \quad \tilde{P}(t)x = 0, \quad \tilde{P}(t) = P(t) - \hat{P}. \quad (4)$$

Если столбцы матрицы $\tilde{P}(t)$ линейно независимы, то из второй системы в (4) следует тривиальность $x(t)$, что противоречит сделанному допущению. Значит, матрица $\tilde{P}(t)$ имеет неполный столбцовый ранг

$$\text{rank}_{\text{col}} \tilde{P} = r < n. \quad (5)$$

В силу исходного допущения о треугольности периодического коэффициента условие (5) означает, по меньшей мере, что среди диагональных элементов $p_{ii}(t)$ имеются постоянные.

При выполнении условия (5) найдется постоянная неособенная $(n \times n)$ -матрица Q такая, что у матрицы $\tilde{P}(t)Q$ первые $d = n - r$ столбцов будут нулевыми, в то время как остальные r столбцов будут линейно независимыми. Введем замену переменных

$$x = Qy, \quad (6)$$

которая приводит систему (4) к системе

$$\dot{y} = Fy, \quad \tilde{P}_1(t)y = 0 \quad (F = Q^{-1}(A\hat{P} + B)Q, \quad \tilde{P}_1(t) = \tilde{P}(t)Q). \quad (7)$$

Эта система имеет сильно нерегулярное периодическое решение $y(t) = Q^{-1}x(t)$. Так как у матрицы $\tilde{P}_1(t)$ первые d столбцов нулевые, а остальные r столбцов линейно независимы, то из второй системы в (7) следует, что последние r компонент вектора $y(t)$ будут тривиальными, т. е. $y(t) = \text{col}(y^{[d]}(t), y_{[r]}(t))$, $y^{[d]}(t) = \text{col}(y_1(t), \dots, y_d(t))$, $y_{[r]}(t) = \text{col}(y_{d+1}(t), \dots, y_n(t)) \equiv 0$. Это означает, что система (7) имеет следующую структуру:

$$\dot{y}^{[d]} = F_{d,d}y^{[d]}, \quad F_{r,d}y^{[d]} = 0, \quad y_{[r]} = 0, \quad (8)$$

где $F_{d,d}$, $F_{r,d}$ – левые верхний и нижний блоки матрицы F (нижние индексы указывают размерность). Как видно из (8), Ω -периодический вектор $y^{[d]}(t)$ является решением линейной стационарной системы. Поэтому среди собственных значений матрицы коэффициентов $F_{d,d}$ будут числа

$$\pm i\lambda_j \quad (j = 1, \dots, d'; \quad d' \leq [d/2]), \quad (9)$$

где $\lambda_j = 2k_j\pi/\Omega$, $k_j \in N$. Пусть l_j – число групп элементарных делителей, отвечающих собственному значению $\pm i\lambda_j$ ($j = 1, \dots, d'$; $l_1 + \dots + l_{d'} = l$). Это означает, что $y^{[d]}(t)$ представлен тригонометрическим полиномом вида

$$y^{[d]}(t) = \sum_{j=1}^{d'} a_j \cos \lambda_j t + b_j \sin \lambda_j t, \quad (10)$$

где коэффициенты a_j , b_j зависят от $2l$ произвольных вещественных постоянных. Поскольку $y^{[d]}(t)$ удовлетворяет и второй системе в (8), то имеет место тождество

$$F_{r,d} \sum_{j=1}^{d'} a_j \cos \lambda_j t + b_j \sin \lambda_j t \equiv 0. \quad (11)$$

Итак, если система (1) имеет сильно нерегулярное периодическое решение $x(t)$, то выполняются условия (5), (9), (11), при этом

$$x(t) = Q \text{col}(y^{[d]}(t), 0, \dots, 0), \quad (12)$$

где вектор $y^{[d]}(t)$ определяется равенством (10).

Покажем, что полученные условия являются достаточными. Обратимся к системе (4). В силу условия (5) найдется постоянная неособенная $(r \times r)$ -матрица Q такая, что замена переменных (6) приводит (4) к системе (7), где у матрицы $\hat{P}_1(t)$ первые d столбцов нулевые, а остальные r столбцов линейно независимы. Последнее обстоятельство означает, что $y = \text{col}(y^{[d]}, 0, \dots, 0)$, $y^{[d]} = \text{col}(y_1, \dots, y_d)$. С учетом этого система (7) примет вид (8). Поскольку чисто мнимые числа (9) будут собственными значениями матрицы $F_{d,d}$, то первая система в (8) имеет $2l$ -параметрическое семейство Ω -периодических решений (10). Так как выполняется тождество (11), то система (8) имеет решение $y(t) = \text{col}(y^{[d]}(t), 0, \dots, 0)$. Возвращаясь к исходным переменным находим Ω -периодическое решение системы (4) в виде тригонометрического многочлена (12). Заметим, что вектор $x(t)$ удовлетворяет также системе $A(P(t) - \hat{P})x = 0$, а это в силу [5] означает, что (12) является сильно нерегулярным решением системы (1).

Таким образом, доказана

Т е о р е м а 1. Пусть в системе (1) стационарный коэффициент A невырожден, а периодический коэффициент $P(t)$ является верхним треугольным.

Если система (1) имеет сильно нерегулярное периодическое решение, то оно будет тригонометрическим многочленом вида (12). Для того чтобы (12) было решением системы (1), необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия (5), (9), (11).

С л е д с т в и е 1. Если все диагональные элементы периодического верхнего треугольного коэффициента отличны от стационарных, то система (1) не имеет сильно нерегулярных периодических решений.

Д о к а з а т е л ь с т в о. Допустим противное, т. е. $p_{ij}(t) \neq \text{const}$, $i = j$ ($i, j = 1, \dots, n$), и система (1) имеет нетривиальное сильно нерегулярное периодическое решение $x(t)$. Согласно [5] выполняется тождество $(P(t) - \hat{P})x(t) \equiv 0$, откуда в силу треугольности периодического коэффициента получаем

$$\begin{aligned} (p_{nn}(t) - \hat{p}_{nn})x_n(t) &\equiv 0, \\ (p_{n-1n-1}(t) - \hat{p}_{n-1n-1})x_{n-1}(t) + (p_{n-1n}(t) - \hat{p}_{n-1n})x_n(t) &\equiv 0, \\ \dots & \\ (p_{11}(t) - \hat{p}_{11})x_1(t) + \dots + (p_{1n}(t) - \hat{p}_{1n})x_n(t) &\equiv 0. \end{aligned}$$

Так как элемент $p_{nn}(t)$ отличен от постоянного, то найдутся такие t , при которых $p_{nn}(t) - \hat{p}_{nn} \neq 0$. В силу несоизмеримости периодов функций $p_{nn}(t) - \hat{p}_{nn}$ и $x_n(t)$ из первого среди приведенных тождеств следует, что $x_n(t) \equiv 0$. Тогда второе тождество примет вид $(p_{n-1n-1}(t) - \hat{p}_{n-1n-1})x_{n-1}(t) \equiv 0$, откуда в силу нестационарности $p_{n-1n-1}(t)$ имеем $x_{n-1}(t) \equiv 0$. Продолжая таким образом, получим $x_n(t) = \dots = x_1(t) \equiv 0$, что противоречит допущению о нетривиальности сильно нерегулярного периодического решения $x(t)$.

2. Рассмотрим теперь случай вырожденного стационарного коэффициента

$$\text{rank } A = r < n. \quad (13)$$

Выясним условия существования сильно нерегулярных периодических решений системы (1), где, как и выше, предполагается треугольность периодического коэффициента, т. е. выполнение условия (2).

Пусть $x(t) = \text{col}(x_1(t), \dots, x_n(t))$ – отличное от постоянного искомое Ω -периодическое решение системы (1). Согласно [5] вектор $x(t)$ удовлетворяет системе

$$A\tilde{P}(t)x = 0. \quad (14)$$

В силу (13) найдется постоянная неособенная $(n \times n)$ -матрица S такая, что последняя система приводится к виду $S\tilde{P}(t)x = 0$, где матрица

$$C = SA = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & \dots & c_{1n} \\ 0 & c_{22} & c_{21} & \dots & c_{21} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & c_{rr} & \dots & c_{r1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Обозначим трапециевидную $(r \times n)$ -матрицу, образованную первыми r строками матрицы C , через C_1 , при этом $\text{rank } C_1 = r$. Тогда последняя система примет вид

$$C_1 \tilde{P}(t)x = \tilde{P}_1(t)x = 0. \quad (15)$$

В силу сделанных допущений матрица $\tilde{P}_1(t)$ также как и C_1 является трапециевидной, т. е.

$$\tilde{P}_1(t) = \begin{pmatrix} \tilde{p}_{11}^{(1)}(t) & \tilde{p}_{12}^{(1)}(t) & \tilde{p}_{13}^{(1)}(t) & \dots & \tilde{p}_{1n}^{(1)}(t) \\ 0 & \tilde{p}_{22}^{(1)}(t) & \tilde{p}_{23}^{(1)}(t) & \dots & \tilde{p}_{2n}^{(1)}(t) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \tilde{p}_{rr}^{(1)}(t) & \dots & \tilde{p}_{rn}^{(1)}(t) \end{pmatrix}.$$

Пусть $\tilde{P}_1^{(1)}(t), \dots, \tilde{P}_1^{(n)}(t)$ – столбцы матрицы $\tilde{P}_1(t)$. Так как система (15) имеет сильно нерегулярное периодическое решение $x(t)$, то из [6, с. 41] вытекает, что она имеет k линейно независимых стационарных решений $(0 < k < n)$. Последнее означает линейную зависимость вектор-функций $\tilde{P}_1^{(1)}(t), \dots, \tilde{P}_1^{(n)}(t)$, т.е. найдутся k постоянных линейно независимых векторов $\alpha^{(1)}, \dots, \alpha^{(k)}$, таких, что выполняются тождества

$$(\alpha^{(j)}, \tilde{P}^{(j)}(t)) \equiv 0 \quad (j = 1, \dots, k).$$

Тогда у системы (15) будет k линейно независимых сильно нерегулярных периодических решений вида $x^{(j)}(t) = \alpha^{(j)} \varphi_j(t)$, где $\varphi_1(t), \dots, \varphi_k(t)$ – некоторые Ω -периодические функции. Обозначим через Λ и $X(t)$ $(n \times k)$ -матрицы, столбцами которых являются соответственно векторы $\alpha^{(1)}, \dots, \alpha^{(k)}$ и $x^{(1)}(t), \dots, x^{(k)}(t)$. Запишем последние равенства в матричном виде $X(t) = \Lambda \Phi$, где Φ – диагональная матрица с функциями $\varphi_1(t), \dots, \varphi_k(t)$ на главной диагонали. В силу линейной независимости векторов $\alpha^{(1)}, \dots, \alpha^{(k)}$ у матрицы Λ найдется минор порядка k , отличный от нуля. Пусть этот минор расположен в строках с номерами i_1, \dots, i_k (в порядке возрастания), Λ_1 – соответствующая ему матрица и Λ_2 – $(n - k) \times k$ -матрица, составленная из оставшихся строк Λ . Тогда полученное матричное равенство распадается на $X'(t) = \Lambda_1 \Phi$, $X''(t) = \Lambda_2 \Phi$, где $X'(t)$ – матрица, образованная строками с номерами i_1, \dots, i_k матрицы $X(t)$, а $X''(t)$ – остальными ее строками. В силу невырожденности Λ_1 из последних двух равенств получаем $X''(t) = \Lambda_2 \Lambda_1^{-1} X'(t)$.

Таким образом, между компонентами сильно нерегулярного периодического решения $x(t)$ системы (15) имеется следующая зависимость

$$x'' = \Lambda_2 \Lambda_1^{-1} x', \quad (16)$$

где $x' = \text{col}(x_{i_1}, \dots, x_{i_k})$, а вектор x'' состоит из остальных компонент вектора x , т. е. $x'' = \text{col}(x_{i_{k+1}}, \dots, x_{i_n})$.

Образуем матрицы A' и A'' из строк матрицы A с номерами соответственно i_1, \dots, i_k и i_{k+1}, \dots, i_n ; \hat{P}' и \hat{P}'' из столбцов матрицы \hat{P} с номерами i_1, \dots, i_k и i_{k+1}, \dots, i_n ; B' и B'' из столбцов матрицы B с номерами i_1, \dots, i_k и i_{k+1}, \dots, i_n . С учетом принятых обозначений из результатов работы [5] вытекает, что вектор $x(t)$ удовлетворяет также системе

$$\begin{pmatrix} \dot{x}' \\ \dot{x}'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A' \widehat{P}' + B'_1 & A' \widehat{P}'' + B'_1 \\ A'' \widehat{P}' + B'_2 & A'' \widehat{P}'' + B'_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ x'' \end{pmatrix},$$

где блоки B'_1 и B''_1 образованы первыми k строками матриц B' и B'' , а блоки B'_2 и B''_2 – оставшиеся $n-k$ этих матриц. Принимая во внимание (16) запишем последнюю систему в виде

$$\begin{aligned} \dot{x}' &= (A' \widehat{P}' + B'_1 + (A' \widehat{P}'' + B''_1) \Lambda_2 \Lambda_1^{-1}) x', \\ \Lambda_2 \Lambda_1^{-1} \dot{x}' &= (A'' \widehat{P}' + B'_2 + (A'' \widehat{P}'' + B''_2) \Lambda_2 \Lambda_1^{-1}) x', \quad x'' = \Lambda_2 \Lambda_1^{-1} x'. \end{aligned} \quad (17)$$

Поскольку система (17) является стационарной и имеет периодическое решение $x'(t)$, $x''(t)$, причем компоненты вектора $x''(t)$ линейно выражаются через $x'(t)$, то у матрицы коэффициентов $H = A' \widehat{P}' + B'_1 + (A' \widehat{P}'' + B''_1) \Lambda_2 \Lambda_1^{-1}$ имеются чисто мнимые собственные числа

$$\pm i \lambda_s \quad (s=1, \dots, k'; 1 \leq k' \leq [k/2]), \quad (18)$$

где $\lambda_s = 2k_s \pi / \Omega$, $k_s \in \mathbb{N}$. Пусть p_s – число групп элементарных делителей, отвечающих собственному значению $\pm i \lambda_s$ ($s=1, \dots, k'$; $p_1 + \dots + p_{k'} = p$). Это означает, что $x'(t)$ представлен тригонометрическим полиномом вида

$$x'(t) = \sum_{s=1}^{k'} \alpha_s \cos \lambda_s t + \beta_s \sin \lambda_s t, \quad (19)$$

где коэффициенты α_j , β_j зависят от $2p$ произвольных вещественных постоянных. Вектор $x'(t)$ удовлетворяет также и второй системе в (17). Поэтому справедливо тождество

$$(\Lambda_2 \Lambda_1^{-1} (A' P' + B'_1 + (A' P'' + B''_1) \Lambda_2 \Lambda_1^{-1}) - A'' P' - B'_2 - (A'' P'' + B''_2) \Lambda_2 \Lambda_1^{-1}) x'(t) \equiv 0, \quad (20)$$

где $x'(t)$ определяется (19).

Таким образом, если в вырожденном случае (13) система (1) имеет сильно нерегулярное периодическое решение $x(t)$, то система (15) имеет $0 < k < n$ линейно независимых стационарных решений и выполняются условия (18), (20), при этом

$$x(t) = \text{ord} \{x_{i_1}(t), \dots, x_{i_k}(t), x_{i_{k+1}}(t), \dots, x_{i_n}(t)\} = \text{ord} \{\text{col}(x'(t), x''(t))\}, \quad (21)$$

где $\text{ord} \{\cdot\}$ означает упорядочение компонент вектора $\{\cdot\}$ в порядке возрастания их индексов, вектор $\text{col}(x_{i_1}(t), \dots, x_{i_k}(t)) = x'(t)$ определяется равенством (19), а $\text{col}(x_{i_{k+1}}(t), \dots, x_{i_n}(t)) = x''(t) = \Lambda_2 \Lambda_1^{-1} x'(t)$.

Докажем достаточность полученных условий. Система (14) при помощи элементарных преобразований приводится к системе (15). Если система (15) имеет k линейно независимых стационарных решений, то из [6, с. 41] вытекает, что она имеет и сильно нерегулярное периодическое решение, причем, как показано выше, компоненты этого решения связаны соотношением вида (16). Значит, между компонентами решения системы (14) существует зависимость (16).

Подставляя (16) в систему

$$\dot{x} = (A \widehat{P} + B)x, \quad (22)$$

получим систему вида (17). Так как матрица коэффициентов H первой системы из (17) имеет чисто мнимые собственные числа (18), то эта система имеет периодическое решение (19), период которого Ω , несоизмерим с ω . При выполнении тождества (20) вектор $\text{col}(x'(t), x''(t))$, $x''(t) = \Lambda_2 \Lambda_1^{-1} x'(t)$ является решением всей системы (17). Тогда вектор $x(t) = \text{ord} \{\text{col}(x'(t), x''(t))\}$, образованный компонентами векторов $x'(t)$ и $x''(t)$, будет удовлетворять системам (14) и (22), откуда следует, что $x(t)$ – сильно нерегулярное периодическое решение системы (1).

Итак, доказана

Т е о р е м а 2. Пусть в системе (1) стационарный коэффициент A вырожден и его ранг равен r , а периодический коэффициент $P(t)$ является верхним треугольным.

Если система (1) имеет сильно нерегулярное периодическое решение, то оно будет тригонометрическим многочленом вида (19), (21).

Для того чтобы вектор (21) был решением системы (1), необходимо и достаточно, чтобы система (15) имела $0 < k < n$ линейно независимых стационарных решений и выполнялись условия (18), (20).

З а м е ч а н и е. Аналогичный результат имеет место в случае нижнего треугольного периодического коэффициента.

Работа выполнена в Институте математики НАН Беларуси и Гомельском государственном университете им. Ф. Скорины в рамках ГПФИ «Конвергенция».

Литература

1. *Massera J. L.* // Bol. de la Facultad de Ingenieria. 1950. Vol. 4, N 1. P. 37–45.
2. *Курицейль Я., Вейвода О.* // Чехосл. матем. журн. 1955. Т. 5, № 3. С. 362–370.
3. *Еругин Н. П.* Линейные системы обыкновенных дифференциальных уравнений с периодическими и квазипериодическими коэффициентами. Минск, 1963. – 273 с.
4. *Гайшун И. В.* // Докл. АН БССР. 1979. Т. 23, № 8. С. 684–686.
5. *Грудо Э. И.* // Дифференц. уравнения. 1986. Т. 22, № 9. С. 1499–1504.
6. *Демечук А. К.* Асинхронные колебания в дифференциальных системах. Условия существования и управления. Saarbrücken, 2012.
7. *Пеннер Д. И., Дубошинский Я. Б., Дубошинский Д. Б., Козаков М. И.* // ДАН СССР. 1972. Т. 204, № 5. С. 1065–1066.
8. *Зайцев В. А.* // Вестн. Удмуртского ун-та. Математика. Ижевск, 2003. С. 31–62.
9. *Габдрахимов А. Ф., Зайцев В. А.* // Изв. ИМИ УдГУ. 2006. № 3(37). С. 21–22.
10. *Leonov G. A., Shumafov M. M.* Stabilization of linear system. Cambridge Scientific Publishers, 2012. – 430 p.
11. *Леонов Г. А.* // Автомат. и телемех. 2001. № 5. С. 190–193.

M. S. BELOKURSKY, A. K. DEMENCHUK

demenchuk@im.bas-net.by

SOLUTION OF ERUGIN'S PROBLEM ON THE EXISTENCE IRREGULAR SOLUTIONS OF THE LINEAR SYSTEM WITH TRIANGULAR PERIODIC COEFFICIENT

Summary

The linear system with triangular periodic coefficient is considered. Necessary and sufficient conditions for existence of irregular solutions of the linear system with triangular periodic coefficient are obtained.

УДК 519.173

В. И. БЕНЕДИКТОВИЧ

СЕРЕДИННЫЕ СОБСТВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ СУБКУБИЧЕСКОГО
ВНЕШНЕПЛАНАРНОГО ГРАФА

(Представлено академиком И. В. Гайшуном)

Институт математики НАН Беларуси, Минск

Поступило 19.06.2014

В недавней работе Фоулер и Писанский [1; 2] ввели понятие HL -индекса графа, который связан с НОМО-LUMO разбиением, изучаемым в теоретической химии (см. также [3]). Это интервал между наивысшей занятой молекулярной орбиталью (НОМО) и наинизшей незанятой молекулярной орбиталью (LUMO). Согласно модели Хюкеля [4], энергии этих орбиталей находятся в линейном соотношении с собственными значениями соответствующего молекулярного графа и могут быть выражены следующим образом. Пусть G является (молекулярным) графом порядка n и пусть $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ являются собственными значениями его матрицы смежности $A(G)$, упорядоченными по убыванию (с учетом их кратностей) или его спектром. Собственными значениями, которые возникают в НОМО-LUMO разбиении, являются срединные значения λ_H и λ_L , где

$$H = \left\lfloor \frac{n+1}{2} \right\rfloor, \quad L = \left\lceil \frac{n+1}{2} \right\rceil.$$

Тогда HL -индексом графа G называется величина

$$R(G) = \max\{|\lambda_H|, |\lambda_L|\}.$$

Напомним, что простой невзвешенный граф G называется *субкубическим*, если его максимальная степень $\Delta(G) \leq 3$. В химической литературе [1; 3] субкубические графы иногда называют *химическими* графами. В [1; 2] доказано, что HL -индекс каждого субкубического графа G удовлетворяет неравенствам $0 \leq R(G) \leq 3$, и если G является двудольным, то $R(G) \leq \sqrt{3}$. Следующим важным результатом является утверждение, полученное в работе [5].

Т е о р е м а 1. *Срединные собственные значения $\lambda_H(G)$ и $\lambda_L(G)$ любого субкубического графа G содержатся в интервале $[-\sqrt{2}, \sqrt{2}]$, т. е. $R(G) \leq \sqrt{2}$.*

Этот результат является неупрощаемым, поскольку граф Хивуда удовлетворяет равенству $\lambda_H = -\lambda_L = \sqrt{2}$ (см. [3]).

Напомним, что граф является *планарным*, если он может быть уложен на плоскости, таким образом, что различные ребра пересекаются только в общих конечных вершинах. По теореме Фари такой граф имеет представление в виде геометрического плоского графа, т. е. плоского графа, в котором все ребра представлены в виде прямолинейных отрезков. Планарный граф, который имеет укладку на плоскости такую, что все его вершины лежат на границе внешней грани, называется *внешнепланарным*.

В [5] была выдвинута Мохаром следующая гипотеза.

Г и п о т е з а. *Если G – планарный субкубический граф, то $R(G) \leq 1$.*

В [6] эта гипотеза была доказана им для случая двудольных графов.

Т е о р е м а 2. *Срединные собственные значения λ_H и λ_L любого субкубического планарного двудольного графа G содержатся в интервале $[-1, 1]$, т. е. $R(G) \leq 1$.*

Мы доказываем здесь эту гипотезу для субкубических внешнепланарных графов.

Т е о р е м а 3. Серединные собственные значения λ_H и λ_L любого субкубического внешнепланарного графа G содержатся в интервале $[-1, 1]$, т. е. $R(G) \leq 1$.

Для доказательства теоремы напомним некоторые сведения о собственных значениях графа. Нашим основным инструментом доказательства будет так называемая *теорема о чередовании собственных значений графа* (см., напр., [7]). Для графа G обозначим через $\lambda_i(G)$ его i -е собственное значение при упорядочении всех его собственных значений по убыванию (с учетом их кратностей). Для графа $G = (V, E)$ и подмножества вершин $U \subseteq V$ обозначим через $G[U]$ подграф G , индуцированный множеством U , т. е. граф с множеством вершин U , ребрами которого являются все те ребра графа G , концы которых принадлежат множеству вершин U . Тогда справедлива следующая теорема.

Т е о р е м а 4. Пусть $A \subset V(G)$ – произвольное подмножество мощности k множества вершин $V(G)$ графа G порядка n и пусть $K = G - A = G[V(G) \setminus A]$ – подграф, индуцированный дополнением $V(G) \setminus A$. Тогда для каждого $i = 1, \dots, n - k$ справедливы неравенства

$$\lambda_i(G) \geq \lambda_i(K) \geq \lambda_{i+k}(G).$$

Отметим, что если упорядочить все собственные значения графа G по возрастанию (с учетом их кратностей): $\lambda_1^- \leq \lambda_2^- \leq \dots \leq \lambda_n^-$, т. е. $\lambda_i^-(G) = \lambda_{n-i+1}(G)$, то теорему о чередовании собственных значений графа можно переформулировать в следующем виде: для каждого $i = 1, \dots, n - k$ справедливы неравенства

$$\lambda_i^-(G) \leq \lambda_i^-(K) \leq \lambda_{i+k}^-(G).$$

При оценке собственных значений будем использовать следующую лемму.

Л е м м а 1. (а) Пусть G любой индуцированный подграф графа, изображенного на рис. 1, а. Тогда $\lambda_2(G) \leq 1$ и $\lambda_2^-(G) \geq -1$.

(б) Пусть G граф, изображенный на рис. 1, б. Тогда $\lambda_2(G) \leq 1$ и $\lambda_2^-(G) \geq -1$.

Доказательство леммы 1 легко проводится при помощи компьютера. Можно выписать матрицы смежности для изображенных на рис. 1 графов и, чтобы облегчить вычисления, применить, например, пакет Mathcad для нахождения их спектров. В результате вычислений для первого графа получим: $\lambda_2(G) = -\lambda_2^-(G) = 0,662$; для второго $-\lambda_2(G) = 0, \lambda_2^-(G) = -1$.

Отметим, что в терминологии Мохара [5] первый граф обозначается через $C_4(1, 0, 0, 0)$.

Разбиение $\{A, B\}$ вершин $V(G)$ графа G на две части A и B называют *недружественным*, если каждая вершина из A имеет не меньше соседей в B , чем в A , и каждая вершина из B имеет не меньше соседей в A , чем в B , т. е. $\forall v \in A \mid |A \cap N(v)| \leq |B \cap N(v)|$ и $\forall v \in B \mid |B \cap N(v)| \leq |A \cap N(v)|$, где $N(v) = \{u \in V(G) \mid vu \in E(G)\}$ – множество всех соседей или *окружение* вершины $v \in V(G)$. Заметим, что из этого определения, в частности, следует, что для любого недружественного разбиения $\{A, B\}$ в графе G не существует никакой цепи P_2 длины 2, вершины которой принадлежат только одной какой-то части.

Разбиение $\{A, B\}$ множества вершин $V(G)$ называют *несбалансированным*, если мощности его частей разбиения различны: $|A| \neq |B|$, и *сбалансированным*, если мощности его частей разбиения равны: $|A| = |B|$.

У каждого конечного графа существует недружественное разбиение.

Л е м м а 2. Каждый конечный граф обладает недружественным разбиением.

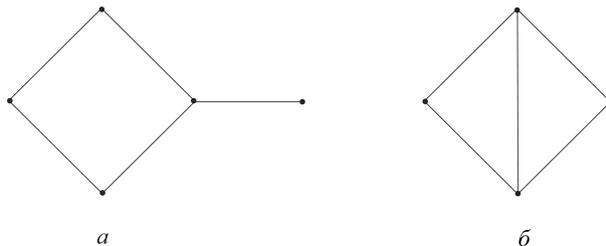


Рис. 1

Д о к а з а т е л ь с т в о. Рассмотрим такое разбиение $\{A, B\}$ графа G , что число ребер между частями A и B наибольшее. Легко видеть, что такое разбиение является недружественным.

В частности, у любого двудольного графа в качестве частей A и B недружественного разбиения можно выбрать две его доли. Это послужило одной из причин для пристального

рассмотрения Мохаром этих графов. Второй причиной явилось свойство симметричности спектра двудольных графов G : $\lambda_i(G) = -\lambda_i^-(G)$, которое упрощает исследование спектра таких графов.

Л е м м а 3. *Если G – субкубический граф с несбалансированным недружественным разбиением, то $R(G) \leq 1$.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Пусть $\{A, B\}$ является недружественным несбалансированным разбиением, причем $|B| > |A|$. Так как G является субкубическим, максимальная степень в индуцированном подграфе $G[B] = G - A$ не превосходит 1, т. е. все компоненты $G[B]$ изоморфны полным графам K_1 или K_2 . В частности, каждое собственное значение $G[B]$ равно или 0, 1, или -1 . Таким образом, $\lambda_1(G[B]) = |\lambda_{|B|}(G[B])| \leq 1$. Поскольку $H \geq |A| + 1$, то применяя теорему о чередовании собственных значений графа к индуцированному графу $G[B] = G - A$, получим, что

$$\lambda_H(G) \leq \lambda_{|A|+1}(G) \leq \lambda_1(G[B]) \leq 1.$$

Кроме того, поскольку $n - |A| = |B| \geq L$, то аналогично применяя теорему о чередовании собственных значений графа собственного значения $\lambda_L(G)$, получим

$$\lambda_L(G) \geq \lambda_{n-|A|}(G) \geq \lambda_{|B|}(G[B]) \geq -1.$$

Это означает, что $-1 \leq \lambda_L(G) \leq \lambda_H(G) \leq 1$ и таким образом, $R(G) \leq 1$.

Из лемм 2 и 3 следует, что для графа G нечетного порядка всегда выполняется гипотеза Мохара. Поэтому далее будем рассматривать только графы четного порядка $n = 2l$. К сожалению, у некоторых графов нет никакого несбалансированного недружественного разбиения. Например, у графа куба или у более общего класса – субкубических графов, которые содержат остовный подграф, состоящий из 4-циклов.

Пусть $\{A, B\}$ является недружественным разбиением $V(G)$ и пусть $C \subset V(G)$ является некоторым подмножеством вершин. Если $C \cap A = \emptyset$ и $\{A \setminus C, B \cup C\}$ является также недружественным разбиением (или если то же самое выполняется, когда можно поменять ролями части A и B), то говорят, что подмножество C нестабильно (относительно разбиения $\{A, B\}$).

Л е м м а 4. *Если $\{A, B\}$ недружественное разбиение субкубического графа G , и $C \subset V(G)$ является нестабильным подмножеством вершин, то $R(G) \leq 1$.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Действительно, по условию, по крайней мере, одно из недружественных разбиений $\{A, B\}$ или $\{A \setminus C, B \cup C\}$ является несбалансированным. Поэтому далее можно воспользоваться леммой 3.

Говорят, что разбиение $\{A, B\}$ множества вершин $V(G)$ с $|A| < |B|$ является k -разбалансированным, если $|B| \geq |A| + 2k - 1$.

Л е м м а 5. *Пусть $\{A, B\}$ – k -разбалансированное разбиение вершин субкубического графа G четного порядка $2l$, где $|A| < |B|$. Предположим, что только одна компонента Q индуцированного графа $G[B]$ имеет больше двух вершин. Если $\lambda_k(Q) \leq 1$ и $\lambda_k^-(Q) \geq -1$, тогда $R(G) = 1$.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Из условий леммы следует, что $\lambda_k(G[B]) \leq 1$ и $\lambda_k^-(G[B]) \geq -1$. Кроме того, $H = l, L = l + 1, |A| \leq l - k, |B| \geq l + k$. Поэтому согласно теореме о чередовании собственных значений графа имеем следующие цепочки неравенств:

$$\lambda_H(G) = \lambda_{(l-k)+k}(G) \leq \lambda_{|A|+k}(G) \leq \lambda_k(G[B]) \leq 1$$

и

$$\lambda_L(G) = \lambda_{l+1}(G) \geq \lambda_{|B|-k+1}(G) \geq \lambda_{|B|-k+1}(G[B]) = \lambda_k^-(G[B]) \geq -1.$$

Это означает, что $-1 \leq \lambda_L(G) \leq \lambda_H(G) \leq 1$ и таким образом, $R(G) \leq 1$.

С л е д с т в и е. Если единственная компонента Q порядка больше 2 является двудольным графом, то в силу симметричности спектра двудольного графа для выполнения неравенства $R(G) \leq 1$ достаточно требовать, чтобы она удовлетворяла только одному условию: $\lambda_k(Q) \leq 1$.

В силу лемм 2, 3 и 4 далее будем рассматривать внешнепланарный субкубический граф G порядка $n = 2l$, у которого существует только недружественное сбалансированное разбиение $\{A, B\}$ множества вершин $V(G)$ (т. е. $|A| = |B|$) и не существует никакого нестабильного подмножества вершин C .

Для внешнепланарного графа G m -цикл C , у которого $(m-1)$ его ребер являются ребрами внешней грани, назовем *лежащим на внешней грани*.

Л е м м а 6. *Если у внешнепланарного субкубического графа G существует 4-цикл C , лежащий на внешней грани, то $R(G) \leq 1$.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Возьмем недружественное сбалансированное разбиение $\{A, B\}$ множества вершин $V(G)$ с $|A| = |B|$ и 4-цикл $C = v_1v_2v_3v_4$, лежащий на внешней грани, при этом будем предполагать, что ребро v_1v_4 цикла C является хордой границы внешней грани графа G . Части A и B этого разбиения будем называть *противоположными*. Будем кратко говорить, что в вершине $v \in A$ ($v \in B$) мы *переходим к противоположной разметке*, если мы исключаем вершину v из множества $A(B)$ и включаем ее во множество $B(A)$: $v \in B$ ($v \in A$). Обозначим соседей вершин v_1 и v_4 , которые не лежат на цикле C , через u_1 и u_4 соответственно.

Если вершины v_1 и v_4 лежат в одной и той же части разбиения, например, $v_1, v_4 \in A$, то в силу замечания выше $u_1, u_4 \in B$ и можно рассмотреть 2-разбалансированное разбиение вершин $\{A \cup C, B \setminus C\}$. При этом индуцированный подграф $G[A \cup C] = G - (B \setminus C)$ имеет единственную компоненту Q , включающую более двух вершин, а именно, $Q = C$. Но по лемме 1 $\lambda_2(C) = -\lambda_2^-(C) \leq 1$, а значит, выполнены условия леммы 5 и, следовательно, $R(G) \leq 1$.

Поэтому можно предполагать, что вершины v_1 и v_4 лежат в противоположных частях разбиения, например, $v_1 \in A$ и $v_4 \in B$, а значит, $v_3 \in A$ и $v_2 \in B$. По тем же соображениям, что и выше, в противоположных частях должны лежать и их соседи: u_1 и u_4 . При этом можно считать, что $u_1 \in B$, а $u_4 \in A$. Действительно, иначе (т. е. при $u_1 \in A$, $u_4 \in B$) можно рассмотреть 2-разбалансированное разбиение вершин $\{A \cup C, B \setminus C\}$, для которого индуцированный подграф $G[A \cup C] = G - (B \setminus C)$ имеет единственную компоненту Q порядка больше 2, а именно, $Q = C_4(1, 0, 0, 0)$ со свойством $\lambda_2(Q) = -\lambda_2^-(Q) \leq 1$, по лемме 1, а значит, по лемме 5 $R(G) \leq 1$.

Аналогично, включение $N(u_1) \subset A$ или $N(u_4) \subset B$ влечет, что 2-разбалансированное разбиение $\{A \cup C, B \setminus C\}$ или $\{A \setminus C, B \cup C\}$ соответственно удовлетворяет условиям леммы 5 с единственной компонентой порядка больше 2 $Q = C_4(1, 0, 0, 0)$, а значит, $R(G) \leq 1$. Поэтому далее можно считать, что $|N(u_1) \cap B| = |N(u_4) \cap A| = 1$. Обозначим $N(u_1) \cap B = \{w_1\}$ и $N(u_4) \cap A = \{w_4\}$, остальных соседей вершин u_1 и u_4 , не лежащих на цикле C , обозначим через t_1 и t_4 : $(N(u_1) \cap A) \setminus C = \{t_1\}$ и $(N(u_4) \cap B) \setminus C = \{t_4\}$.

Отметим, что включения $N(t_1) \subset B$ и $N(t_4) \subset A$ невозможны, так как иначе можно построить несбалансированное недружественное разбиение, которого по предположению не существует. Действительно, если, например, $N(t_1) \subset B$, то новое разбиение $\{A \setminus \{v_1\} \cup \{v_2, u_1\}, B \setminus \{v_2, u_1\} \cup \{v_1\}\}$ остается недружественным, а поскольку по предположению $|A| = |B|$, то оно является и несбалансированным. Поэтому $|N(t_1) \cap A| = |N(t_4) \cap B| = 1$. Обозначим $N(t_1) \cap A = \{s_1\}$ и $N(t_4) \cap B = \{s_4\}$.

Соседа вершины u_i ($i = 1, 4$), не лежащего на цикле C , назовем *ближайшим соседом*, если он является и соседней вершиной при последовательном обходе границы внешней грани графа G . Соответственно, второго соседа вершины u_i (если он существует), не лежащего на цикле C , назовем *дальним соседом*. Согласно этому определению нам необходимо рассмотреть 3 случая:

- 1) w_1 и w_4 являются ближайшими соседями u_1 и u_4 соответственно;
- 2) t_1 и t_4 являются ближайшими соседями u_1 и u_4 соответственно;
- 3) w_1 является ближайшим соседом u_1 , а t_4 является ближайшим соседом u_4 , либо t_1 является ближайшим соседом u_1 , а w_4 является ближайшим соседом u_4 .

Рассмотрим случай 1). Тогда две хорды u_1t_1 и u_4t_4 разбивают все множество вершин $V(G)$ на четыре подмножества: 4-цикл C , V_1 – вершины между u_1 и t_1 , V_2 – вершины между t_1 и t_4 , V_3 – вершины между t_4 и u_4 (в порядке обхода внешней границы).

Если выполняются оба условия $N(t_1) \cap A \subset V_1$ и $N(t_4) \cap B \subset V_3$, то можно переразметить принадлежность вершин множествам A и B следующим образом: для вершин множества $V_4 = C \cup \{u_1, u_4, t_1, t_4\} \cup V_2$ перейдем к противоположной разметке, а остальные вершины оставим в исходных частях разбиения. В результате, очевидно, получим недружественное разбиение $\{A', B'\}$, у которого $N(u_1) \subset B'$ (рис. 2). Далее перейдем к 2-разбалансированному разбиению вершин $\{A' \cup C, B' \setminus C\}$, для которого в силу леммы 1 справедливы условия леммы 5 и, следовательно, $R(G) \leq 1$.

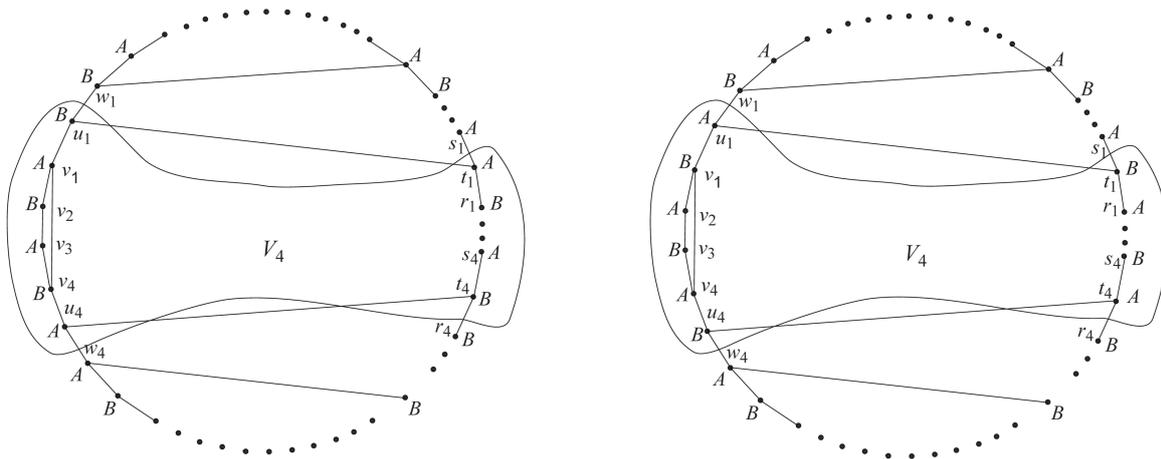


Рис. 2

Пусть теперь $N(t_1) \cap A \subset V_2$ или $N(t_4) \cap B \subset V_2$, например, $N(t_1) \cap A \subset V_2$. Тогда переразметим принадлежность вершин множествам A и B следующим образом: во множестве $V_5 = V_1 \cup \{v_1, v_2, u_1, t_1\} \cup V_2$ перейдем к противоположной разметке вершин, а остальные вершины оставляем в исходных частях (рис. 3). Полученное разбиение $\{A', B'\}$ остается недружественным. Далее перейдем к 2-разбалансированному разбиению вершин $\{A' \setminus C, B' \cup C\}$, для которого, в силу леммы 1, справедливо также условие леммы 5 и, следовательно, $R(G) \leq 1$.

Рассмотрим случай 2). Поскольку $s_1 \in A$, то третий сосед вершины t_1 (если он существует), отличный от u_1 и s_1 , лежит в B , обозначим его через r_1 . Вершина r_1 может иметь единственного соседа q_1 из B , который лежит между r_1 и s_1 . Аналогично, третий сосед вершины t_4 (если он существует), отличный от u_4 и s_4 , лежит в A , обозначим его через r_4 . Вершина r_4 может иметь единственного соседа q_4 из A , который лежит между s_4 и r_4 . Обозначим через V_6 все вершины на внешней границе строго между q_4 и q_1 , включающие цикл C .

Переразметим теперь принадлежность вершин множествам A и B следующим образом: для вершин множества V_6 перейдем к противоположной разметке, а остальные вершины оставляем в исходных частях (рис. 4). Полученное разбиение $\{A', B'\}$ остается недружественным. Далее перейдем к 2-разбалансированному разбиению вершин $\{A' \setminus C, B' \cup C\}$, для которого, в силу леммы 1, справедливо условие леммы 5 и, следовательно, $R(G) \leq 1$.

Наконец, рассмотрим случай 3). Пусть, например, t_1 является ближайшим соседом u_1 , а w_4 является ближайшим соседом u_4 . Обозначим через V_7 все вершины на внешней границе строго между v_3 и q_1 и переразметим принадлежность вершин множествам A и B следующим образом: для вершин множества V_7 перейдем к противоположной разметке, а остальные вершины остав-

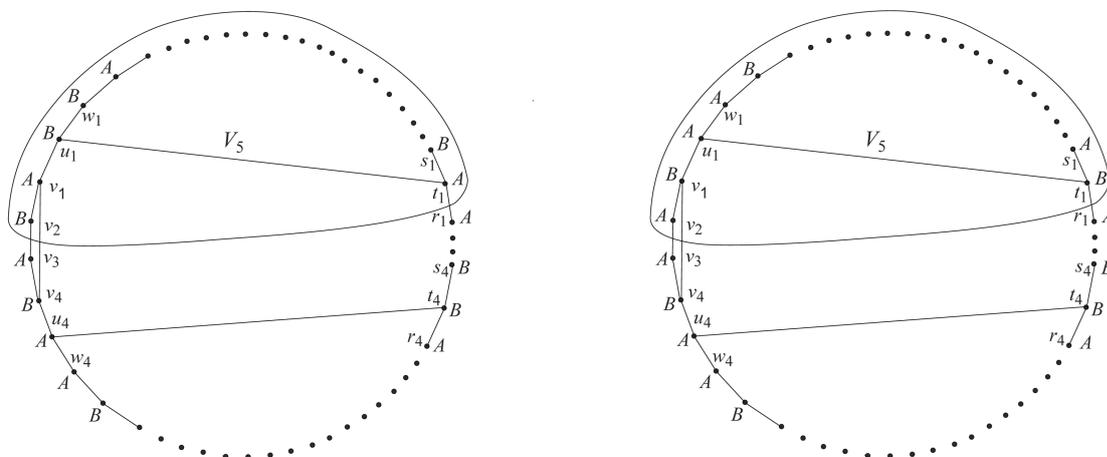


Рис. 3

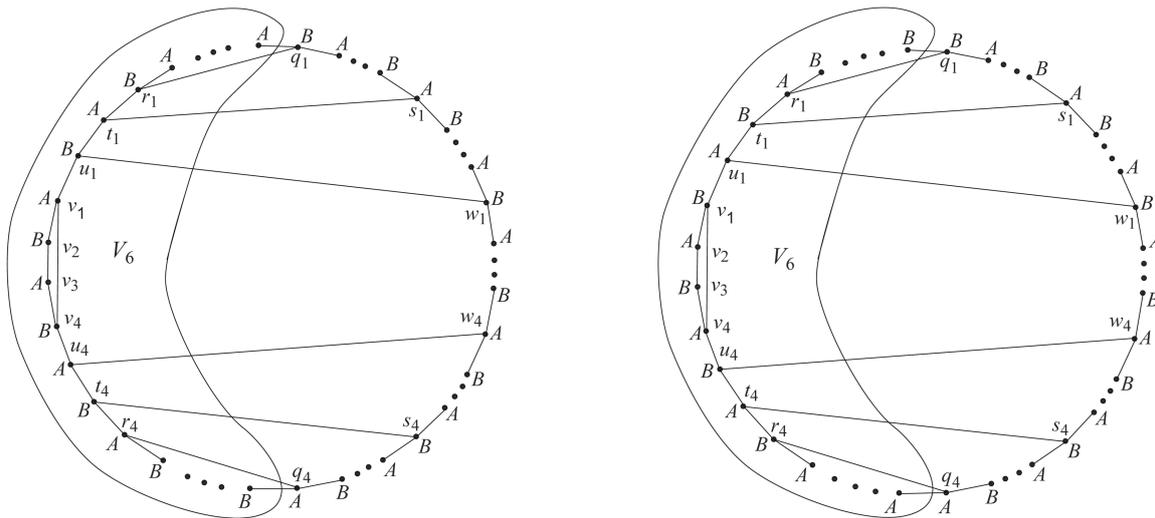


Рис. 4

ляем в исходных частях (рис. 5). Полученное разбиение $\{A', B'\}$ остается недружественным. Далее перейдем к 2-разбалансированному разбиению вершин $\{A' \setminus C, B' \cup C\}$, для которого, в силу леммы 1, справедливо условие леммы 5 и, следовательно, $R(G) \leq 1$.

Лемма 6 доказана.

Л е м м а 7. Если у внешнепланарного субкубического графа G существует m -цикл C ($m \geq 6$) без хорд, лежащий на внешней грани, то у него существует несбалансированное недружественное разбиение множества вершин.

Д о к а з а т е л ь с т в о. Обозначим вершины графа G при последовательном обходе границы его внешней грани по часовой стрелке через v_1, v_2, \dots, v_n . При этом можно считать, что m -цикл $C = v_1 v_2 \dots v_m$. Нетрудно видеть, что достаточно удалить 3 вершины графа G , а именно, v_1, v_4, v_7 , чтобы остались три компонента: два полных подграфа K_2 m -цикла C и индуцированный подграф H на $2n - 8 = 2(n - 4)$ вершинах. Поэтому можно удалить еще не более $n - 4$ вершин у графа H , чтобы оставшимися компонентами графа H были полные подграфы K_1 или K_2 . Включив теперь все $k \leq 3 + (n - 4) = n - 1$ удаленных таким образом вершин во множество A , а остальные вершины во множество B , мы получим недружественное несбалансированное разбиение $\{A, B\}$ множества вершин $V(G)$, а значит, в силу леммы 3, $R(G) \leq 1$. Лемма 7 доказана.

Чтобы завершить доказательство теоремы 3, осталось лишь рассмотреть случай, когда внешнепланарный граф G имеет только 3- или 5-циклы без хорд, лежащие на внешней грани. В этом

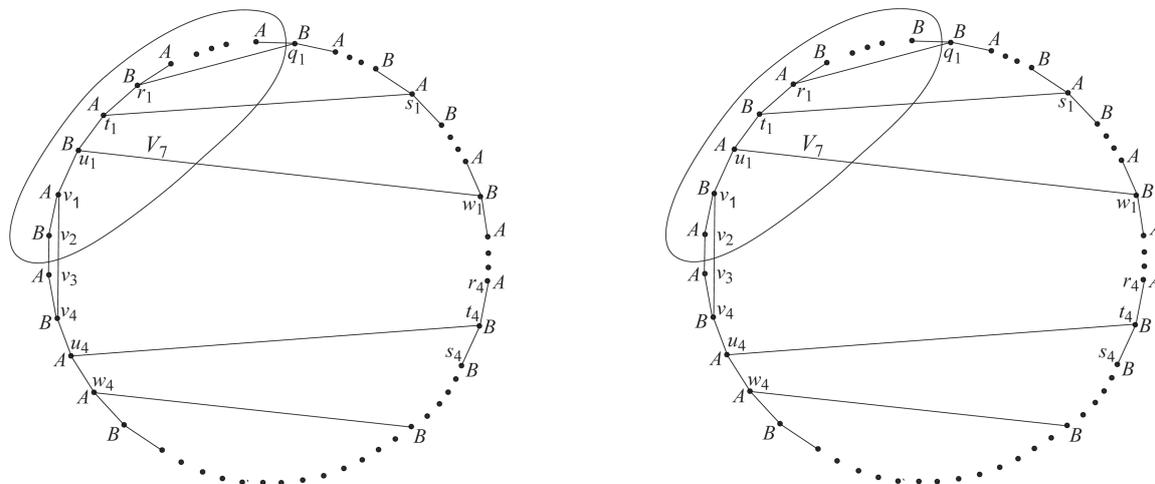


Рис. 5

V. I. BENEDIKTOVICH

vbened@im.bas-net.by

MEDIAN EIGENVALUES OF A SUBCUBIC OUTERPLANAR GRAPH

Summary

In this article median eigenvalues of a subcubic outerplanar graph are investigated. Mohar's conjecture has been confirmed for this class of graphs.

УДК 515.127.13

В. И. БАХТИН¹, П. Н. ВОРОБЕЙ²

ВЫЧИСЛЕНИЕ ХАУСДОРФОВЫХ РАЗМЕРНОСТЕЙ ФРАКТАЛОВ МОРАНА С ПОМОЩЬЮ КОДИРУЮЩИХ ПРОСТРАНСТВ

(Представлено членом-корреспондентом В. В. Гороховиком)

¹ Католический университет Люблина, Польша

² Белорусский государственный университет, Минск

Поступило 05.05.2014

Для вычисления хаусдорфовых размерностей фракталов обычно используют принцип распределения масс [1–3], а в более сложных случаях применяют теоремы Биллингсли [4; 5] и Янг [6], которые связывают размерность множества с поточечной размерностью некоторой меры на этом множестве. В случае фракталов Морана (и, в частности, самоподобных фракталов) выбор подходящей меры не вызывает затруднений. Однако при вычислении размерностей *подмножеств* фракталов выбор подходящей меры становится нетривиальной задачей. В данном сообщении доказывается, что вычисление размерности любого подмножества фрактала Морана можно свести к вычислению размерности совокупности кодирующих это подмножество последовательностей. Это облегчает задачу вычисления размерности, поскольку структура кодирующего пространства проще структуры исходного фрактала.

Хаусдорфова размерность. Пусть произвольное метрическое пространство Ω покрыто конечной или счетной совокупностью множеств $\mathcal{U} = \{U_i\}$. Обозначим через $|\mathcal{U}|$ диаметр этого покрытия: $|\mathcal{U}| = \sup |U_i|$, где $|U_i|$ – диаметр U_i . Для каждого числа $\alpha \in \mathbb{R}$ положим

$$\text{mes}(\mathcal{U}, \alpha) = \sum_i |U_i|^\alpha.$$

Хаусдорфовой мерой (размерности α) метрического пространства Ω называется

$$\text{mes}(\Omega, \alpha) = \lim_{|\mathcal{U}| \rightarrow 0} \text{mes}(\mathcal{U}, \alpha),$$

где \mathcal{U} – конечное или счетное покрытие Ω . Можно заметить, что при $\beta \geq \alpha$

$$\text{mes}(\mathcal{U}, \beta) \leq \text{mes}(\mathcal{U}, \alpha) |\mathcal{U}|^{\beta-\alpha}.$$

Отсюда вытекает следующее свойство хаусдорфовой меры: если $\text{mes}(\Omega, \alpha) < \infty$ при некотором α , то тогда $\text{mes}(\Omega, \beta) = 0$ при всех $\beta > \alpha$.

Хаусдорфовой размерностью пространства Ω называется число

$$\dim_H \Omega = \inf\{\alpha \mid \text{mes}(\Omega, \alpha) = 0\}.$$

Кодирующее пространство и цилиндрическая метрика. Пусть задано конечное множество $I = \{1, 2, \dots, s\}$ и набор чисел $\theta(1), \theta(2), \dots, \theta(s)$ из интервала $(0, 1)$. Рассмотрим пространство последовательностей (*кодирующее пространство*)

$$I^{\mathbb{N}} = \{\bar{i} = (i_1, i_2, i_3, \dots) \mid i_n \in I\}.$$

Определим на нем цилиндрическую метрику

$$d(\bar{i}, \bar{j}) = \prod_{t=1}^n \theta(i_t), \quad \text{где } n = n(\bar{i}, \bar{j}) = \inf\{t \mid i_t \neq j_t\} - 1. \tag{1}$$

Если $\bar{i} = \bar{j}$, то положим $d(\bar{i}, \bar{j}) = 0$. Очевидно, для любых трех последовательностей $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k} \in I^{\mathbb{N}}$ выполняется соотношение

$$n(\bar{i}, \bar{k}) \geq \min\{n(\bar{i}, \bar{j}), n(\bar{j}, \bar{k})\}.$$

Отсюда вытекает усиленное неравенство треугольника

$$d(\bar{i}, \bar{k}) \leq \max\{d(\bar{i}, \bar{j}), d(\bar{j}, \bar{k})\}. \quad (2)$$

Метрика, для которой выполняется неравенство (2), называется *ультраметрикой*. Известно, что любая ультраметрика обладает следующими свойствами (см., напр., [7]):

- а) любая точка шара является его центром;
- б) любые два шара либо не пересекаются, либо один вложен в другой;
- в) радиус любого шара не меньше его диаметра.

Цилиндром ранга n с центром \bar{i} будем называть подмножество $Z_n(\bar{i}) \subset I^{\mathbb{N}}$ вида

$$Z_n(\bar{i}) = \{\bar{j} \in I^{\mathbb{N}} \mid i_t = j_t, t = 1, \dots, n\}.$$

Очевидно, его диаметр в цилиндрической метрике равен $\theta(i_1) \cdot \dots \cdot \theta(i_n)$.

Л е м м а 1. *В пространстве $I^{\mathbb{N}}$ любой цилиндр совпадает с некоторым шаром, и любой шар совпадает с некоторым цилиндром. Если $Z_m(\bar{i}) = B(\bar{i}, r)$, то $|Z_m(\bar{i})| \leq r$.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Рассмотрим любой цилиндр $Z_m(\bar{i})$. Обозначим через r его диаметр: $r = \theta(i_1) \cdot \dots \cdot \theta(i_m) = |Z_m(\bar{i})|$. Для всякой точки $\bar{j} \in Z_m(\bar{i})$ будет $n(\bar{i}, \bar{j}) \geq m$, откуда следует, что $d(\bar{i}, \bar{j}) \leq r$. Значит, $Z_m(\bar{i}) \subset B(\bar{i}, r)$. С другой стороны, если $\bar{j} \notin Z_m(\bar{i})$, то $n(\bar{i}, \bar{j}) < m$ и, следовательно, $\bar{j} \notin B(\bar{i}, r)$. Тем самым доказано равенство $Z_m(\bar{i}) = B(\bar{i}, r)$.

Рассмотрим произвольный шар $B(\bar{i}, r)$. Пусть $m = \min\{n \mid \theta(i_1) \cdot \dots \cdot \theta(i_n) \leq r\}$. Тогда $Z_m(\bar{i}) \subset B(\bar{i}, r)$. С другой стороны, если $\bar{j} \notin Z_m(\bar{i})$, то $n(\bar{i}, \bar{j}) < m$ и соответственно $d(\bar{i}, \bar{j}) > r$. Поэтому $Z_m(\bar{i}) = B(\bar{i}, r)$.

Л е м м а 2. *При определении хаусдорфовой меры и размерности множества $A \subset I^{\mathbb{N}}$ достаточно рассматривать его покрытия непересекающимися цилиндрами.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Рассмотрим произвольное счетное покрытие $\mathcal{U} = \{U_j\}$ множества A . Любое множество U_j содержится в шаре $B(\bar{i}, |U_j|)$ с центром в любой точке $\bar{i} \in U_j$. По лемме 1 этот шар совпадает с некоторым цилиндром $V_j = Z(U_j)$, диаметр которого не превосходит $|U_j|$. Очевидно, совокупность цилиндров $\mathcal{V} = \{V_j\}$ покрывает множество A . При этом $|\mathcal{V}| \leq |\mathcal{U}|$ и

$$\text{mes}(\mathcal{U}, \alpha) = \sum_j |U_j|^\alpha \geq \sum_j |V_j|^\alpha = \text{mes}(\mathcal{V}, \alpha).$$

Отсюда видно, что при определении хаусдорфовой меры и размерности множества A достаточно рассматривать его покрытия цилиндрами.

Из свойства б) ультраметрики следует, что любые два цилиндра либо не пересекаются, либо один из них вложен в другой. Поэтому из любого покрытия A цилиндрами можно выделить дизъюнктное подпокрытие. Лемма доказана.

Фракталы Морана. Фракталы Морана определим следующим образом. Фиксируем компактное множество $K \subset \mathbb{R}^m$, имеющее непустую внутренность. Предположим, что любой конечной последовательности $(i_1, \dots, i_n) \in I^n$, где $I = \{1, \dots, s\}$, поставлено в соответствие множество $K_{i_1 \dots i_n}$ таким образом, что

а) всякое множество $K_{i_1 \dots i_n i_n}$ содержится в $K_{i_1 \dots i_{n-1}}$ и подобно ему с коэффициентом подобия $\theta(i_n)$;

б) множества $K_{i_1 \dots i_{n-1} 1}, \dots, K_{i_1 \dots i_{n-1} s}$ не имеют общих внутренних точек;

в) пустой последовательности поставлено в соответствие множество K .

Л е м м а 3. *Если выполняются условия а), б), в), то любые два множества $K_{i_1 \dots i_n}$ и $K_{j_1 \dots j_k}$ либо вложены одно в другое, либо не имеют общих внутренних точек.*

Д о к а з а т е л ь с т в о. Пусть для определенности $k \geq n$. Если наборы индексов (i_1, \dots, i_n) и (j_1, \dots, j_n) совпадают, то $K_{i_1 \dots i_n} = K_{j_1 \dots j_n} \supset K_{j_1 \dots j_k}$. Если указанные наборы индексов не совпадают, то в силу условий а) и б) множества $K_{i_1 \dots i_n}$ и $K_{j_1 \dots j_n}$ не имеют общих внутренних точек. Поскольку $K_{j_1 \dots j_n} \supset K_{j_1 \dots j_k}$, то же самое верно для $K_{i_1 \dots i_n}$ и $K_{j_1 \dots j_k}$. Лемма доказана.

Обозначим через F_n объединение всех множеств $K_{i_1 \dots i_n}$. Очевидно, $K = F_0 \supset F_1 \supset F_2 \supset \dots$. Фракталом Морана мы будем называть множество $F = \bigcap_n F_n$. Множества такого типа впервые были рассмотрены Мораном в [8].

Определим отображение $f: I^{\mathbb{N}} \rightarrow F$, которое сопоставляет каждой последовательности $\bar{i} = (i_1, i_2, \dots) \in I^{\mathbb{N}}$ единственную точку пересечения $\bigcap_n K_{i_1 \dots i_n}$. Очевидно, оно непрерывно и $f(I^{\mathbb{N}}) = F$.

Основным результатом сообщения является следующая теорема.

Т е о р е м а 1. Для любого подмножества $A \subset I^{\mathbb{N}}$ его хаусдорфова размерность относительно цилиндрической метрики (1) совпадает с хаусдорфовой размерностью множества $f(A)$ относительно евклидовой метрики в \mathbb{R}^m .

Для доказательства этой теоремы нам потребуются следующие две леммы.

Л е м м а 4. Пусть $\{V_j\}$ – последовательность не имеющих общих внутренних точек подмножеств \mathbb{R}^m , таких что каждое V_j содержит шар радиуса r_1 и содержится в шаре радиуса r_2 . Тогда любое множество U пересекается не более чем с $(|U| + 2r_2)^m / r_1^m$ множеств из $\{V_j\}$.

Д о к а з а т е л ь с т в о. Если V_j пересекается с U , то V_j содержится в любом шаре с центром в любой точке из U и радиусом $|U| + 2r_2$. Пусть q множеств из $\{V_j\}$ пересекаются с U . Суммируя объемы шаров радиуса r_1 , содержащихся в этих множествах, получаем неравенство $qr_1^m \leq (|U| + 2r_2)^m$, из которого следует доказываемая оценка.

Л е м м а 5. Существует такое большое число Q , что для любого множества $U \subset \mathbb{R}^m$, у которого $|U| \leq 1$, общее число всех множеств вида $K_{i_1 \dots i_n}$, удовлетворяющих условиям

$$K_{i_1 \dots i_n} \cap U \neq \emptyset \text{ и } |K_{i_1 \dots i_n}| < |U| \leq |K_{i_1 \dots i_{n-1}}|, \quad (3)$$

не превосходит Q .

Д о к а з а т е л ь с т в о. Обозначим через ε радиус открытого шара, содержащегося в K . Положим $r_2 = |U|$ и $r_1 = |U| \min_{j \in I} \theta(j) \varepsilon / |K|$. Тогда любое из множеств $K_{i_1 \dots i_n}$, удовлетворяющих условию (3), содержится в шаре радиуса r_2 и содержит шар радиуса r_1 . По предыдущей лемме, количество таких множеств не превышает числа

$$Q = \frac{(|U| + 2|U|)^m}{\left(|U| \min_{j \in I} \theta(j) \varepsilon / |K| \right)^m} = \left(\frac{3|K|}{\varepsilon \min_{j \in I} \theta(j)} \right)^m.$$

Д о к а з а т е л ь с т в о теоремы 1. Не ограничивая общности, можно считать, что $|K| = 1$. Вначале докажем неравенство $\dim_H f(A) \leq \dim_H A$. Рассмотрим произвольное покрытие $\mathcal{V} = \{V_j\}$ множества A цилиндрами V_j . Каждый такой цилиндр совпадает с некоторым $Z_n(\bar{i})$. Поставим ему в соответствие множество $U_j = K_{i_1 \dots i_n}$, где i_1, \dots, i_n – первые n элементов последовательности \bar{i} . Очевидно, совокупность множеств $\mathcal{U} = \{U_j\}$ образует покрытие $f(A)$.

В силу определения цилиндрической метрики и условия $|K| = 1$

$$|V_j| = |Z_n(\bar{i})| = \theta(i_1) \cdot \dots \cdot \theta(i_n) = |K_{i_1 \dots i_n}| = |U_j|. \quad (4)$$

Поэтому

$$\text{mes}(\mathcal{U}, \alpha) = \sum_{U_j \in \mathcal{U}} |U_j|^\alpha = \sum_{V_j \in \mathcal{V}} |V_j|^\alpha = \text{mes}(\mathcal{V}, \alpha),$$

откуда вытекает оценка $\dim_H f(A) \leq \dim_H A$.

Докажем обратное неравенство $\dim_H A \leq \dim_H f(A)$. Пусть $\mathcal{U} = \{U_j\}$ – произвольное счетное покрытие множества $f(A)$, удовлетворяющее условию $|\mathcal{U}| \leq 1$. Рассмотрим произвольную последовательность $\bar{i} = (i_1, i_2, \dots) \in A$. Выберем какой-нибудь один элемент U_j покрытия \mathcal{U} , содержащий точку $f(\bar{i})$. Затем выберем такое натуральное число $n = n(\bar{i})$, для которого выполняются неравенства

$$|Z_n(\bar{i})| < |U_j| \leq |Z_{n-1}(\bar{i})|. \quad (5)$$

Очевидно, $\bar{i} \in Z_n(\bar{i})$. Обозначим через \mathcal{Z} покрытие множества A всеми цилиндрами вида $Z_{n(\bar{i})}(\bar{i})$, где $\bar{i} \in A$. В силу леммы 5 и равенства (4), каждому элементу покрытия $U_j \in \mathcal{U}$ отвечает не более Q цилиндров $Z_{n(\bar{i})}(\bar{i})$, удовлетворяющих условиям $f(\bar{i}) \in U_j$ и (5). Отсюда вытекает, что

$$\text{mes}(\mathcal{Z}, \alpha) = \sum_{Z \in \mathcal{Z}} |Z|^\alpha \leq Q \sum_{U_j \in \mathcal{U}} |U_j|^\alpha = Q \text{mes}(\mathcal{U}, \alpha).$$

Значит, $\text{mes}(A, \alpha) \leq Q \text{mes}(f(A), \alpha)$, откуда следует неравенство $\dim_H A \leq \dim_H f(A)$.

З а м е ч а н и е. Неравенство $\dim_H f(A) \leq \dim_H A$ можно доказать другим способом. А именно, оно легко выводится из того факта, что отображение f удовлетворяет условию Липшица

$$d(f(\bar{i}), f(\bar{j})) \leq |K| d(\bar{i}, \bar{j}),$$

которое вытекает непосредственно из определения кодирующего отображения f . Однако обратное неравенство таким способом получить не удастся, поскольку обратное к f отображение не обязано удовлетворять условию Липшица (более того, само f может не быть инъективным).

Литература

1. *Edgar G.* Measure, Topology, and Fractal Geometry. Springer, 2008. – 292 p.
2. *Falconer K.* Fractal Geometry. Mathematical foundations and applications. Chichester: Wiley, 2003. – 367 p.
3. *Песин Я.* Теория размерности и динамические системы. Современный взгляд и приложения. Москва; Ижевск, 2002. – 404 с.
4. *Billingsley P.* // Ill. J. Math. 1960. Vol. 4. P. 187–209.
5. *Billingsley P.* // Ill. J. Math. 1961. Vol. 5. P. 291–298.
6. *Young L.-S.* // Ergod. Theory and Dyn. Syst. 1982. Vol. 2. P. 109–124.
7. *Schikhof W. H.* Ultrametric calculus. An introduction to p -adic analysis. Camb. Univ. Press, 2007. – 320 p.
8. *Moran P. A. P.* // Proc. Camb. Phyl. Soc. 1946. Vol. 42. P. 15–23.

V. I. BAKHTIN, P. N. VOROB EI

bakhtin@tut.by

CALCULATION OF HAUSDORFF DIMENSIONS OF MORAN'S FRACTALS BY MEANS OF ENCODING SPACES

Summary

We prove that the Hausdorff dimension of any subset of Moran's fractal is equal to that of the set of sequences encoding this subset under a suitable choice of metrics on the encoding set.

УДК 519.6

Н. А. ЛИХОДЕД, А. А. ТОЛСТИКОВ

ФУНКЦИИ, ЗАДАЮЩИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЗЕРНИСТЫХ АЛГОРИТМОВ

(Представлено членом-корреспондентом Л. А. Яновичем)

Белорусский государственный университет, Минск

Поступило 04.06.2014

Введение. Алгоритмы, реализуемые на параллельных компьютерах с распределенной памятью, являются, как правило, зернистыми: множество операций алгоритма разбито на макрооперации, называемые зёрнами вычислений, или тайлами [1–4]. Операции одного тайла выполняются атомарно, как одна единица вычислений. Результаты вычислений тайла передаются, если требуется обмен, одной коммуникационной операцией, что позволяет значительно уменьшить общее время пересылки данных. Разбиение множества операций на тайлы используется также при реализации алгоритмов на многоядерных персональных компьютерах и на графических ускорителях [2–6].

Необходимым этапом процедур распараллеливания алгоритмов является получение зависимостей (информационных связей) между операциями: любые преобразования алгоритма, в том числе и получение параллельных версий алгоритма, должны сохранять порядок выполнения зависимых операций. Мощным математическим аппаратом для описания информационных связей на уровне отдельных операций алгоритма являются функции зависимостей. Доказано (теорема В. В. Воеводина об информационном покрытии [7]), что все зависимости алгоритмов, представленных довольно широким классом программ, можно задать функциями, линейно зависящими от параметров циклов и внешних переменных.

При распараллеливании алгоритмов, операции которых разбиты на тайлы, возникает задача получения зависимостей между тайлами. В [8] задача решена для алгоритмов с однородными зависимостями: разработан метод получения всех векторов глобальных (уровня тайлов) зависимостей. Эти векторы можно использовать, в частности, для улучшения параллелизма вычислений уровня тайлов и обеспечения одновременного начала шаблонных вычислений процессорами [5; 6]. В этой работе (см. также [9]) сформулированы и доказаны утверждения, позволяющие получить все глобальные зависимости зернистых версий алгоритмов, представленных многомерными циклами с аффинными зависимостями. По заданным функциям, определяющим зависимости на уровне операций, построены функции глобальных зависимостей.

Сведения об информационных зависимостях глобального уровня позволяют формально получать и автоматизировать коммуникационные операции зернистых вычислений. Кроме того, знание глобальных зависимостей позволяет осуществлять распараллеливание на уровне тайлов. Например, осуществляя аффинные преобразования и тайлинг исходного алгоритма таким образом, что координаты векторов, характеризующих глобальные зависимости, оказываются неотрицательными, можно гарантировать параллельное выполнение зернистых алгоритмов; такой подход рассмотрен для организации зернистых вычислений на многоядерных процессорах и графических процессорах [3; 4].

Функции зависимостей. Тайлинг. Приведем необходимые для дальнейшего изложения сведения об информационной структуре алгоритмов и о тайлинге.

Будем считать, что алгоритм задан последовательной программой, основную вычислительную часть которой составляет многомерный цикл произвольной структуры вложенности, а границы изменения параметров циклов задаются неоднородными формами, линейными по сово-

купности параметров циклов и внешних переменных. Пусть в гнезде циклов имеется K выполняемых операторов S_β . Область изменения параметров циклов для оператора S_β и размерность этой области обозначим соответственно V_β и n_β , $1 \leq \beta \leq K$.

Вхождением (a, S_β, q) будем называть q -е вхождение массива a в оператор S_β . Нахождение значения оператора S_β при конкретных значениях β и вектора параметров цикла J будем называть операцией и обозначать $S_\beta(J)$. Выполнение всех операций, зависящих от J , называется J -й итерацией.

Пусть пара вхождений $(a, S_\alpha, 1)$ и (a, S_β, q) порождает истинную зависимость $S_\alpha(I) \rightarrow S_\beta(J)$. Это означает: $S_\alpha(I)$ выполняется раньше $S_\beta(J)$; $S_\alpha(I)$ переопределяет (изменяет) элемент массива a , а $S_\beta(J)$ использует в качестве аргумента тот же элемент массива; между операциями $S_\alpha(I)$ и $S_\beta(J)$ этот элемент не переопределяется.

Пары итераций, которым принадлежат зависимые операции, можно задать функцией зависимостей $\Phi_{(a, S_\alpha, 1), (a, S_\beta, q)}(J)$ (называемой также покрывающей функцией графа алгоритма [7]) и множеством (областью определения функции)

$$V_{(a, S_\alpha, 1), (a, S_\beta, q)} = \{J \in \mathbf{Z}^{n_\beta} \mid \exists S_\alpha(\overline{\Phi}_{(a, S_\alpha, 1), (a, S_\beta, q)}(J)) \rightarrow S_\beta(J)\},$$

определяющим вторые элементы пары. Функция зависимостей $\overline{\Phi}_{(a, S_\alpha, 1), (a, S_\beta, q)}(J)$ позволяет для операции $S_\beta(J)$ найти операцию $S_\alpha(I)$, от которой $S_\beta(J)$ зависит. Если понятно, или не имеет значения, какие вхождения порождают зависимость, то функцию $\overline{\Phi}_{(a, S_\alpha, 1), (a, S_\beta, q)}(J)$ и множество $V_{(a, S_\alpha, 1), (a, S_\beta, q)}$ будем обозначать $\overline{\Phi}_{\alpha, \beta}(J)$ и $V_{\alpha, \beta}$. Обычно рассматривают аффинные функции зависимостей вида

$$\begin{aligned} \overline{\Phi}_{\alpha, \beta}(J) &= \Phi_{\alpha, \beta}J + \Psi_{\alpha, \beta}N - \varphi^{\alpha, \beta}, \\ J \in V_{\alpha, \beta}, N \in \mathbf{Z}^e, \Phi_{\alpha, \beta} &\in \mathbf{Z}^{n_\alpha \times n_\beta}, \Psi_{\alpha, \beta} \in \mathbf{Z}^{n_\alpha \times e}, \varphi^{\alpha, \beta} \in \mathbf{Z}^{n_\alpha}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $N \in \mathbf{Z}^e$ – вектор внешних переменных алгоритма; e – число внешних переменных.

Тайлинг применяется для получения макроопераций, называемых зернами вычислений или тайлами. Тайлинг – преобразование алгоритма, при котором каждый цикл разбивается на два цикла: глобальный, параметр которого определяет на данном уровне вложенности порядок вычисления тайлов, и локальный, в котором параметр исходного цикла изменяется в границах одного тайла. Допускается вырожденное разбиение цикла, при котором все итерации относятся к глобальному циклу или все итерации относятся к локальному циклу. Такие циклы будем называть соответственно глобальными неразбиваемыми и локальными неразбиваемыми.

Пусть в гнезде циклов имеется Θ наборов выполняемых операторов, и в окружении каждого набора есть хотя бы один разбиваемый цикл. Под набором операторов будем понимать один или несколько операторов, окруженных одним и тем же множеством циклов. Наборы операторов линейно упорядочены расположением их в записи алгоритма. Обозначим: V^ϑ , $1 \leq \vartheta \leq \Theta$, – области изменения параметров циклов, окружающих наборы операторов, n^ϑ – размерность области V^ϑ , число циклов, окружающих ϑ -й набор операторов. Заметим, что если оператор S_β принадлежит набору операторов с номером ϑ^β , то $n^{\vartheta^\beta} = n_\beta$.

По смыслу тайлинга для каждого набора операторов локальные циклы должны быть самыми внутренними. Поэтому общие локальные циклы распределяются между циклами каждого набора операторов; локальные циклы переставляются с глобальными и становятся самыми внутренними.

Следующие величины и множества используются для формализации тайлинга.

$$m_\zeta^\vartheta = \min_{J(j_1, j_2, \dots, j_{n^\vartheta}) \in V^\vartheta} j_\zeta, M_\zeta^\vartheta = \max_{J(j_1, j_2, \dots, j_{n^\vartheta}) \in V^\vartheta} j_\zeta, 1 \leq \zeta \leq n^\vartheta, \text{ – предельные значения изменения параметров циклов;}$$

$r_1^\vartheta, \dots, r_{n^\vartheta}^\vartheta$ – заданные натуральные числа, определяющие размеры тайла; r_ζ^ϑ обозначает число значений параметра j_ζ , приходящихся на один тайл ϑ -го набора операторов; r_ζ^ϑ может принимать фиксированное значение в пределах от 1 до $r_\zeta^{\vartheta, \max}$ включительно, где $r_\zeta^{\vartheta, \max} = M_\zeta^\vartheta - m_\zeta^\vartheta + 1$;

если $r_\zeta^{\mathfrak{g}} = 1$, то цикл с параметром j_ζ является глобальным неразбиваемым; если $r_\zeta^{\mathfrak{g}} = r_\zeta^{\mathfrak{g}, \max}$, то цикл с параметром j_ζ является локальным неразбиваемым; если два набора операторов имеют общий цикл с параметром j_ζ , то $r_\zeta^{\mathfrak{g}1} = r_\zeta^{\mathfrak{g}2}$;

$R^{\mathfrak{g}} = \text{diag}(r_1^{\mathfrak{g}}, \dots, r_n^{\mathfrak{g}})$ – диагональная матрица;

$Q_\zeta^{\mathfrak{g}} = \lceil (M_\zeta^{\mathfrak{g}} - m_\zeta^{\mathfrak{g}} + 1) / r_\zeta^{\mathfrak{g}} \rceil$, $1 \leq \zeta \leq n^{\mathfrak{g}}$, – число частей, на которые при формировании тайлов разбивается область значений параметра j_ζ цикла, окружающего \mathfrak{g} -й набор операторов;

$V^{\mathfrak{g}, \text{gl}} = \left\{ J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_n^{\text{gl}}) \mid 0 \leq j_\zeta^{\text{gl}} \leq Q_\zeta^{\mathfrak{g}} - 1, 1 \leq \zeta \leq n^{\mathfrak{g}} \right\}$ – области изменения параметров глобальных, т. е. уровня тайлов, циклов;

$V_{J^{\text{gl}}}^{\mathfrak{g}} = \left\{ J(j_1, \dots, j_n) \in V^{\mathfrak{g}} \mid m_\zeta^{\mathfrak{g}} + j_\zeta^{\text{gl}} r_\zeta^{\mathfrak{g}} \leq j_\zeta \leq m_\zeta^{\mathfrak{g}} - 1 + (j_\zeta^{\text{gl}} + 1) r_\zeta^{\mathfrak{g}}, 1 \leq \zeta \leq n^{\mathfrak{g}} \right\}$, $J^{\text{gl}} \in V^{\mathfrak{g}, \text{gl}}$, – области изменения параметров локальных (уровня операций тайлов) циклов при фиксированных значениях параметров глобальных циклов. Множество операций, выполняемых на итерациях множества $V_{J^{\text{gl}}}^{\mathfrak{g}}$, будем также обозначать $V_{J^{\text{gl}}}^{\mathfrak{g}}$. Множества $V_{J^{\text{gl}}}^{\mathfrak{g}}$ называются тайлами.

Опишем структуру многомерного цикла после применения к нему преобразования тайлинга. Параметры циклов j_ζ^{gl} изменяются в соответствии с неравенствами $0 \leq j_\zeta^{\text{gl}} \leq Q_\zeta^{\mathfrak{g}} - 1$, для каждого набора операторов имеется столько локальных циклов, сколько $r_1^{\mathfrak{g}}, \dots, r_n^{\mathfrak{g}}$ превосходят единицу.

Рассмотренный способ разбиения множества операций алгоритма на макрооперации-тайлы называется методом окаймления. Отметим, что метод окаймления может приводить к избыточным областям изменения параметров глобальных циклов: некоторые множества $V_{J^{\text{gl}}}^{\mathfrak{g}}$ могут быть пустыми.

Функции глобальных зависимостей. Получение функций глобальных зависимостей.

Рассмотрим некоторую истинную зависимость $S_\alpha(I) \rightarrow S_\beta(J)$. Итерации, порождающие зависимость, принадлежат некоторым тайлам: $I \in V_{I^{\text{gl}}}^{\mathfrak{g}\alpha}$ и $J \in V_{J^{\text{gl}}}^{\mathfrak{g}\beta}$. Таким образом, порождается зависимость уровня тайлов: данное, вычисленное при выполнении операций тайла $V_{I^{\text{gl}}}^{\mathfrak{g}\alpha}$ используется при выполнении операции (операций) тайла $V_{J^{\text{gl}}}^{\mathfrak{g}\beta}$. По аналогии с функциями зависимостей $\overline{\Phi}_{\alpha, \beta}(J)$ уровня операций введем в рассмотрение функции $\overline{\Phi}_{\alpha, \beta}^{\text{gl}}(J^{\text{gl}})$, которые для любого тайла $V_{J^{\text{gl}}}^{\mathfrak{g}\beta}$ определяют тайлы $V_{I^{\text{gl}}}^{\mathfrak{g}\alpha}$, $I^{\text{gl}} = \overline{\Phi}_{\alpha, \beta}^{\text{gl}}(J^{\text{gl}})$, результаты операций которых являются аргументами операций тайла $V_{J^{\text{gl}}}^{\mathfrak{g}\beta}$. Будем искать функции глобальных зависимостей в виде

$$I^{\text{gl}} = \overline{\Phi}_{\alpha, \beta}^{\text{gl}}(J^{\text{gl}}) = \Phi_{\alpha, \beta}^{\text{gl}} J^{\text{gl}} + \Psi_{\alpha, \beta}^{\text{gl}} N - \varphi^{\alpha, \beta, \text{gl}}, \quad (2)$$

где $\Phi_{\alpha, \beta}^{\text{gl}}$ и $\Psi_{\alpha, \beta}^{\text{gl}}$ – матрицы; $\varphi^{\alpha, \beta, \text{gl}}$ – вектор.

Обозначим: $1_n = (1, 1, \dots, 1)$ – n -мерный вектор с единичными координатами, $\Phi_{\alpha, \beta, +}$ – матрица, получаемая из матрицы $\Phi_{\alpha, \beta}$ обнулением всех ее отрицательных элементов, $\Phi_{\alpha, \beta, -}$ – матрица, получаемая из матрицы $\Phi_{\alpha, \beta}$ обнулением всех ее положительных элементов. Неравенства векторов означают неравенства соответствующих координат векторов.

Т е о р е м а. Пусть компоненты вектора $(R^{\mathfrak{g}\alpha})^{-1} \Psi_{\alpha, \beta} N$ и матрицы $(R^{\mathfrak{g}\alpha})^{-1} \Phi_{\alpha, \beta} R^{\mathfrak{g}\beta}$ являются целыми. Аффинная функция зависимостей $\Phi_{\alpha, \beta}(J)$ вида (1) порождает функции глобальных зависимостей вида (2), параметры которых определяются следующим образом:

$$\Phi_{\alpha, \beta}^{\text{gl}} = (R^{\mathfrak{g}\alpha})^{-1} \Phi_{\alpha, \beta} R^{\mathfrak{g}\beta}, \quad (3)$$

$$\Psi_{\alpha, \beta}^{\text{gl}} = (R^{\mathfrak{g}\alpha})^{-1} \Psi_{\alpha, \beta}, \quad (4)$$

$\varphi^{\alpha, \beta, \text{gl}}$ – векторы с целыми координатами, удовлетворяющие следующим неравенствам:

$$\begin{aligned} (R^{\mathfrak{g}\alpha})^{-1} (m^{\mathfrak{g}\alpha} + \varphi^{\alpha, \beta} - \Phi_{\alpha, \beta} m^{\mathfrak{g}\beta} + \Phi_{\alpha, \beta, +} 1_{n\beta} - \Phi_{\alpha, \beta, +} R^{\mathfrak{g}\beta} 1_{n\beta}) \leq \varphi^{\alpha, \beta, \text{gl}} \leq \\ (R^{\mathfrak{g}\alpha})^{-1} (m^{\mathfrak{g}\alpha} + \varphi^{\alpha, \beta} - 1_{n\alpha} + R^{\mathfrak{g}\alpha} 1_{n\alpha} - \Phi_{\alpha, \beta} m^{\mathfrak{g}\beta} - \Phi_{\alpha, \beta, -} R^{\mathfrak{g}\beta} 1_{n\beta} + \Phi_{\alpha, \beta, -} 1_{n\beta}). \end{aligned} \quad (5)$$

Одна функция зависимостей может породить столько функций глобальных зависимостей, сколько векторов $\varphi^{\alpha,\beta,gl}$ удовлетворяет условию (5).

Доказательство. Пусть зависимость между тайлами порождается итерациями $I \in V_{I^{gl}}^{\vartheta^\alpha}$ и $J \in V_{J^{gl}}^{\vartheta^\beta}$. Из определения тайлов $V_{I^{gl}}^{\vartheta^\alpha}$ и $V_{J^{gl}}^{\vartheta^\beta}$ имеем

$$m^{\vartheta^\alpha} + R^{\vartheta^\alpha} I^{gl} \leq I \leq m^{\vartheta^\alpha} - 1_{n_\alpha} + R^{\vartheta^\alpha} (I^{gl} + 1_{n_\alpha}), \quad (6)$$

$$m^{\vartheta^\beta} + R^{\vartheta^\beta} J^{gl} \leq J \leq m^{\vartheta^\beta} - 1_{n_\beta} + R^{\vartheta^\beta} (J^{gl} + 1_{n_\beta}). \quad (7)$$

Преобразуем двойное неравенство (6) с учетом соотношений (1), (2), (4):

$$\begin{aligned} m^{\vartheta^\alpha} + R^{\vartheta^\alpha} (\Phi_{\alpha,\beta}^{gl} J^{gl} + \Psi_{\alpha,\beta}^{gl} N - \varphi^{\alpha,\beta,gl}) &\leq \Phi_{\alpha,\beta} J + \Psi_{\alpha,\beta} N - \varphi^{\alpha,\beta} \leq \\ m^{\vartheta^\alpha} - 1_{n_\alpha} + R^{\vartheta^\alpha} (\Phi_{\alpha,\beta}^{gl} J^{gl} + \Psi_{\alpha,\beta}^{gl} N - \varphi^{\alpha,\beta,gl} + 1_{n_\alpha}), & \\ m^{\vartheta^\alpha} + \varphi^{\alpha,\beta} + R^{\vartheta^\alpha} \Phi_{\alpha,\beta}^{gl} J^{gl} - R^{\vartheta^\alpha} \varphi^{\alpha,\beta,gl} &\leq \Phi_{\alpha,\beta} J \leq \\ m^{\vartheta^\alpha} + \varphi^{\alpha,\beta} - 1_{n_\alpha} + R^{\vartheta^\alpha} 1_{n_\alpha} + R^{\vartheta^\alpha} \Phi_{\alpha,\beta}^{gl} J^{gl} - R^{\vartheta^\alpha} \varphi^{\alpha,\beta,gl}. & \end{aligned} \quad (8)$$

Из двойного неравенства (7) можно получить неравенства

$$\begin{aligned} \Phi_{\alpha,\beta} m^{\vartheta^\beta} + \Phi_{\alpha,\beta} R^{\vartheta^\beta} J^{gl} + \Phi_{\alpha,\beta,-} R^{\vartheta^\beta} 1_{n_\beta} - \Phi_{\alpha,\beta,-} 1_{n_\beta} &\leq \Phi_{\alpha,\beta} J \leq \\ \Phi_{\alpha,\beta} m^{\vartheta^\beta} + \Phi_{\alpha,\beta} R^{\vartheta^\beta} J^{gl} - \Phi_{\alpha,\beta,+} 1_{n_\beta} + \Phi_{\alpha,\beta,+} R^{\vartheta^\beta} 1_{n_\beta}. & \end{aligned} \quad (9)$$

Для этого следует расписать систему (7) по координатам, затем умножить неравенства на компоненты матрицы $\Phi_{\alpha,\beta}$ и сложить соответствующие неравенства одинакового смысла.

Исключение Фурье–Мотзкина (Fourier–Motzkin elimination – процедура, предназначенная для выделения в системе неравенств ограничений, связанных только с интересующими нас переменными) из системы неравенств (8), (9) величин $\Phi_{\alpha,\beta} J$ приводит к системе

$$\begin{aligned} m^{\vartheta^\alpha} + \varphi^{\alpha,\beta} + R^{\vartheta^\alpha} \Phi_{\alpha,\beta}^{gl} J^{gl} - R^{\vartheta^\alpha} \varphi^{\alpha,\beta,gl} - (\Phi_{\alpha,\beta} m^{\vartheta^\beta} + \Phi_{\alpha,\beta} R^{\vartheta^\beta} J^{gl} - \Phi_{\alpha,\beta,+} 1_{n_\beta} + \Phi_{\alpha,\beta,+} R^{\vartheta^\beta} 1_{n_\beta}) &\leq 0, \\ \Phi_{\alpha,\beta} m^{\vartheta^\beta} + \Phi_{\alpha,\beta} R^{\vartheta^\beta} J^{gl} + \Phi_{\alpha,\beta,-} R^{\vartheta^\beta} 1_{n_\beta} - \Phi_{\alpha,\beta,-} 1_{n_\beta} - & \\ (m^{\vartheta^\alpha} + \varphi^{\alpha,\beta} - 1_{n_\alpha} + R^{\vartheta^\alpha} 1_{n_\alpha} + R^{\vartheta^\alpha} \Phi_{\alpha,\beta}^{gl} J^{gl} - R^{\vartheta^\alpha} \varphi^{\alpha,\beta,gl}) &\leq 0. \end{aligned}$$

Из этой системы с учетом равенства (3) приходим к неравенствам (5), которым должны удовлетворять векторы $\varphi^{\alpha,\beta,gl}$.

Теорема доказана.

С л е д с т в и е 1. Если зависимость $S_\alpha(I) \rightarrow S_\beta(J)$ является однородной, то $\Phi_{\alpha,\beta}^{gl}$ – единичная матрица, $\Psi_{\alpha,\beta}^{gl}$ – нулевая матрица, $\varphi^{\alpha,\beta,gl}$ – векторы с целыми координатами, удовлетворяющие неравенствам

$$(R^{\vartheta^\alpha})^{-1}(\varphi^{\alpha,\beta} + 1_{n_\alpha}) - 1_{n_\alpha} \leq \varphi^{\alpha,\beta,gl} \leq (R^{\vartheta^\alpha})^{-1}(\varphi^{\alpha,\beta} - 1_{n_\alpha}) + 1_{n_\alpha}. \quad (10)$$

Действительно, для однородной зависимости имеем: $\Phi_{\alpha,\beta}$ – единичная матрица, $\Psi_{\alpha,\beta}$ – нулевая матрица, $n_\alpha = n_\beta$, $m^{\vartheta^\alpha} = m^{\vartheta^\beta}$, $R^{\vartheta^\alpha} = R^{\vartheta^\beta}$. Из соотношений (3)–(5) вытекает сформулированное утверждение.

Ранее случай алгоритмов с однородными зависимостями исследован в работе [8].

С л е д с т в и е 2. Если имеется зависимость, задаваемая функцией вида (1), матрицы R^{ϑ^α} и R^{ϑ^β} являются единичными матрицами, то

$$\overline{\Phi}_{\alpha,\beta}^{gl}(J^{gl}) = \Phi_{\alpha,\beta} J^{gl} + \Psi_{\alpha,\beta} N - (\varphi^{\alpha,\beta} + m^{\vartheta^\alpha} - \Phi_{\alpha,\beta} m^{\vartheta^\beta}). \quad (11)$$

Действительно, в вырожденном случае, когда $R^{\mathfrak{g}^\alpha}$ и $R^{\mathfrak{g}^\beta}$ являются единичными матрицами, тайлинг не приводит к получению макроопераций, а сводится к сдвигу параметров циклов: $J^{\mathfrak{g}^1} = J - m^{\mathfrak{g}^\beta}$, $J^{\mathfrak{g}^1} = J - m^{\mathfrak{g}^\beta}$. В этом случае из соотношений (3)–(5) получим

$$\Phi_{\alpha,\beta}^{\mathfrak{g}^1} = \Phi_{\alpha,\beta}, \Psi_{\alpha,\beta}^{\mathfrak{g}^1} = \Psi_{\alpha,\beta}, \varphi^{\alpha,\beta,\mathfrak{g}^1} = \varphi^{\alpha,\beta} + m^{\mathfrak{g}^\alpha} - \Phi_{\alpha,\beta} m^{\mathfrak{g}^\beta}.$$

Приходим к исходной функции зависимостей с учетом указанного сдвига параметров циклов. Если имеется зависимость $S_\alpha(I) \rightarrow S_\beta(J)$, причем $I = \Phi_{\alpha,\beta} J + \Psi_{\alpha,\beta} N - \varphi^{\alpha,\beta}$, то функция (11) укажет зависимость между итерациями $I^{\mathfrak{g}^1} = I - m^{\mathfrak{g}^\alpha}$ и $J^{\mathfrak{g}^1} = J - m^{\mathfrak{g}^\beta}$:

$$\begin{aligned} \overline{\Phi}_{\alpha,\beta}^{\mathfrak{g}^1}(J^{\mathfrak{g}^1}) &= \Phi_{\alpha,\beta}(J - m^{\mathfrak{g}^\beta}) + \Psi_{\alpha,\beta} N - \varphi^{\alpha,\beta} - m^{\mathfrak{g}^\alpha} + \Phi_{\alpha,\beta} m^{\mathfrak{g}^\beta} = \\ &= \Phi_{\alpha,\beta} J + \Psi_{\alpha,\beta} N - \varphi^{\alpha,\beta} - m^{\mathfrak{g}^\alpha} = I - m^{\mathfrak{g}^\alpha} = I^{\mathfrak{g}^1}. \end{aligned}$$

З а м е ч а н и е. Неравенства (5) задают окаймляющий параллелепипед для области изменения координат вектора $\varphi^{\alpha,\beta,\mathfrak{g}^1}$. Эту область можно уточнить применением процедуры Фурье–Моцкина к системе неравенств (7) и (8) с целью исключения координат вектора J .

Отметим, что в случае однородной зависимости неравенства (10) следуют непосредственно из системы (7), (8) ($\Phi_{\alpha,\beta}$ – единичная матрица, неравенства (7) и (9) совпадают) [8]. Поэтому соотношения (10) точно задают область изменения координат вектора $\varphi^{\alpha,\beta,\mathfrak{g}^1}$.

Пример получения функций глобальных зависимостей. Одна из зависимостей алгоритма решения системы линейных алгебраических уравнений с левой треугольной матрицей порядка n задается функцией [7, с. 381]

$$\overline{\Phi}_{3,3}(i, j) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = (j, j-1), (i, j) \in V_{3,3} = \{(i, j) \in Z^2 \mid 3 \leq i \leq n, 2 \leq j \leq i-1\}.$$

Известно, что $V_3 = \{(i, j) \in Z^2 \mid 2 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq i-1\}$.

Для получения $\Phi_{\alpha,\beta}^{\mathfrak{g}^1}(i^{\mathfrak{g}^1}, j^{\mathfrak{g}^1})$, где $\alpha=3, \beta=3$, имеем $\Phi_{\alpha,\beta} = \Phi_{\alpha,\beta,+} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $\Phi_{\alpha,\beta,-} = 0$, $\Psi_{\alpha,\beta} = 0$, $\varphi^{\alpha,\beta} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, $R^{\mathfrak{g}^\alpha} = R^{\mathfrak{g}^\beta} = \begin{pmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{pmatrix}$, $m^{\mathfrak{g}^\alpha} = m^{\mathfrak{g}^\beta} = (2, 1)$.

$$\text{Из формулы (3) получим } \Phi_{\alpha,\beta}^{\mathfrak{g}^1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{r_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{r_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{r_2}{r_1} \\ 0 & \frac{r_2}{r_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \rho \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где ρ – натуральное число такое, что $r_2 = \rho r_1$. Из формулы (4) следует $\Psi_{\alpha,\beta}^{\mathfrak{g}^1} = (R^{\mathfrak{g}^\alpha})^{-1} \Psi_{\alpha,\beta} = 0$. Из соотношений (5) имеем

$$\begin{aligned} (R^{\mathfrak{g}^\alpha})^{-1} \left(\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right) \leq \varphi^{\alpha,\beta,\mathfrak{g}^1} \leq \\ (R^{\mathfrak{g}^\alpha})^{-1} \left(\begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} - 0 + 0 \right), \begin{pmatrix} \frac{-r_2+2}{r_1} \\ \frac{-r_2+2}{r_2} \end{pmatrix} \leq \varphi^{\alpha,\beta,\mathfrak{g}^1} \leq \begin{pmatrix} \frac{r_2}{r_1} \\ \frac{r_2}{r_2} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Так как координаты вектора $\varphi^{\alpha,\beta,\mathfrak{g}^1}$ должны быть целочисленными, то для $r_1 \geq 3$ получим $\begin{pmatrix} -\rho+1 \\ 0 \end{pmatrix} \leq \varphi^{\alpha,\beta,\mathfrak{g}^1} \leq \begin{pmatrix} \rho \\ 1 \end{pmatrix}$. Если $r_2 = r_1$, то $\rho = 1$,

$$\overline{\Phi}_{\alpha,\beta}^{\mathfrak{g}^1}(J^{\mathfrak{g}^1})(i^{\mathfrak{g}^1}, j^{\mathfrak{g}^1}) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i^{\mathfrak{g}^1} \\ j^{\mathfrak{g}^1} \end{pmatrix} - \varphi^{\alpha,\beta,\mathfrak{g}^1}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \leq \varphi^{\alpha,\beta,\mathfrak{g}^1} \leq \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Применим процедуру Фурье–Мощкина исключения i и j из неравенств (7), (8):

$$\left\{ \begin{array}{l} 2 + i^{\text{gl}} r_1 \leq i \leq 1 + (i^{\text{gl}} + 1) r_1, \\ 1 + j^{\text{gl}} r_2 \leq j \leq (j^{\text{gl}} + 1) r_2, \\ 2 + (j^{\text{gl}} - \varphi_1^{\alpha, \beta, \text{gl}}) r_1 \leq j \leq 1 + (j^{\text{gl}} - \varphi_1^{\alpha, \beta, \text{gl}} + 1) r_1, \\ 1 + (j^{\text{gl}} - \varphi_2^{\alpha, \beta, \text{gl}}) r_2 \leq j - 1 \leq (j^{\text{gl}} - \varphi_2^{\alpha, \beta, \text{gl}} + 1) r_2, \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} 2 + i^{\text{gl}} r_1 \leq 1 + (i^{\text{gl}} + 1) r_1, \\ 1 + j^{\text{gl}} r_2 \leq (j^{\text{gl}} + 1) r_2, \\ 2 + (j^{\text{gl}} - \varphi_1^{\alpha, \beta, \text{gl}}) r_1 \leq (j^{\text{gl}} + 1) r_2, \\ 2 + (j^{\text{gl}} - \varphi_2^{\alpha, \beta, \text{gl}}) r_2 \leq (j^{\text{gl}} + 1) r_2, \\ 1 + j^{\text{gl}} r_2 \leq 1 + (j^{\text{gl}} - \varphi_1^{\alpha, \beta, \text{gl}} + 1) r_1, \\ 2 + (j^{\text{gl}} - \varphi_1^{\alpha, \beta, \text{gl}}) r_1 \leq 1 + (j^{\text{gl}} - \varphi_1^{\alpha, \beta, \text{gl}} + 1) r_1, \\ 2 + (j^{\text{gl}} - \varphi_2^{\alpha, \beta, \text{gl}}) r_2 \leq 1 + (j^{\text{gl}} - \varphi_1^{\alpha, \beta, \text{gl}} + 1) r_1, \\ 1 + j^{\text{gl}} r_2 \leq 1 + (j^{\text{gl}} - \varphi_2^{\alpha, \beta, \text{gl}} + 1) r_2, \\ 2 + (j^{\text{gl}} - \varphi_1^{\alpha, \beta, \text{gl}}) r_1 \leq 1 + (j^{\text{gl}} - \varphi_2^{\alpha, \beta, \text{gl}} + 1) r_2, \\ 2 + (j^{\text{gl}} - \varphi_2^{\alpha, \beta, \text{gl}}) r_2 \leq 1 + (j^{\text{gl}} - \varphi_2^{\alpha, \beta, \text{gl}} + 1) r_2. \end{array} \right.$$

Если $r_2 = r_1$ и $r_1 \geq 3$, то имеем

$$\left\{ \begin{array}{l} -1 < \varphi_1^{\alpha, \beta, \text{gl}}, \\ -1 < \varphi_2^{\alpha, \beta, \text{gl}}, \\ \varphi_1^{\alpha, \beta, \text{gl}} \leq 1, \\ \varphi_2^{\alpha, \beta, \text{gl}} \leq 1, \\ \varphi_1^{\alpha, \beta, \text{gl}} < \varphi_2^{\alpha, \beta, \text{gl}} + 1, \\ \varphi_2^{\alpha, \beta, \text{gl}} < \varphi_1^{\alpha, \beta, \text{gl}} + 1. \end{array} \right.$$

Таким образом, только два вектора $\varphi^{\alpha, \beta, \text{gl}} = (0, 0)$ и $\varphi^{\alpha, \beta, \text{gl}} = (1, 1)$ удовлетворяют данной системе неравенств.

Об областях определения функций глобальных зависимостей. В область определения $V_{\alpha, \beta}^{\text{gl}}$ функции $\overline{\Phi}_{\alpha, \beta}^{\text{gl}}(J^{\text{gl}})$ могут входить только тайлы, полученные в результате тайлинга области определения $V_{\alpha, \beta}$ функции $\overline{\Phi}_{\alpha, \beta}(J)$. После применения тайлинга к $V_{\alpha, \beta}$, получим множество

$$V_{\alpha, \beta}^{\text{gl}, 0} = \left\{ J^{\text{gl}}(j_1^{\text{gl}}, \dots, j_n^{\text{gl}}) \in Z^{n^{\text{gl}}} \mid q^{\text{gl}, 0} \leq j^{\text{gl}} \leq Q^{\text{gl}, 0} \right\},$$

где

$$q^{\text{gl}, 0} = \left[(R^{\text{gl}, \beta})^{-1} (m^{\alpha, \beta} - m^{\text{gl}, \beta}) \right], \quad Q^{\text{gl}, 0} = \left[(R^{\text{gl}, \beta})^{-1} (M^{\alpha, \beta} - m^{\text{gl}, \beta}) \right], \quad m^{\alpha, \beta} = \min_{J \in V_{\alpha, \beta}} J, \quad M^{\alpha, \beta} = \max_{J \in V_{\alpha, \beta}} J.$$

Так как рассматривается метод окаймления, то имеет место включение $V_{\alpha, \beta}^{\text{gl}, 0} \supseteq V_{\alpha, \beta}^{\text{gl}}$.

Кроме того, $V_{\alpha, \beta}^{\text{gl}}$ включает в себя только такие J^{gl} , для которых не пусто множество

$$V_{J^{\text{gl}}, \varphi^{\alpha, \beta, \text{gl}}}^{\text{in}} = \left\{ J \in V_{J^{\text{gl}}}^{\text{gl}, \beta} \mid J \in V_{\alpha, \beta}, \overline{\Phi}_{\alpha, \beta}(J) \in V_{J^{\text{gl}}}^{\text{gl}, \alpha}, I^{\text{gl}} = \Phi_{\alpha, \beta}^{\text{gl}} J^{\text{gl}} + \Psi_{\alpha, \beta}^{\text{gl}} N - \varphi^{\alpha, \beta, \text{gl}} \right\}.$$

Множество $V_{J^{\text{gl}}, \varphi^{\alpha, \beta, \text{gl}}}^{\text{in}}$ состоит из итераций тайла $V_{J^{\text{gl}}}^{\text{gl}, \beta}$ таких, что аргументы выполняемых на них операций являются результатами операций тайла $\overline{\Phi}_{\alpha, \beta}^{\text{gl}}(J^{\text{gl}})$. Если для какого-либо $\varphi^{\alpha, \beta, \text{gl}}$ все множества $V_{J^{\text{gl}}, \varphi^{\alpha, \beta, \text{gl}}}^{\text{in}}$ являются пустыми, то функция $\Phi_{\alpha, \beta}^{\text{gl}} J^{\text{gl}} + \Psi_{\alpha, \beta}^{\text{gl}} N - \varphi^{\alpha, \beta, \text{gl}}$ глобальных зависимостей не задает.

В рассматриваемом примере, случай $r_2 = r_1$, $J \in V_{J^{\text{gl}}}^{\text{gl}, \beta}$ означает $\left\{ \begin{array}{l} 2 + i^{\text{gl}} r_1 \leq i \leq 1 + (i^{\text{gl}} + 1) r_1, \\ 1 + j^{\text{gl}} r_2 \leq j \leq (j^{\text{gl}} + 1) r_2, \end{array} \right.$
 $\overline{\Phi}_{\alpha, \beta}(J) \in V_{I^{\text{gl}}}^{\text{gl}, \alpha}$, $I^{\text{gl}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i^{\text{gl}} \\ j^{\text{gl}} \end{pmatrix} - \varphi^{\alpha, \beta, \text{gl}}$ означает $\left\{ \begin{array}{l} 2 + (j^{\text{gl}} - \varphi_1^{\alpha, \beta, \text{gl}}) r_1 \leq j \leq 1 + (j^{\text{gl}} - \varphi_1^{\alpha, \beta, \text{gl}} + 1) r_1, \\ 1 + (j^{\text{gl}} - \varphi_2^{\alpha, \beta, \text{gl}}) r_2 \leq j - 1 \leq (j^{\text{gl}} - \varphi_2^{\alpha, \beta, \text{gl}} + 1) r_2. \end{array} \right.$

Для векторов $\varphi^{\alpha,\beta,gl} = (0, 0)$ и $\varphi^{\alpha,\beta,gl} = (1, 1)$ множество $V_{J^{gl}, \varphi^{\alpha,\beta,gl}}^{in}$ не пусто, для векторов $\varphi^{\alpha,\beta,gl} = (0, 1)$ и $\varphi^{\alpha,\beta,gl} = (1, 0)$ множество $V_{J^{gl}, \varphi^{\alpha,\beta,gl}}^{in}$ пусто.

Таким образом, в статье представлен метод получения информационных зависимостей глобального уровня (т. е. уровня макроопераций) для алгоритмов с аффинными зависимостями. Введенные в рассмотрение функции глобальных зависимостей могут быть использованы для формализованного распараллеливания и автоматизированного получения коммуникационных операций зернистых алгоритмов. Метод использует структуру информационных зависимостей исходного алгоритма уровня операций, обобщает метод поиска однородных зависимостей глобального уровня.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф12ОБ-005).

Литература

1. *Xue J., Cai W.* // Parallel Computing. 2002. Vol. 28, N 5. P. 915–939.
2. *Kim D. G., Rajopadhye S.* // Technical Report CS-09-101, Colorado State University, Department of Computer Science, February. 2009. – 21 p.
3. *Tavarageri S., Hartono A., Baskaran M.* et al. // Proc. 15th Workshop on Compilers for Parallel Computers. Vienna, Austria. 2010. July.
4. *Baskaran M., Ramanujam J., Sadayappan P.* // Proceedings of the Compiler Construction, 19th International Conference of the Joint European Conferences on Theory and Practice of Software. Paphos, Cyprus. 2010. March.
5. *Di P., Ye D., Su Yu* et al. // 41st International Conference on Parallel Processing. Pittsburgh, 2012. P. 350–359.
6. *Bandishti V., Pananilath I., Bondhugula U.* // Proceedings of Supercomputing. Los Alamitos, CA, USA. IEEE Computer Society Press, 2012. P. 40:1–40:11.
7. *Воеводин В. В., Воеводин Вл. В.* Параллельные вычисления. СПб., 2002. – 608 с.
8. *Лиходед Н. А., Соболевский П. И.* // Докл. НАН Беларуси. 2011. Т. 55, № 2. С. 22–26.
9. *Толстикова А. А., Лиходед Н. А.* // Тез. докл. Междунар. науч. конф. «XI Белорусская математическая конференция». Минск, 5–8 нояб. 2012 г. Минск, 2012. Ч. 3. С. 23–24.

N. A. LIKHODED, A. A. TOLSTIKOV

likhoded@bsu.by

FUNCTIONS ASSIGNING THE DEPENDENCES OF GRAINED ALGORITHMS

Summary

In case of parallel grained affine algorithm a method of obtaining dependences is developed. Propositions to formalize the dependences in parallel grained algorithms are stated and proved.

ФИЗИКА

УДК 621.396.6

Член-корреспондент Ф. Ф. КОМАРОВ¹, М. А. КСЕНОФОНТОВ¹, А. Г. ТКАЧЕВ²,
Р. М. КРИВОШЕЕВ¹, Л. Е. ОСТРОВСКАЯ¹, В. Н. РОДИОНОВА³, А. К. ТОГАМБАЕВА⁴

**ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА СТРУКТУРУ,
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИУРЕТАНА
И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКРАНИРОВКИ ЭМИ**

¹НИИ прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ, Минск

²Тамбовский государственный технический университет, Россия

³НИИ прикладных ядерных проблем БГУ, Минск

⁴Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Поступило 18.06.2014

Введение. В настоящее время актуальной проблемой является защита биологических объектов, чувствительных приборов и систем от электромагнитных излучений (ЭМИ). Предыдущие исследования [1; 2] подтвердили перспективность использования углеродных наноструктурированных материалов при создании эффективных систем для защиты от ЭМИ. В работе [1] были исследованы характеристические свойства фольг композиционного материала на основе углеродных нанотрубок (УНТ), названного в зарубежной литературе buscuraper [3]. Согласно проведенным исследованиям, эффективность экранирования такого материала достигала 41 дБ при толщине ~60 мкм, что соответствует мировому уровню разработки данной проблематики [4].

Основным ограничителем в производстве больших партий бумаги из УНТ являются относительно небольшие размеры и пока еще дорогостоящий процесс изготовления подобного материала. Однако постепенное удешевление компонент оставляет перспективу его применения для экранирования эксклюзивных и дорогих электронных систем, например, таких как микроэлектронное оборудование для космических аппаратов.

Для более широкого круга приложений требуется материал, обладающий подобными характеристиками по экранировке ЭМИ, но в то же время отличающийся недорогой, воспроизводимой в коммерческих масштабах процедурой изготовления.

Таким требованиям соответствуют композиционные полимерные материалы, активно изучаемые в последние годы [5; 6], которые кроме вышеописанных свойств обладают устойчивостью как к механическим воздействиям [7], так и эрозионному износу [8], а также по достижении порога перколяции при добавлении углеродосодержащих наноматериалов – высокой электропроводностью [9; 10].

Цель работы – изготовление композита на основе полиуретана с добавлением углеродных нанотрубок и исследование структурного состояния, электропроводности, оптических свойств и способности материала ослаблять ЭМИ в широком спектральном диапазоне, в зависимости от концентрации добавки.

Материалы и методы исследования. Для изготовления экспериментальных образцов использовались методы механического перемешивания компонентов полимера при одновременном постепенном введении добавки. В качестве полимерной матрицы применялся полиуретановый компаунд АДВ-22, состоящий из полиэфирного и изоцианатного компонентов, которые являются хорошо текучими при комнатной температуре жидкостями, и смешиваются в пропорциях 2 : 1 соответственно. Время отверждения компаунда до технологической прочности при комнат-

ной температуре составляет 3–5 суток. В качестве добавки был выбран углеродный наноматериал двух типов: таунит и таунит-МД [11]. Таунит представляет собой коаксиальные многостенные углеродные нанотрубки, отличительные особенности которых для серии МД заключаются в 4–5 раз большем наружном диаметре, в 10 раз большей длине и в 2 раза большей удельной геометрической поверхности. Для лучшего диспергирования таунита-МД в полимерной матрице в качестве растворителя был использован хлористый метилен.

Сформированные образцы после высушивания и полного испарения растворителя представляли собой диски с диаметром 7,5–8 см и толщиной 1 см. Концентрация добавки в образцах составляла 0,058 и 0,4 вес. % для таунита-МД; 1,5 и 3 вес. % для таунита.

На рис. 1 представлена оптическая микрофотография торцевого среза полиуретанового образца, полученная с помощью системы исследования микрообъектов на основе оптического микроскопа Nikon Eclipse LV150 (Япония).

Это изображение свидетельствует о достаточно однородном диспергировании углеродного наноматериала в полимерной матрице. Несовершенство поверхности обусловлено адсорбцией воздуха полимером в процессе изготовления образца.

Измерения электрофизических параметров полиуретановых образцов проводились на электрометре Keithley 6517B с приставкой для измерения сопротивления пластин диэлектриков (Model 8009 Resistivity Test Chamber). Приставка позволяет измерять вольтамперные характеристики и определять как объемное, так и поверхностное сопротивление высокоомных проводников при тестовых напряжениях до 1 кВ.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) были зарегистрированы при комнатной температуре на установке Cary Eclipse (Agilent) с ФЭУ R3896 в качестве фотоприемника и импульсной ксеноновой лампой для возбуждения ФЛ.

Спектры комбинационного рассеяния света исследовались на микрорамановском спектрометре Integra Spectra (NT-MDT) при длине волны возбуждающего лазера 473 нм.

Измерение характеристик ослабления ЭМИ радиопоглощающими материалами выполнялось с помощью панорамных измерителей и ослабления коэффициента стоячей волны по напряжению [12; 13]. В основу построения структурной схемы измерения положен принцип отдельного выделения и непосредственного детектирования сигналов падающей и прошедшей мощности в волноведущем тракте. Сигнал, пропорциональный мощности, падающей на исследуемый радиопоглощающий материал, выделяется направленным ответвителем и индикатором падающей мощности. Сигнал, пропорциональный мощности, прошедшей через исследуемый радиопогло-

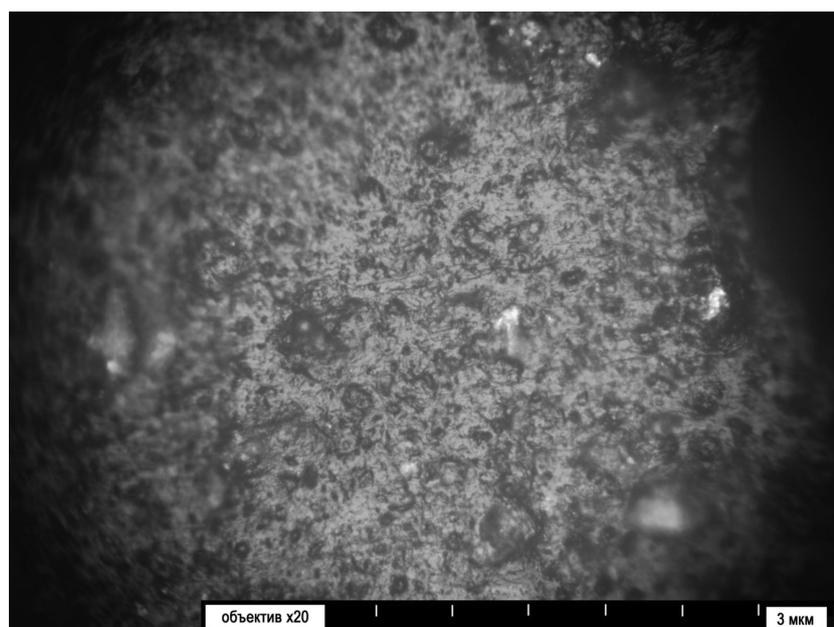


Рис. 1. Оптическая микрофотография полиуретанового образца с таунитом

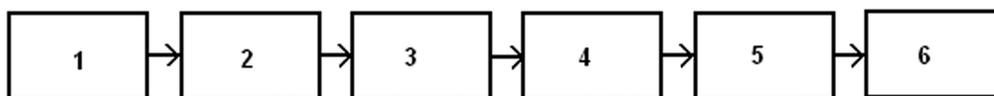


Рис. 2. Структурная диаграмма измерительной системы: 1 – система измерения коэффициента стоячей волны; 2 – ферритовый изолятор; 3 – волновод; 4 – специальный волноводный измеритель; 5 – волновод; 6 – соответствующая нагрузка

щающий материал, выделяется направленным ответвителем и индикатором прошедшей мощности. Отношение прошедшей и падающей мощности определяет ослабление, вносимое исследуемым радиопоглощающим материалом. В процессе определения характеристик ослабления ЭМИ использовались волноводный и антенный метод измерения.

Волноводный метод измерения основывается на использовании схемы замещения. На рис. 2 представлена блок-схема измерений.

Волноводный метод позволяет измерить ослабление, характеризующее исследуемые материалы с точки зрения практического использования их в СВЧ диапазоне.

Результаты и их обсуждение. Рис. 3 иллюстрирует влияние, оказываемое добавлением углеродного наноматериала в полимерную матрицу в концентрациях 1,5 и 3 вес. % для таунита и 0,4 вес. % для таунита-МД, на проводимость композита.

Так, по сравнению с исходным материалом проводимость образцов с 1,5 и 3 вес. % таунита возрастает с увеличением количества добавки, что свидетельствует о взаимосвязи этих параметров. Однако характеристика образца с 0,4 вес. % добавки показывает, что композит с таунитом-МД, обладающим большей длиной УНТ и удельной геометрической поверхностью, при меньших концентрациях превосходит по электрофизическим свойствам материал с концентрацией таунита 1,5 и 3 вес. %.

На рис. 4 показаны полученные при длине волны 280 нм спектры ФЛ для образцов полиуретана с таунитом. Как видно на рисунке, в чистом полиуретане наблюдается линия ФЛ с максимумом при 386 нм, от которого в длинноволновую область тянется медленный спад. Разложение спектра на полосы с гауссовой формой линии, показанное на рисунке, приводит к двум пикам ФЛ при 386 и 450 нм. Полученные для чистого полиуретана спектры ФЛ хорошо согласуются с известными литературными данными. Например, в работе [14] наблюдался основной пик ФЛ от полиуретана при длине волны 379–380 нм и небольшое плечо в спектре ФЛ при ~435 нм. Спектр ФЛ полиуретана связан с рекомбинацией экситонов в основной цепи с бинафтил группой, которая присутствует как π -сопряженный компонент в полимере.

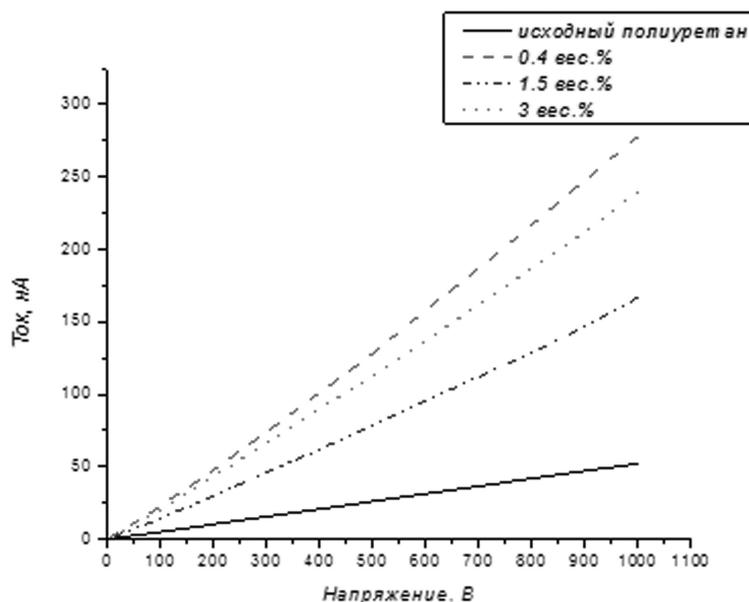


Рис. 3. Электрофизические параметры полиуретановых образцов

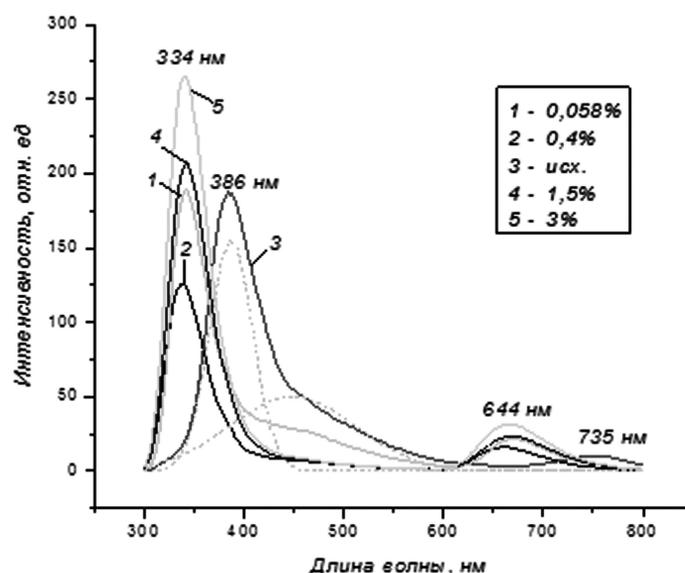


Рис. 4. Спектры ФЛ композитного материала полиуретан-таунит с различным содержанием таунита

Как видно на рис. 4, при введении в полиуретан таунита наблюдается существенный сдвиг основной полосы ФЛ в коротковолновую область. При этом длинноволновое плечо ФЛ уменьшается в образце с концентрацией таунита 0,058 вес. %, и отсутствует в образцах с 0,4, 1,5 и 3 вес. % таунита.

Основная полоса ФЛ всех образцов с таунитом расположена при 334 нм. Интересно отметить, что интенсивность полос ФЛ несколько возрастает при росте концентрации таунита. Происходящее изменение формы ФЛ трудно связать с фотолюминесценцией самих углеродных нанотрубок, поскольку известно, что УНТ имеют слабую ФЛ. Интенсивная ФЛ с длиной волны максимума полосы, отличной от ФЛ полиуретана, может быть связана с функционализацией люминесцирующих групп полиуретана, т. е. взаимодействием с УНТ.

Исследованы также рамановские спектры композитов полиуретана с таунитом (рис. 5). Поскольку концентрация таунита в композитах была не выше 3 %, типичных для графитовых материалов спектров рамановского рассеяния в образцах полиуретана с таунитом (содержащих УНТ) не наблюдалось. Однако интересно отметить, что в композите с УНТ проявляются собственные рамановские линии полимера в области 1100–1600 и 2800–3000 см^{-1} [15], которые не проявились в исходном полиуретане. Это свидетельствует об улучшении условий выхода излучения из образца в композитных образцах с таунитом и о более гладкой поверхности.

Результаты измерений ослабления ЭМИ образцами с различной концентрацией добавки сравнительно с исходным материалом представлены в таблице.

Данные таблицы о взаимодействии электромагнитного излучения с образцами свидетельствуют о заметном ослаблении излучения в области частот 8,15–37,5 ГГц и сильном в области частот 37,5–78,33 ГГц.

Использование таунита-МД в качестве добавки в полиуретан уже при очень низких концентрациях (0,058 и 0,4 вес. %) обеспечивает заметное улучшение экранирующих свойств в системе полимер-УНМ. Это обусловлено большой длиной углеродных нанотрубок и большой удельной геометрической поверхностью. Возможно, определенную роль

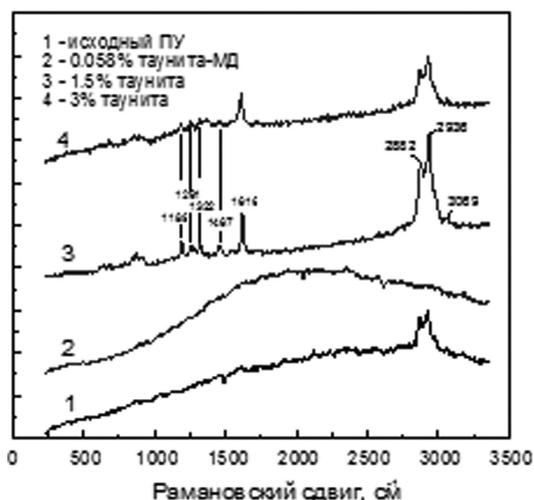


Рис. 5. Рамановские спектры композитного материала полиуретан-таунит

Величина ослабления ЭМИ полиуретановыми образцами в различных частотных диапазонах, дБ

Диапазон частот, ГГц	Концентрация, вес. %				
	0,058	0,4	исх.	1,5	3
8,15–12,05	3,2	5,7	3,6	3,6	3,6
25,95–37,5	4,4	13,3	2,4	5	5
37,5–53,57	–	30	–	–	–
53,57–78,33	–	35	–	–	–

Получены спектры фотолюминесценции изготовленных образцов. Выявлено взаимодействие добавки с полимерной матрицей через функционализацию люминесцирующих групп полиуретана.

Исследования эффективности ослабления электромагнитного излучения позволили определить, что образец с добавлением таунита серии МД является наиболее перспективным для изготовления композиционных материалов на основе полиуретана для защиты от электромагнитных излучений широкого спектрального диапазона.

Работа выполнена при частичной поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Т14КАЗ-010).

Литература

1. Комаров Ф. Ф., Мильчанин О. В., Муноз Э. и др. // Журн. техн. физики. 2011. Т. 81, № 11. С. 140–145; Komarov F. F., Mil'chanin O. V., Munoz E. et al. // Technical Physics. 2011. Vol. 56, N 11. P. 1679–1684.
2. Mohammed H. Al-Saleh, Walaa H. Saadeh, Uttandaraman Sundararaj // Carbon. 2013. Vol. 60. P. 146–156.
3. Chee-Sern Lim, Mauricio Guzman, Joseph Schaefer, Bob Minaie // Thin Solid Films. 2013. Vol. 534. P. 111–115.
4. Thomassin J.-M., Vuluga D., Alexandre M. et al. // Polymer. 2012. Vol. 53 P. 169–174.
5. Roham Rafiee // Composite Structures. 2013. Vol. 97. P. 304–309.
6. Hamid Ghasemi, Roham Rafiee, Xiaoying Zhuang et al. // Computational Materials Science. 2014. Vol. 85. P. 295–305.
7. Xia Liu, Xiao-Qiao He, Qing-Sheng Yang, Yiu-Wing Mai // Composites: Part B. 2011. Vol. 42. P. 2123–2129.
8. Jinhu Chen, Ian M. Hutchings, Tong Deng et al. // Carbon. 2014. Vol. 73. P. 421–431.
9. Mohammed H. Al-Saleh, Haya K. Al-Anid, Yazan A. Hussain // Composites: Part A. 2013. Vol. 46. P. 53–59.
10. Bauhofer W., Kovacs J. Z. // Composites Science and Technology. 2009. Vol. 69. P. 1486–1498.
11. Ткачев А. Г., Золотухин И. В. Аппаратура и методы синтеза твердотельных наноструктур. М., 2007.
12. Елецкий А. В. // Успехи физ. наук. 1997. Т. 167, № 9. С. 945–972.
13. Раков Э. Г. // Успехи химии. 2000. Т. 69. С. 41–59.
14. Pokhrel B., Konwer S., Dutta A. et al. // J. of Applied Polymer Science. 2011. Vol. 122. P. 3316–3321.
15. Zavastin D., Cretescu I., Bezdadea M. et al. // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2010. Vol. 370. Iss. 1–3. P. 120–128.

F. F. KOMAROV, M. A. KSENOFONTOU, A. G. TKACHEV, R. M. KRYVASHEYEU,
L. E. OSTROVSKAYA, V. N. RODIONOVA, A. K. TOGAMBAEVA

kryvasheyeu@gmail.com

INFLUENCE OF CARBON NANOMATERIALS ON THE STRUCTURE, ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF POLYURETHANE AND EMR SHIELDING EFFICIENCY

Summary

Samples of polyurethane with different concentration of carbon nanomaterial loadings were fabricated. Structural, optical and electrophysical properties of these samples were studied. Characteristics of interaction of electromagnetic radiation with samples in the frequency range of 8.15–78.33 GHz were measured. Apparent radiation attenuation was observed in the frequency range of 8.15–37.5 GHz, and more intense attenuation – in the frequency range of 37.5–78.33 GHz.

ХИМИЯ

УДК 541.64:539(2+3):536.7

Ю. М. КРИВОГУЗ¹, А. В. КРАУКЛИС², С. С. ПЕСЕЦКИЙ¹,
академик С. А. ЖДАНОК², К. О. БОРИСЕВИЧ²

**ВЛИЯНИЕ МНОГОСТЕННЫХ НАНОТРУБОК
НА ПРИВИВКУ ТРАНС-ЭТИЛЕН-1,2-ДИКАРБОНОВОЙ КИСЛОТЫ
К МАКРОМОЛЕКУЛАМ ПОЛИОЛЕФИНОВ**

¹Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, Гомель

²ЧНПП «Передовые исследования и технологии», Минск

Поступило 11.06.2014

Введение. Функционализация неполярных полиолефинов (ПО) прививкой полярных мономеров, осуществляемая в расплаве, широко используется для химической модификации макромолекул [1; 2]. Наиболее часто прививку осуществляют методом реакционной экструзии (РЭ), используя материальный цилиндр экструдера в качестве реактора непрерывного действия [2]. К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал в области реакций прививки, осуществляемых в экструзионных реакторах. Проблемы, связанные со спецификой инициирования и развития свободнорадикальных реакций при функционализации ПО, обсуждены в ряде фундаментальных обзоров [2–6]. Однако несмотря на обширную информацию о механизме и кинетике реакций прививки отдельных мономеров к ПО, их смесям, для расширения рынка привитых продуктов требуется постоянное совершенствование технологии функционализации, обоснование возможности применения новых типов мономеров, полимеров и сополимеров олефинов.

Как правило, наряду с прививкой мономера в расплаве всегда протекают побочные реакции, важнейшими из которых являются конкурирующие процессы сшивания и деструкции макромолекул. Направленность побочных реакций определяется, прежде всего, природой ПО: полиэтилен и его различные сополимеры при функционализации преимущественно сшиваются, а полипропилен и другие высокомолекулярные продукты на основе пропилена – деструктируют. Существенное влияние на ход основного и побочных процессов оказывает природа инициатора радикальных реакций и состав реакционной системы в целом. В частности, важная роль в обеспечении выхода привитого продукта и побочных реакций, к числу которых можно отнести и процесс олигомеризации прививаемого мономера, принадлежит взаимной растворимости реактантов в полимерном расплаве.

Можно ожидать, что адсорбция инициатора на активном наполнителе или другом носителе, введенном в реакционную систему, окажет заметное влияние на ход основного и побочных процессов при функционализации ПО. Адсорбция инициатора может снизить его преждевременный расход, обусловленный термораспадом на свободные радикалы. Вследствие большой концентрации свободных радикалов при этом могут интенсифицироваться побочные реакции. Инициатор, сорбированный и активированный на активном носителе, может поступать в зону реакции в дозированных количествах и более длительное время сохранять реакционную способность.

К числу активных носителей свободнорадикальных инициаторов могут быть отнесены отдельные типы углеродных нанонаполнителей, в частности, многостенные углеродные нанотрубки

ки (МУНТ) – протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до сотен и более микрометров [7]. Помимо уникальных механических свойств, электрической и термической проводимости МУНТ обладают высокой сорбционной емкостью и могут поглощать различные низкомолекулярные вещества. Они химически активны в ряде реакций, в том числе протекающих по свободнорадикальным механизмам [8].

В связи с изложенным, можно ожидать, что введение МУНТ в реакционные системы, используемые при функционализации ПО, окажет влияние на ход основного и побочных процессов.

Следует отметить, что к настоящему времени вопросы влияния нанонаполнителей на протекание реакций, имеющих место при функционализации ПО, в научной литературе практически не освещены. На наш взгляд, их изучение весьма актуально как с научной, так и с практической точек зрения. Проведение функционализации ПО в присутствии нанонаполнителей, с одной стороны, позволяет реализовать процесс получения нанокомпозитов в одну стадию, а с другой – за счет присутствия нанонаполнителей с различной физико-химической активностью открывается возможность управлять ходом процесса функционализации.

Настоящее сообщение посвящено анализу влияния МУНТ на свободнорадикальную прививку транс-этилен-1,2-дикарбоновой кислоты (ТЭДК) к ПО в ходе реакционной экструзии и изучению отдельных свойств функционализированных продуктов.

Материалы и методы исследования. Объектами исследований служили сополимер пропилена и этилена (сПП, марка 8332М, ТУ 2211-136-05766801-2006, содержание звеньев этилена ≈ 7 масс. %; производство ОАО «Нижекамск Нефтехим», Россия, значение показателя текучести расплава (ПТР) при $T = 210$ °С и $P = 21,6$ Н равно 4,6 г/10 мин), линейный полиэтилен низкой плотности (ЛПЭНП, марка Exceed 1018 НА, производства Exxon Mobil, США, ПТР = 1,0 г/10 мин при $T = 190$ °С и $P = 21,6$ Н). Прививаемый мономер – ТЭДК квалификации «ч», поставщик – ОАО «Камтэкс» (Россия); свободнорадикальный инициатор – пероксид 1,3-бис(трет-бутилперокси-изопропил)бензол (Perk-14, производства Akzo Nobel, Нидерланды). В качестве МУНТ использовали нанотрубки со средним диаметром ≈ 5 –30 нм и длиной от 1,5 до 30 мкм, полученные в ИТМО НАН Беларуси.

Концентрация прививаемой ТЭДК в экспериментах была постоянной и составляла 1 % (здесь и далее концентрация выражена в масс. %). Содержание Perk-14 при прививке к сПП принимали равным 0,12 % и 0,15 % – при прививке к ЛПЭНП. Концентрацию МУНТ, вводимых в реакционную смесь, изменяли в диапазоне от 0,01 до 0,3 %.

Функционализацию ПО в присутствии МУНТ методом реакционной экструзии осуществляли при использовании экструзионно-грануляционной линии на базе двухшнекового экструдера TSSK-35/40 (КНР, диаметр шнеков 35 мм, $L/D = 40$, число независимых зон обогрева материального цилиндра – 10). Материальный цилиндр экструдера снабжен зоной вакуумирования и шнеками со специальной конфигурацией, обеспечивающей высокую степень диспергирования компонентов и их равномерное распределение в объеме полимерного материала. Температуру в зонах реакции материального цилиндра экструдера принимали равной 210 °С.

Для приготовления реакционной смеси вначале МУНТ подвергали УЗ-диспергированию в среде ацетона (установка УЗДН-1УЧ.2, Россия, ГОСТ 5.687–70, частота 22 кГц, длительность 15 мин, начальная температура 23 °С). Затем в полученной дисперсии растворяли требуемое количество инициатора Perk-14. Далее гранулы ПО обрабатывали этим раствором, тщательно перемешивая их до полного испарения растворителя. После этого их опудривали порошкообразной ТЭДК. Затем осуществляли прививку кислоты по технологии РЭ [9]. Расплав ПО после выхода из фильеры экструдера охлаждали в воде и гранулировали.

В качестве параметра, характеризующего выход привитого продукта, использовали эффективность прививки (α) – отношение массы привитой ТЭДК к ее общему количеству, введенному в реакционную смесь. Значения α определяли методом ИК спектроскопии, основанном на анализе содержания ТЭДК в исходном функционализированном ПО (ФПО) и ФПО, подвергнутом экстрагированию в ацетоне при температуре 45 °С. Абсорбционные ИК спектры снимали в интервале частот 500–5000 см^{-1} на фурье-спектрометре NICOLET 5700 FT-IR. Запись спектров осу-

ществляли при разрешении $0,4 \text{ см}^{-1}$ и количестве сканирований 60. Подробно методика определения эффективности прививки при использовании пленочных образцов описана в [9].

О реологическом поведении полимерных расплавов судили по значениям ПТР, которые определяли на приборе 5MPCA фирмы RAY-RAN TEST EQUIPMENT LTD (Великобритания) в соответствии с ГОСТ 11645–73 при температуре $230 \text{ }^\circ\text{C}$ и нагрузке 50 Н для ЛПЭНП с привитой ТЭДК (ЛПЭНП-п-ТЭДК) и при $T = 190 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 50 \text{ Н}$ – для сПП-п-ТЭДК. Использовали капилляр диаметром $2,095 \pm 0,005 \text{ мм}$.

О кристаллической структуре материалов судили по данным дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Исследования выполняли на микрокалориметре Perkin Elmer Diamond (Shelton, США) при навеске 5 мг, скоростях нагрева и охлаждения $16 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. С целью исключения влияния тепловой предыстории образцов на структуру измерения проводили на пробах, предварительно нагретых в ячейке калориметрического блока до $200 \text{ }^\circ\text{C}$, термостатированных при этой температуре в течение 60 с, и затем повторно использованных для анализа.

Показатели механических свойств образцов определяли при испытании методом растяжения (ГОСТ 11262–76). Измерения проводили при использовании лопаток, полученных методом литья под давлением на термопластавтомате EN-30, Тайвань (объем впрыска 30 см^3). Определяли прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве. Испытания проводили на универсальной машине Instron 5657 (Великобритания) при скорости растяжения 50 мм/мин.

О высокоэластических свойствах расплавов судили по их прочности (σ_m) и коэффициенту разбухания (B_m) [10]. Для исследования прочности расплава и коэффициента разбухания использовали установку на базе лабораторной литьевой машины поршневого типа, сопло которой снабжено капилляром, имеющим диаметр 1,45 мм и длину 2 мм. Цилиндр и сопло литьевой машины располагались вертикально. При определении σ_m к расплаву материала, находящегося в цилиндре литьевой машины, прикладывали нагрузку с таким расчетом, чтобы скорость перемещения поршня, а значит и скорость истечения расплава из капилляра, была постоянной. Она составляла $\approx 10,8 \text{ г}/\text{мин}$. Достигнув определенной длины, экструдат обрывался под действием собственного веса. Для расчета σ_m использовали выражение [10]

$$\sigma_m = \frac{G_m}{S_c},$$

где G_m – критический вес выдавливаемого через капилляр расплава экструдата, при котором происходит отрыв струи от капилляра; S_c – площадь поперечного сечения капилляра.

Отнесение G_m к площади поперечного сечения капилляра позволяло устранить неточности, обусловленные трудностью определения истинного сечения экструдата в момент начала его разрыва. B_m рассчитывали по формуле [10]

$$B_m = \frac{d_m}{d_c},$$

где d_m – наибольшее значение диаметра короткого отрезка экструдата; d_c – диаметр капилляра.

При определении B_m короткие отрезки экструдата (длина $\approx 15 \text{ мм}$) выдавливали через капилляр со скоростью 100 мм/мин и отделяли скальпелем от капилляра при отведенном поршне литьевой машины. Срезы экструдата сразу же помещали в воду, нагретую до $\approx 70 \text{ }^\circ\text{C}$, а затем через $\approx 5 \text{ мин}$ извлекали из воды. Замеры d_m проводили через 10–12 ч. При определении σ_m и B_m температуру расплава принимали равной $175 \text{ }^\circ\text{C}$ в случае сПП-п-ТЭДК и $190 \text{ }^\circ\text{C}$ для образцов на основе ЛПЭНП-п-ТЭДК.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 и 2 представлены зависимости эффективности прививки ТЭДК к макромолекулам ЛПЭНП и сПП, а также ПТР привитых продуктов от содержания МУНТ. На концентрационных зависимостях как для ЛПЭНП-п-ТЭДК, так и для сПП-п-ТЭДК наблюдаются четко выраженные максимумы значений эффективности прививки (α). В обоих случаях максимальные значения α достигаются при концентрации МУНТ $\approx 0,05 \text{ \%}$.

Концентрационные зависимости ПТР привитых продуктов для разных типов ПО имеют существенные отличия. Так, при прививке к ЛПЭНП значения ПТР ЛПЭНП-п-ТЭДК с ростом кон-

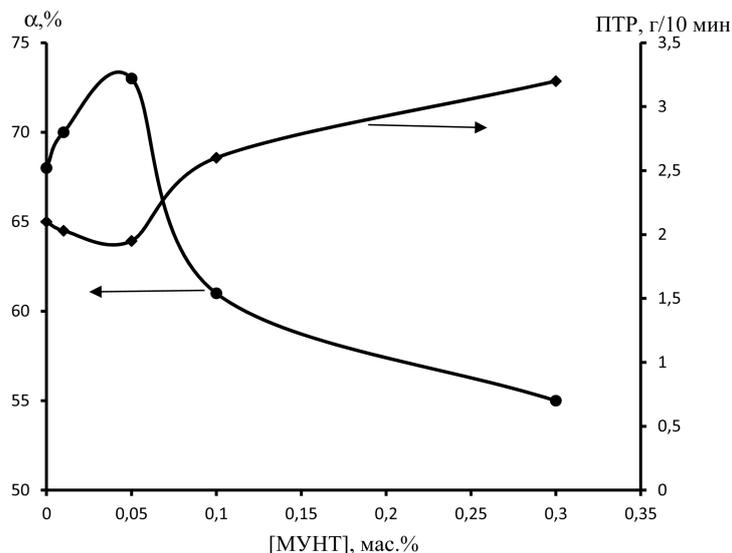


Рис. 1. Влияние концентрации МУНТ на эффективность прививки ТЭДК к ЛПЭНП и показатель текучести расплава ЛПЭНП-п-ТЭДК

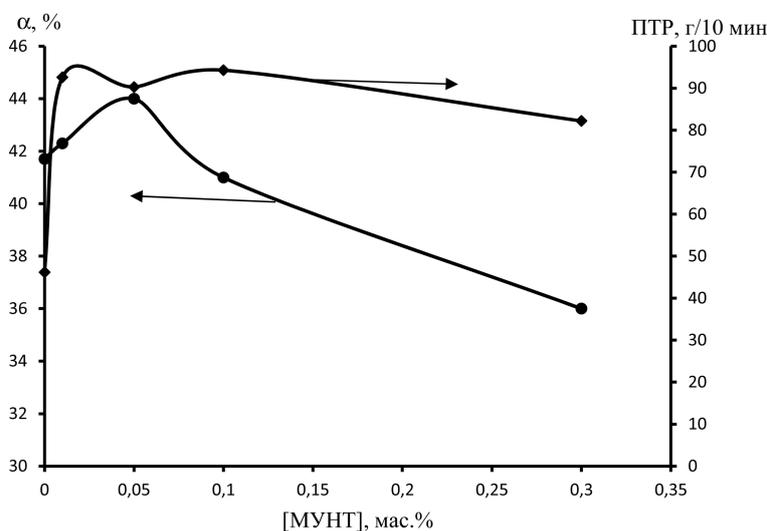


Рис. 2. Влияние концентрации МУНТ на эффективность прививки ТЭДК к сПП и показатель текучести расплава сПП-п-ТЭДК

центрации МУНТ изменяются экстремально с минимумом при 0,05 % нанонаполнителя, а для сПП вначале при [МУНТ] = 0,01 % наблюдается почти двукратный прирост значений ПТР, а затем после небольшого минимума при [МУНТ] = 0,05 % происходит плавное снижение значений данного показателя, общий уровень значений которого остается существенно более высоким по сравнению с сПП-п-ТЭДК, синтезированным без добавок нанонаполнителя.

Полученные данные свидетельствуют о том, что характер и степень влияния МУНТ на протекание свободнорадикальных реакций прививки ТЭДК к макромолекулам ЛПЭНП и сПП, а также сопровождающие их побочные процессы зависят как от химической природы ПО, так и от концентрации нанонаполнителя. В диапазоне концентраций от 0,01 до 0,05 % МУНТ активирует прививку ТЭДК как к ЛПЭНП, так и к сПП, а при более высоких концентрациях ингибирует ее, что приводит к снижению значений α .

Реологическое поведение расплавов определяется природой ПО. Для сшивающегося ЛПЭНП при добавлении до 0,05 % МУНТ происходит некоторое снижение ПТР, свидетельствующее об увеличении степени сшивания макромолекул, а при дальнейшем повышении концентрации нанонаполнителя наблюдается заметный рост ПТР (от 2 г/10 мин до 3,3 г/10 мин), что указывает на

снижение степени сшивания макромолекул ЛПЭНП [9; 10]. Для преимущественно деструктирующего при свободнорадикальной функционализации сПП [2] введение в состав реакционной системы МУНТ приводит в целом к активированию деструкции (ПТР возрастает более, чем в 2 раза с 45 г/10 мин до 96 г/10 мин при [МУНТ] = 0,1 %).

Таким образом, независимо от природы ПО малые добавки МУНТ (до 0,05 %) активируют прививку мономера, повышая выход привитого продукта, оказывая одновременно активирующее влияние и на ход побочных реакций: сшивание макромолекул ЛПЭНП и деструкцию сПП. Причины наблюдаемых эффектов могут быть связаны с сорбционной и химической активностью МУНТ по отношению к свободнорадикальным превращениям в расплавах ПО при их функционализации. Во-первых, следует отметить наличие в химической структуре МУНТ некоторого количества несопрягаемых двойных связей [11], которые могут взаимодействовать со свободными радикалами, присоединяя радикал с образованием нового неспаренного и неде локализованного электрона, благодаря чему к данному углероду легко присоединяется другой свободный радикал [7; 11; 13]. Исходя из этого, можно было предполагать, что МУНТ, являясь акцептором свободных радикалов, будет проявлять исключительно ингибирующую активность в реакции прививки. Однако, как следует из полученных экспериментальных данных, влияние МУНТ на ход реакций, имеющих место при функционализации ПО, неоднозначно и зависит, как уже упоминалось, и от их концентрации, и от природы полимера.

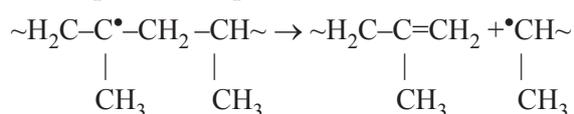
Отметим, что при свободнорадикальной прививке ненасыщенных мономеров к макромолекулам ПО в расплаве при использовании в качестве инициаторов пероксидов, обладающих хорошей растворимостью в полимере и несовместимых с мономером, вначале образуются макрорадикалы [14]. На второй стадии макрорадикалы вступают во взаимодействие с мономером, что сопровождается прививкой последнего к макромолекулам. Внутрицепные и межмолекулярные превращения макрорадикалов ответственны за протекание побочных процессов при прививке [14].

Причин активирующего влияния малых добавок МУНТ на прививку и побочные реакции в ПО при их функционализации в расплаве может быть несколько. Во-первых, как следует из данных [15], фуллерены и другие аллотропные формы углерода способны катализировать термический распад пероксидов. Можно ожидать, что при малой концентрации МУНТ (до 0,05 масс. %) их влияние обусловлено катализом распада пероксида Perk-14 и ростом концентрации свободных радикалов в расплавах ПО.

При повышенной концентрации (>0,05 %) МУНТ в реакционной системе могут проявляться эффекты, обуславливающие замедление реакций прививки и побочных процессов. Обладая высокой сорбционной способностью, МУНТ могут акцептировать Perk-14 . Распад последнего в объеме МУНТ может привести к дезактивации образующихся свободных радикалов на нанотрубках, что неизбежно должно сопровождаться снижением α и выхода продуктов побочных реакций.

При низкой концентрации МУНТ не способны дезактивировать большую часть макрорадикалов и поэтому, видимо, ингибирующий эффект не проявляется, а более ярко выражено их активирующее влияние, обусловленное катализом распада пероксида. При повышенных концентрациях МУНТ за счет акцептирования низкомолекулярных радикалов и взаимодействия с макрорадикалами проявляют повышенную ингибирующую эффективность по отношению к реакциям прививки мономера.

Неординарным является эффект резкого повышения текучести расплава сПП-п-ТЭДК, полученного в присутствии МУНТ (рис. 2). При воздействии свободного радикала на основную цепь ПП, как и сПП с небольшим количеством этилена, происходит отщепление атомов водорода и образование третичного углеродного радикала [2]. Последний является нестабильным и подвергается реакции β -расщепления:



Процесс протекает при относительно низкой энергии активации 29,6 ккал/моль [2]. При этом, как видно из схемы реакции, цепная молекула распадается на две части с двойной связью на одном и первичным радикалом на втором конце цепи.

Резкий рост ПТР сПП-п-ТЭДК, полученного в присутствии МУНТ, указывает на катализ нанотрубками реакций β -распада макромолекул при функционализации. В связи с этим добавление малых количеств МУНТ в состав реакционной смеси при функционализации сПП может рассматриваться как эффективный прием получения высокоиндексных продуктов, которые могут применяться в технологии клеев расплавов, разнообразных адгезивов, компатибилизирующих систем [2].

В табл. 1 представлены данные о температуре и теплоте плавления и кристаллизации ФПО, полученных без добавок МУНТ и в их присутствии. При функционализации ЛПЭНП введение МУНТ в состав реакционной системы независимо от их концентрации мало влияет на значения температуры плавления и кристаллизации. Однако наблюдается заметное увеличение значений теплоты плавления и кристаллизации. Несомненная причина этого – нуклеирующее влияние МУНТ на кристаллизацию ЛПЭНП-п-ТЭДК. Еще более заметно нуклеирующий эффект добавок МУНТ выражен в случае сПП-п-ТЭДК. Введение МУНТ в сПП-п-ТЭДК сопровождается повышением $T_{кр}$ на 2,4–4,8 °С (от 117,1 до 121,9 °С). Степень кристалличности, характеризуемая величиной $\Delta H_{кр}$, определяется концентрацией МУНТ: при ее повышении до 0,05 % $\Delta H_{кр}$ увеличивается от 101,2 до 113,8 Дж/г, а затем снижается (при [МУНТ] = 0,3 % $\Delta H_{кр}$ = 100,8 Дж/г). Аналогичный эффект характерен и для ЛПЭНП-п-ТЭДК, для которого также фиксируется снижение кристалличности при [МУНТ] = 0,3 % (табл. 1). Эффект снижения степени кристалличности кристаллизующихся термопластов при добавлении избытка нуклеирующих агентов неоднократно отмечался в литературе [2]. Он обусловлен пространственными ограничениями роста кристаллитов при образовании в объеме полимерного расплава чрезмерно большого количества центров кристаллизации, в том числе за счет введения добавок нанометрового диапазона размеров.

Т а б л и ц а 1. Влияние добавок МУНТ на значения параметров, характеризующих структуру ФПО

МУНТ, масс. %	$T_{пл}$, °С	$\Delta H_{пл}$, Дж/г	$T_{кр}$, °С	$\Delta H_{кр}$, Дж/г
0	122,2 (168,1)	68,3 (65,2)	106,3 (117,1)	69,4 (101,5)
0,01	119,0 (164,0)	71,3 (76,5)	103,3 (119,5)	80,5 (107,5)
0,05	118,0 (163,6)	77,3 (85,5)	105,0 (120)	82,5 (113,8)
0,1	114,0/120,0 (162,8)	78,2 (76,6)	104,6 (120,4)	83,0 (102,6)
0,3	114,0/121,0 (163,6)	76,8 (69,7)	105,5 (121,9)	75,5 (100,8)

П р и м е ч а н и я: $T_{пл}$, $\Delta H_{пл}$ – температура и теплота плавления; $T_{кр}$, $\Delta H_{кр}$ – температура и теплота кристаллизации; без скобок – данные для ЛПЭНП-п-ТЭДК, в скобках – для сПП-п-ТЭДК.

Показатели механических свойств полимерных образцов определены при испытании методом растяжения. Из диаграмм напряжение–удлинение найдены значения величин прочности при растяжении (σ_p) и относительного удлинения при разрыве (ε_p).

Как следует из данных табл. 2, с увеличением [МУНТ] прочность при растяжении ЛПЭНП-п-ТЭДК мало зависит от степени нанонаполнения, а ε_p в целом заметно повышается при введении нанонаполнителя (от 321 до 369 % для [МУНТ] = 0,3 %). Основная причина этого – получение менее сшитых структур при функционализации в присутствии МУНТ. Некоторое снижение ε_p , характерное для ЛПЭНП-п-ТЭДК, полученного в присутствии 0,05 % МУНТ (табл. 2), обусловлено, как видно на рис. 1, ростом степени сшивания макромолекул, приводящим к снижению текучести расплава.

Т а б л и ц а 2. Показатели механических свойств ФПО

МУНТ, масс. %	ЛПЭНП-п-ТЭДК		сПП-п-ТЭДК	
	σ_p , МПа	ε_p , %	σ_p , МПа	ε_p , %
0	17,6	321	31,6	18
0,01	17,4	329	31,8	15
0,05	17,3	315	33,0	15
0,1	17,3	331	32,3	14
0,3	17,8	369	33,0	15

Для образцов сПП-п-ТЭДК наблюдается некоторый прирост значений σ_p и снижение ε_p . Очевидной причиной этому являются структурные изменения, происходящие при функционализации сПП в присутствии МУНТ: рост кристалличности обычно сопровождается повышением механической прочности и снижением деформационных характеристик кристаллизующихся термопластов.

Данные о влиянии МУНТ на прочность расплавов (σ_m) и коэффициент разбухания (B_m) экструдатов ЛПЭНП-п-ТЭДК и сПП-п-ТЭДК представлены в табл. 3. Как видно из нее, σ_m коррелирует с изменением ПТР расплавов (рис. 1, 2). Это следует из сравнения значений ПТР и σ_m для сПП-п-ТЭДК и ЛПЭНП-п-ТЭДК. Чем выше вязкость, тем выше прочность расплава материала и наоборот.

Т а б л и ц а 3. Результаты анализа высокоэластичных свойств расплавов ФПО

МУНТ, масс. %	ЛПЭНП-п-ТЭДК		сПП-п-ТЭДК	
	σ_m , кПа	B_m , отн. ед.	σ_m , кПа	B_m , отн. ед.
0	2,3	3,2	0,48	2,4
0,01	2,3	2,7	0,33	2,6
0,05	2,3	3,0	0,40	2,8
0,1	1,5	2,6	0,30	2,8
0,3	1,5	2,6	0,35	3,0

Склонность к разбуханию экструдата полимера зависит от вязкости расплава и молекулярно-массового распределения [12]. Общим для ЛПЭНП-п-ТЭДК является тот факт, что зависимость B_m от концентрации МУНТ имеет экстремальный характер. Максимальное разбухание характерно для ЛПЭНП-п-ТЭДК, полученного при концентрации МУНТ 0,05 %, а для сПП-п-ТЭДК максимум B_m наблюдается при [МУНТ] = 0,3 % (табл. 3). Видимо, при данных концентрациях МУНТ в силу конкурирующих побочных реакций (сшивание и деструкция макромолекул) образуются наиболее полидисперсные материалы, что и вызывает повышенное разбухание экструдата.

Полученные данные свидетельствуют о том, что наблюдаемые изменения высокоэластических свойств расплавов функционализированных ПО обуславливаются, главным образом, ходом конкурирующих побочных реакций деструкции и сшивания макромолекул, протекающих при функционализации сополимера, на которые заметное влияние оказывают добавки МУНТ.

Заключение. Из полученных экспериментальных данных следует, что малые добавки МУНТ (0,01–0,3 %) оказывают заметное влияние на ход основного процесса (прививку мономера) к макромолекулам ЛПЭНП и сПП, а также структуру, механические свойства функционализированных продуктов, прочность и высокоэластические свойства их расплавов. Степень влияния добавок МУНТ определяется их концентрацией и природой ПО. Установлено повышение эффективности прививки мономера при концентрации МУНТ в реакционной системе $\approx 0,05$ %.

Для сшивающегося при свободнорадикальной прививке ЛПЭНП добавки МУНТ, вводимые в количестве $\geq 0,1$ %, ингибируют побочный процесс сшивания макромолекул, а для сПП, преимущественно деструктирующего при функционализации, наблюдается эффект катализа побочных реакций уже при [МУНТ] = 0,01 %.

Добавки МУНТ оказывают влияние на кристаллическую структуру функционализированных ЛПЭНП и сПП. Это выражается в увеличении теплоты плавления и кристаллизации, нуклеировании кристаллизации материалов. Нуклеирующий эффект МУНТ в случае функционализации сПП выражен более ярко.

Наблюдаемые изменения механических и высокоэластических свойств расплавов ФПО обуславливаются, главным образом, ходом конкурирующих побочных реакций деструкции и сшивания макромолекул, протекающих при функционализации, на которые заметное влияние оказывают добавки МУНТ.

Литература

1. *Chung M.* Functionalization of Polyolefins. San Diego, 2002. – 274 p.
2. *Песецкий С. С., Макаренко О. А., Кривогуз Ю. М.* // Материалы, технологии, инструменты. 2012. Т. 17, № 2. С. 25–48.
3. Reactive modifiers for polymers / ed. S. Al-Malaika. London, 1997. – 400 p.
4. *Moad G.* // Prog. Polym. Sci. 1999. Vol. 24. P. 81–142.
5. *Jurkowski B., Pesetskii S. S., Krivoguz Yu. M.* // Polyolefin Blends / ed. D. Nwabunma, T. Kyu. Wiley and Sons Inc., 2008. Ch. 10. P. 269–304.
6. *Rzaev Z.* // Intern. Rev. of Chem. Eng. 2011. Vol. 3, N 2. P. 153–215.
7. *Елецкий А. В.* // Успехи физ. наук. 1997. Т. 167, № 9. С. 945–972.
8. *Бадамшина Э. Р., Гафурова М. П., Эстрин Я. И.* // Успехи химии. 2010. Т. 79. С. 1027.
9. *Krivoguz Yu. M., Guliev A. M., Pesetskii S. S.* // Express Polymer Letters. 2010. Vol. 4, N 3. P. 161–170.
10. *Pesetskii S. S., Jurkowski B., Krivoguz Y. M.* et al. // J. Appl. Polym. Sci. 2006. Vol. 102. P. 5095–5104.
11. *Харрис П.* Углеродные нанотрубки и родственные структуры. М., 2003
12. *Герасин В. А., Антипов Е. М., Карбушев В. В.* и др. // Успехи химии. 2013. Т. 82, № 4. С. 303–332.
13. *Diederich F., Thilgen C.* // Science. 1996. Vol. 271, N 5247. P. 317–324.
14. *Pesetskii S. S., Jurkowski B., Krivoguz Yu. M., Kelar K.* // Polymer. 2001. Vol. 42. P. 1037–1043.
15. Handbook of Heterogeneous Catalysis / eds. G. Ertl, H. Knozinger, J. Weitkamp. Weinheim, 1997. Vol. 3. P. 142.

Yu. M. KRIVOGUZ, A. V. KRAUKLIS, S. S. PESETSKII, S. A. ZHDANOK, K. O. BORISEVICH

otdel5mpri@tut. by

EFFECT OF MULTIWALLED NANOTUBES ON GRAFTING OF TRANS-ETHYLENE-1,2-DICARBOXYLIC ACID ONTO POLYOLEFIN MACROMOLECULES

Summary

A study was conducted on the effect of multiwalled carbon nanotubes (MWNT) on the course of free-radical grafting of trans-ethylene-1,2-dicarboxylic acid (TEDA) onto linear low-density polyethylene (LLDPE) and ethylene-propylene copolymer (cPP), containing ethylene units ≈ 7 wt%, using the reactive extrusion process. The extrusion reactor was the material cylinder of the twin-screw extruder TSSK-35/40 (screw diameter = 35 mm; L/D = 40; 10 independent heating zones).

It was found that small amounts of MWNT (0.01–0.3 wt%) influence noticeably the monomer grafting onto macromolecules of LLDPE and cPP, as well as the structure, functionalized products' mechanical properties, strength and high elasticity properties of their melts. The extent of MWNT influence depends on their concentration and PO-structure. It is shown that the monomer's grafting efficiency can be raised with MWNT ≥ 0.1 wt% inhibit the secondary process of macromolecular cross-linking; in the case of cPP which mostly undergoes degradation during functionalization, the secondary reactions accelerate catalytically.

УДК 612.11+577.152

Д. В. ГРИГОРЬЕВА¹, И. В. ГОРУДКО¹, А. В. СОКОЛОВ², Е. В. ШАМОВА¹,
В. Б. ВАСИЛЬЕВ³, О. М. ПАНАСЕНКО⁴, академик С. Н. ЧЕРЕНКЕВИЧ¹

РЕГУЛЯЦИЯ МИЕЛОПЕРОКСИДАЗОЙ Ca^{2+} -СИГНАЛИЗАЦИИ В НЕЙТРОФИЛАХ

¹Белорусский государственный университет, Минск

²НИИ экспериментальной медицины СЗО РАМН, Санкт-Петербург

³Санкт-Петербургский государственный университет

⁴НИИ физико-химической медицины ФМБА России, Москва

Поступило 21.04.2014

Введение. Нейтрофильные лейкоциты играют важную роль в защите организма от инфекций, вызванных бактериями, грибами, вирусами, а также от трансформированных или поврежденных клеток организма-хозяина. При избытке в очаге воспаления или крови факторов активации нейтрофилов запускается процесс неконтролируемого высвобождения в окружающую среду активных форм кислорода, в том числе токсических кислородных радикалов, а также содержащихся в гранулах гидролитических ферментов [1].

Миелопероксидаза (МПО) представляет собой гемсодержащий фермент азурофильных гранул нейтрофилов. Используя в качестве субстрата H_2O_2 , продуцируемый *in vivo* при респираторном взрыве, высвобождаемая из активированных нейтрофилов МПО может проявлять как галогенирующую (окисление галогенидов до высокорекреакционных гипогалоидных кислот), так и пероксидазную (одноэлектронное окисление ряда веществ) активность. Генерируемые МПО окислители (НОСl, НОВг, хлорамины, свободные радикалы и др.) являются высокорекреактивными соединениями, которым и принадлежит основная антимикробная функция нейтрофилов [2]. Однако при секреторной дегрануляции или гибели нейтрофила может проявляться патологическое действие фермента. Так, было показано [3], что гипогалоидные кислоты могут изменять структурные свойства эритроцитов и инициировать гемолиз этих клеток. Кроме того, известно, что модифицированные в результате действия НОСl липиды [4], белки [5], липопотеины [6] способны выступать в качестве новых классов веществ, модулирующих функциональные свойства клеток миелоидного происхождения. В настоящее время накапливаются экспериментальные данные, указывающие на то, что МПО участвует в регуляции структурно-функциональных свойств клеток крови, не только проявляя свою ферментативную активность, но также непосредственно связываясь с клеточной поверхностью. Так, ранее нами было выявлено уменьшение устойчивости эритроцитов к кислотному и осмотическому гемолизу в присутствии МПО, обусловленное электростатическим взаимодействием фермента с плазматической мембраной клеток [7]. Установлено, что связывание МПО с тромбоцитами сопровождается деполимеризацией примембранного F-актина, увеличением концентрации внутриклеточного Ca^{2+} в результате его депо-зависимого входа в цитозоль тромбоцитов, а также снижением модуля упругости тромбоцитов [8]. Lau с соавт. [9] показали, что МПО может выступать в качестве аутокринного модулятора функциональной активности нейтрофилов. При связывании с интегрином CD11b/CD18 на внешней поверхности нейтрофилов и активации внутриклеточных сигнальных путей МПО стимулирует дегрануляцию и окислительный взрыв нейтрофилов.

Кальций является вторичным мессенджером, играющим ключевую роль во многих процессах трансдукции сигнала в клетке, которые регулируют разнообразные функции, такие как секреция, клеточное движение, пролиферация и клеточная смерть [10]. При активации клеток происходит увеличение концентрации кальция в цитозоле за счет высвобождения Ca^{2+} из внутри-

клеточных кальциевых депо и входа Ca^{2+} из внеклеточной среды через каналы плазматической мембраны [10]. Стимуляция нейтрофилов различными агонистами может сопровождаться увеличением концентрации свободного кальция в цитозоле и, в конечном итоге, приводить к изменению функциональной активности нейтрофилов. Изменяется ли кальциевый ответ нейтрофилов при их связывании с МПО в настоящее время неизвестно. В данной работе мы показали, что МПО индуцирует увеличение концентрации кальция в цитозоле нейтрофилов и исследовали механизмы полученного эффекта.

Материалы и методы исследования. В работе использовали следующие реактивы: HEPES, ЭДТА, N-формил-метионил-лейцил-фенилаланин (fMLP), N-этилмалеимид (NEM), генестеин, вортманнин, NaBr, NaOCl (Sigma-Aldrich, США); фура-2АМ (Molecular probes, США); гистопак (Nycomed, Норвегия); декстран Т70 (Roth, Германия). Очищенные моноклональные антитела (mAb) к CD18 – β -субъединице β_2 -интегрина (анти-CD18 mAb) и CD 11b – α -субъединице β_2 -интегрина (анти-CD11b mAb) были приобретены у фирмы Becton Dickinson, Сан-Хосе, Калифорния. Остальные реактивы – Реахим, Россия; Белмедпрепараты, Беларусь.

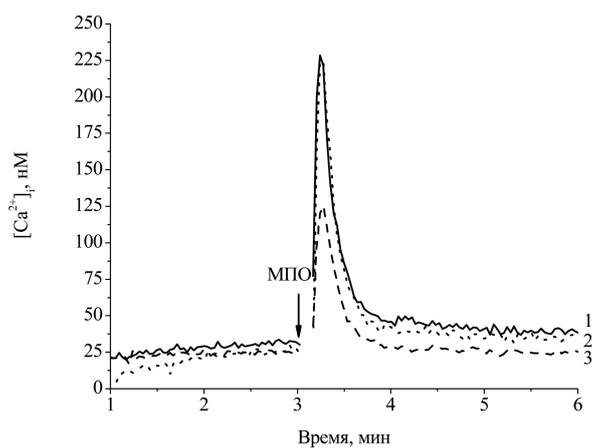
Донорскую кровь, стабилизированную 3,8 %-ным раствором цитрата натрия в соотношении 9 : 1, получали из Республиканского научно-практического центра гематологии и трансфузиологии. Нейтрофилы выделяли согласно методу, описанному в работе [11] с использованием декстрана Т70 и гистопака. Отмытые нейтрофилы ресуспендировали в фосфатно-солевом буфере (10 мМ $\text{Na}_2\text{HPO}_4/\text{KH}_2\text{PO}_4$, 137 мМ NaCl, 2,7 мМ KCl, pH 7,4) с глюкозой (11 мМ) и хранили при 4 °С в течение нескольких часов. Содержание нейтрофилов в клеточной суспензии составляло 97–98 %, число жизнеспособных клеток (по тесту с трипановым синим) – не менее 96 %.

Препарат МПО с показателем чистоты A_{430}/A_{280} (RZ) ~ 0,85 выделяли из замороженных лейкоцитов здоровых доноров с помощью аффинной хроматографии на гепарин-сефарозе, гидрофобной хроматографии на фенил-сефарозе и гель-фильтрации на сефакриле S-200 HR [12].

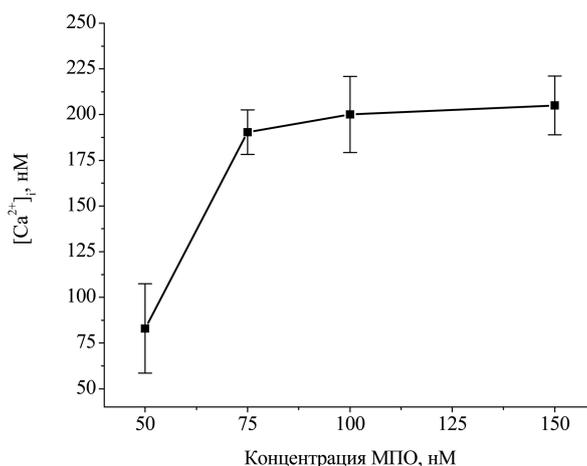
Концентрацию внутриклеточных свободных ионов кальция $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в нейтрофилах определяли с применением флуоресцентного зонда фура-2АМ. К 1 мл отмытых нейтрофилов добавляли 2 мкл 0,5 мМ фура-2АМ и инкубировали в течение 40 мин при 37 °С и постоянном перемешивании. Нагруженные клетки отмывали от инкубационной среды дважды HEPES-буфером (20 мМ HEPES, 120 мМ NaCl, 11 мМ D-глюкоза, 5 мМ KCl, 1 мМ KH_2PO_4 , pH 7,4) при 1500 об/мин в течение 5 мин. Отмытые нейтрофилы сохраняли в качестве исходной суспензии в концентрации 10^7 кл/мл. Для измерения $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в кювету спектрофлуориметра вносили 0,9 мл HEPES-буфера, содержащего 4 мМ MgSO_4 , 2 мМ CaCl_2 и 100 мкл исходной суспензии клеток. Измерение флуоресценции проводили на длине волны 510 нм (возбуждение – 340 и 380 нм) при 37 °С в кинетическом режиме с использованием спектрофлуориметра LSF 1211А (СОЛАР, Минск, Беларусь). Концентрацию цитоплазматического кальция рассчитывали по классическому методу [13].

Результаты исследований представлены как среднее значение \pm среднеквадратичное отклонение. Достоверность различий средних величин рассчитывали с использованием *t*-критерия Стьюдента, принимая различия достоверными на уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Как показано на рис. 1, а (кривая 1), добавление МПО к суспензии нейтрофилов, находящихся в Ca^{2+} -содержащей среде, приводило к увеличению $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в цитозоле, которое может происходить как за счет высвобождения Ca^{2+} из внутриклеточных депо, так и за счет входа внеклеточного Ca^{2+} через каналы плазматической мембраны. Из данных, представленных на рис. 1, б, видно, что МПО, добавленная к суспензии нейтрофилов в Ca^{2+} -содержащей среде, инициировала дозозависимое увеличение $[\text{Ca}^{2+}]_i$, причем максимальный эффект наблюдался при добавлении 75–150 нМ. В каждой серии экспериментов величину эффекта, оказываемого МПО на нейтрофилы, сравнивали с ответом клеток на стандартный активатор – fMLP. Так, увеличение $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в ответ на 1 мкМ fMLP составляло 900 ± 35 нМ, в то время как увеличение $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в ответ на 100 нМ МПО было 200 ± 21 нМ по сравнению с базальным уровнем $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в клетке (25 ± 9 нМ). Также было показано, что МПО, модифицированная НОС1/НОВг в мольном соотношении 1 : 100, сохраняла свою способность вызывать Ca^{2+} -ответ в нейтрофилах. Так, увеличение $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в нейтрофилах при действии хлорированной и бромированной МПО (100 нМ) составляло 193 ± 21 и 200 ± 20 нМ соответственно. В присутствии 50 мкМ гидразида



a



б

Рис. 1. Влияние МПО на Ca^{2+} -ответ нейтрофилов: *a* – типичные кинетические кривые МПО-индуцированного изменения $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в нейтрофилах в Ca^{2+} -содержащей среде в отсутствие (кривая 1) и в присутствии (кривая 2) 50 мкМ гидразида 4-аминобензойной кислоты; кривая 3 – изменение $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в нейтрофилах в бескальциевой среде, содержащей 1 мМ ЭДТА, в ответ на МПО. Стрелкой указан момент добавления 100 нМ МПО; *б* – зависимость изменения $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в нейтрофилах в Ca^{2+} -содержащей среде от концентрации МПО

4-аминобензойной кислоты (ингибитора ферментативной активности МПО) кальциевый ответ нейтрофилов на МПО сохранялся (рис. 1, *a*, кривая 2). Эти данные свидетельствуют о том, что увеличение $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в цитозоле нейтрофилов в присутствии МПО не связано с ее каталитической активностью, а обусловлено непосредственным взаимодействием фермента с компонентами плазматической мембраны.

Для оценки роли входа внеклеточного Ca^{2+} через плазматическую мембрану при МПО-индуцированном увеличении $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в нейтрофилах эксперименты были проведены в бескальциевой среде, содержащей 1 мМ ЭДТА. На рис. 1, *a* (кривая 3) видно, что при добавлении МПО к суспензии нейтрофилов, находящихся в бескальциевой среде, $[\text{Ca}^{2+}]_i$ снижалась на $59 \pm 4\%$ ($n = 6$, $p < 0,05$) по сравнению с ответом нейтрофилов на МПО в Ca^{2+} -содержащей среде. Эти данные свидетельствуют о том, что увеличение $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в нейтрофилах при добавлении МПО, действительно, обусловлено не только выходом Ca^{2+} из внутриклеточных депо, но и входом ионов кальция из внеклеточного пространства через каналы плазматической мембраны.

Для того чтобы исследовать участие различных Ca^{2+} -каналов плазматической мембраны в регуляции МПО-индуцированного входа ионов кальция в нейтрофилы, использовали NiCl_2 – неорганический блокатор Ca^{2+} -каналов Т-типа и верапамил – блокатор потенциал-зависимых Ca^{2+} -каналов L-типа. Было установлено, что в присутствии NiCl_2 (1 мМ) МПО-индуцированное увеличение $[\text{Ca}^{2+}]_i$ уменьшалось на $77 \pm 6\%$ ($n = 5$, $p < 0,05$) по сравнению с контролем. Также

как и в случае с NiCl_2 , после преинкубации клеток с верапамилом (10 мкМ) эффект, оказываемый МПО на нейтрофилы, снижался на $36 \pm 2\%$ ($n = 4$, $p < 0,05$) от контроля. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что МПО-индуцированный вход ионов кальция из внеклеточной среды происходит с участием кальциевых каналов Т-типа и верапамил-чувствительных Ca^{2+} -каналов L-типа плазматической мембраны.

Известно, что МПО-индуцированная активация внутриклеточной сигнализации в нейтрофилах осуществляется через β_2 -интегрины (CD11b/CD18), связывание которых с лигандами происходит с участием ионов двухвалентных металлов [9]. Снижение МПО-индуцированного роста $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в нейтрофилах, находящихся в бескальциевой среде, содержащей ЭДТА (хелатор двухвалентных катионов, необходимых, в том числе, для связывания интегринов с лигандами), может быть как в результате уменьшения связывания МПО со своим рецептором CD11b/CD18, так и ингибирования входа кальция извне. Для того чтобы оценить участие CD11b/CD18 в МПО-индуцированном Ca^{2+} -ответе нейтрофилов, исследовали влияние моноклональных антител – mAb к CD11b (α -субъединице) и CD18 (β -субъединице) β_2 -интегрина – на Ca^{2+} -ответ нейтрофилов при добавлении МПО. Установлено, что присутствие mAb к CD18 субъединице β_2 -интегрина не влияет (рис. 2, а) на МПО-индуцированный Ca^{2+} -ответ нейтрофилов. Однако в присутствии моноклональных антител к CD11b субъединице β_2 -интегрина было выявлено снижение прироста $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в ответ на МПО на $51 \pm 8\%$ ($n = 7$, $p < 0,05$). Эти данные свидетельствуют об участии α -субъединицы β_2 -интегрина в увеличении $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в нейтрофилах при добавлении МПО.

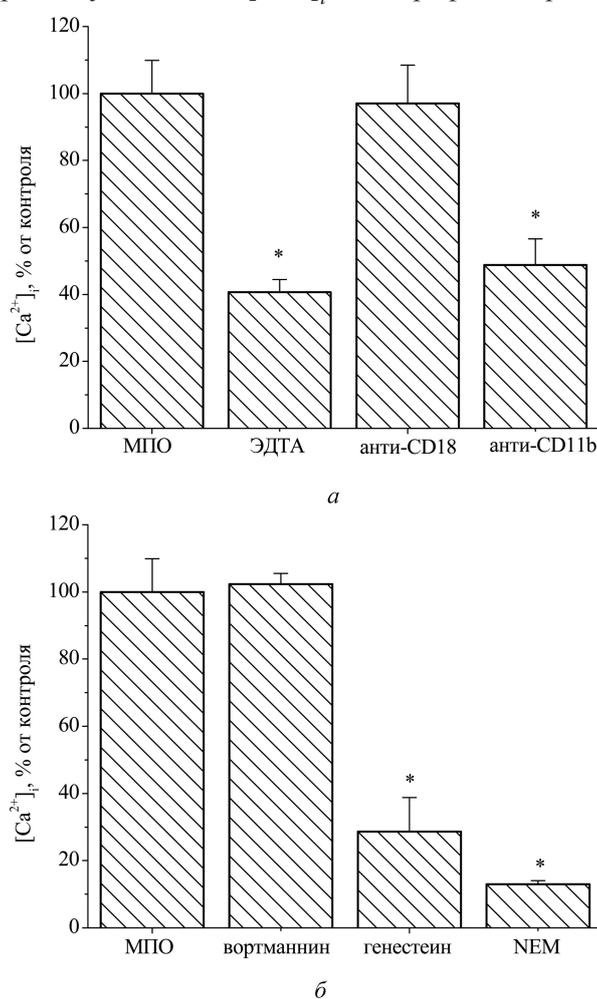


Рис. 2. Влияние моноклональных антител и ингибиторов сигнальных путей на МПО-индуцированное изменение $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в нейтрофилах: зависимость изменения $[\text{Ca}^{2+}]_i$ в нейтрофилах в Ca^{2+} -содержащей среде при добавлении 100 нМ МПО в отсутствие и в присутствии моноклональных антител (10 мкг/мл) к субъединицам β_2 -интегрина нейтрофилов, ЭДТА (1 мМ) (а), а также ингибиторов внутриклеточных сигнальных систем: генестеина (10 мкМ), вортманнина (100 нМ) и NEM (10 мкМ) (б)

Для оценки участия вклада различных сигнальных белков и ферментов в регуляцию кальциевой сигнализации в присутствии МПО использовали следующие ингибиторы: вортманнин (ингибитор фосфотидилинозитол-3-киназ), генестеин (ингибитор тирозинкиназ), NEM (известный сульфгидрильный реагент, основными мишенями которого в нейтрофилах являются цитозольный белок NSF (N-ethylmaleimide-sensitive factor), белок Rac1 и др.). Как видно из данных, представленных на рис. 2, б, инкубация нейтрофилов с вортманнином (100 нМ) не оказывала влияния на увеличение $[Ca^{2+}]_i$ в клетках в присутствии МПО, в то время как предварительная обработка нейтрофилов генестеином (10 мкМ) снижала Ca^{2+} -ответ нейтрофилов при добавлении МПО на $71 \pm 10\%$ ($n = 6, p < 0,05$). Также нами было установлено, что проникающий через плазматическую мембрану сульфгидрильный реагент NEM (10 мкМ) значительно (на $87 \pm 1\%$, $n = 4, p < 0,05$) ингибировал МПО-индуцированное увеличение $[Ca^{2+}]_i$ в нейтрофилах. Таким образом, полученные данные свидетельствуют об участии тирозинкиназ, а также белков и ферментов, содержащих SH-группы, в Ca^{2+} -ответе нейтрофилов после связывания МПО с интегринными.

Известно, что связывание агонистов различной природы с интегринными нейтрофилов может приводить к генерации внутриклеточных сигналов, которые активируют клеточные ответы [14]. Интегрины не содержат каталитических доменов и используют цитозольные нерецепторные тирозинкиназы, например, Src и Syk семейств для последующей трансдукции сигнала [14]. В свою очередь, активация тирозинкиназ может активировать фосфолипазу $C\gamma$, которая гидролизует фосфоинозитиды с образованием диацилглицерола и инозитол-3-фосфата. Последний, в свою очередь, инициирует высвобождение Ca^{2+} из внутриклеточных депо [1]. Так как в данной работе было выявлено, что после преинкубации нейтрофилов с генестеином (10 мкМ) в бескальциевой среде, инициированный МПО, Ca^{2+} -ответ уменьшался на $27 \pm 2\%$ ($n = 3, p < 0,05$), можно предположить участие тирозинкиназ в МПО-индуцированном увеличении $[Ca^{2+}]_i$ за счет выхода Ca^{2+} из внутриклеточных депо клеток. Имеются также данные [15], свидетельствующие об участии тирозинкиназ в увеличении $[Ca^{2+}]_i$, которое обусловлено открытием потенциал-зависимых кальциевых каналов, однако механизмы данного эффекта до конца не выяснены.

Заключение. Таким образом, МПО, секретлируемая нейтрофилами в очагах воспаления, инициирует увеличение концентрации свободных ионов внутриклеточного кальция в нейтрофилах, обусловленное как выходом ионов кальция из внутриклеточных депо, так и входом внеклеточного Ca^{2+} через каналы плазматической мембраны. МПО-индуцированное увеличение $[Ca^{2+}]_i$ в нейтрофилах не связано с проявлением каталитической активности фермента, а обусловлено связыванием МПО с α -субъединицей β_2 -интегрин нейтрофилов и активацией тирозинкиназ и SH-содержащих реагентов. Таким образом, кальций, являющийся основным вторичным мессенджером во внутриклеточной передаче сигналов к молекулам-мишеням, играет ключевую роль в регуляции МПО-зависимой дегрануляции и генерации активных форм кислорода нейтрофилами.

Литература

1. Галкин А. А., Демидова В. С. // Успехи современной биологии. 2007. Т. 127, № 1. С. 58–72.
2. Klebanoff S. J. // J. of leukocyte biology. 2005. Vol. 7. P. 598–625.
3. Zavadnik I. B. et al. // Bioelectrochemistry. 2002. Vol. 58. P. 127–135.
4. Горудко И. В. и др. // Биол. мембраны. 2010. Т. 27, № 4. С. 314–324.
5. Köröczki G. F. et al. // J. Immunol. 2001. Vol. 167. P. 451–460.
6. Maeba R. et al. // FEBS Lett. 1995. Vol. 377, N 3. P. 309–312.
7. Григорьева Д. В. и др. // Докл. НАН Беларуси. 2012. Т. 56, № 6. С. 47–50.
8. Gorudko I. V. et al. // Biology Open. 2013. Vol. 2. P. 916–923.
9. Lau D. et al. // PNAS. Vol. 102, N 2. P. 431–436.
10. Harfi I., Corazza F., D'Hondt S., Sariban E. // J. Immunol. 2005. Vol. 175. P. 4091–4102.
11. Timoshenko A. V. et al. // Methods Mol. Med. 1998. Vol. 9. P. 441–451.
12. Горудко И. В. и др. // Биоорг. химия. 2009. Т. 35, № 5. С. 629–639.
13. Grynkiewicz G., Poenie M., Tsien R. Y. // J. Biol. Chem. 1985. Vol. 260, N 6. P. 3440–3450.
14. Berton G., Lowell C. A. // Cell. Signal. 1999. Vol. 11, N 9. P. 621–635.
15. Wijetunge S., Lynn J. S., Hughes A. D. // British J. of Pharmacology. 2000. Vol. 129. P. 1347–1354.

*D. V. GRIGORIEVA, I. V. GORUDKO, A. V. SOKOLOV, E. V. SHAMOVA, V. B. VASILIEV,
O. M. PANASENKO, S. N. CHERENKEVICH*

dargr@tut.by

REGULATION OF Ca^{2+} -SIGNALING IN NEUTROPHILS BY MYELOPEROXIDASE

Summary

It is shown that myeloperoxidase (MPO) initiates an increase in the concentration of intracellular free calcium ions in neutrophils caused both by the release of calcium ions from intracellular stores, and extracellular Ca^{2+} entry across the plasma membrane channels. It is found that MPO modified by hypohalous acids retains its ability to induce Ca^{2+} -signaling in neutrophils. It is established that MPO-induced entry of Ca^{2+} into cytosol of neutrophils is not associated with its catalytic activity, but caused by direct binding of MPO to α -subunit of β_2 -integrin of neutrophils and tyrosine kinase activation.

УДК 547.514.47+547.466+547.786.1

М. В. ХЛЕБУС, Д. Б. РУБИНОВ, М. Г. ГРИБОВСКИЙ, академик Ф. А. ЛАХВИЧ

СИНТЕЗ ПРОИЗВОДНЫХ 5-АМИНОЛЕВУЛИНОВОЙ КИСЛОТЫ С ЦИКЛОГЕКСАНОВЫМИ β -ДИ- И β -ТРИКЕТОНАМИ

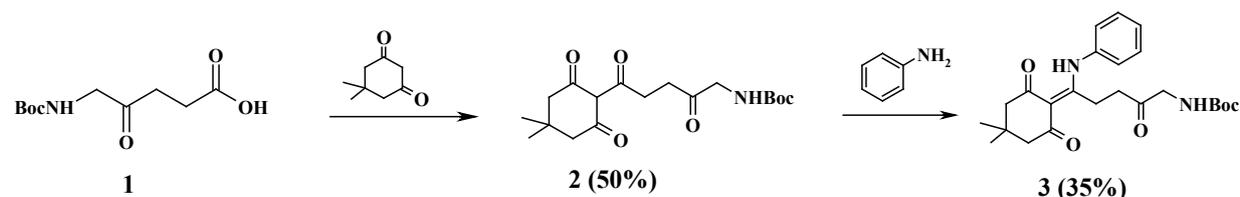
Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск

Поступило 06.08.2014

Введение. 5-Аминолевулиновая кислота (5-АЛК) играет важную роль в биохимических процессах животного и растительного мира, поскольку является основным субстратом в биосинтезе протопорфирина IX, гема и хлорофилла [1]. С начала 1990-х годов интерес к синтезу и исследованию биологических свойств 5-АЛК и ее производных неуклонно растет. Благодаря способности селективно накапливаться в раковых клетках в биопатогенной среде, 5-АЛК и ее метиловый и гексиловый эфиры нашли применение в медицине в качестве препаратов для фотодинамической диагностики и терапии злокачественных образований [2–4]. Попадая в клетки опухоли, 5-АЛК превращается в протопорфирин IX, который обладает свойствами фотосенсибилизатора и флуоресцирует красным светом при облучении видимым светом. Флуоресценция вызывает образование активных форм кислорода, которые разрушают опухолевые ткани. Однако низкая стабильность 5-АЛК в биологической среде и слабая проходимость через клеточные мембраны стимулировали широкие исследования по синтезу и изучению ее различных производных с целью преодоления этих недостатков [5; 6]. Наиболее значимые результаты были получены при применении эфиров 5-АЛК, для которых сопоставимый терапевтический эффект достигается в гораздо более низких концентрациях, чем для 5-АЛК. Другим перспективным направлением исследования и применения 5-АЛК является ее способность оказывать влияние на рост, развитие и урожайность ряда сельскохозяйственных культур [1].

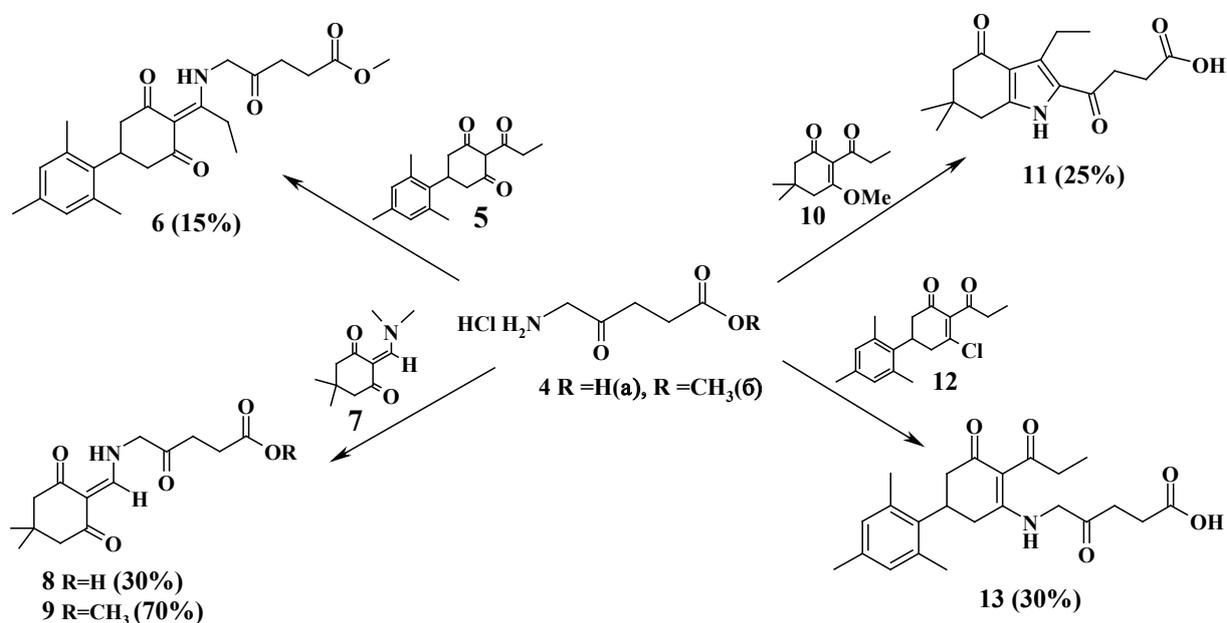
Циклогексановые β -трикетоны представляют собой широко распространенный в природе класс соединений, обладающих разнообразной биологической активностью [7]. Наличие полифункциональной β -трикетонной группировки открывает широкие синтетические возможности для их химической модификации и получения новых физиологически активных соединений [8]. Огромный скачок в исследованиях в этой области произошел после обнаружения среди 2-ацилциклогексан-1,3-дионов и их производных соединений с высокой гербицидной активностью, что позволило создать две группы гербицидных препаратов (циклогексеноксимы и бензоилциклогександионы), отвечающих современным требованиям экологической безопасности [9; 10]. В последнее десятилетие все больше работ посвящено использованию 2-ацилциклогексан-1,3-дионов в качестве защитных групп и УФ-маркеров аминокислот [11–13].

Результаты и их обсуждение. Мы исследовали возможность использования β -ди- и β -трикарбонильных соединений циклогексанового ряда для модификации аминогруппы и карбоксильной функции 5-АЛК с целью повышения ее липофильных свойств.



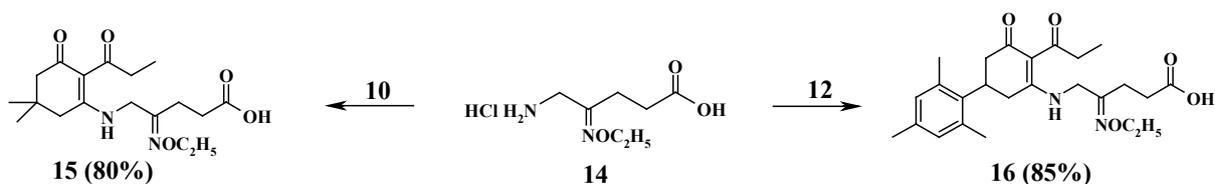
Для синтеза производных по карбоксильной функции аминогруппа 5-АЛК была предварительно Вос-защищена. Получение тетракетона (**2**) было осуществлено ацилированием димедона Вос-защищенной 5-АЛК (**1**) с использованием дициклогексилкарбодиимида в качестве активатора карбоксильной группы и диметиламинопиридина как катализатора. При взаимодействии соединения (**2**) с анилином с невысоким выходом был получен экзоциклический енаминодикетон (**3**).

По литературным данным, защита аминогруппы аминокислот 2-ацилциклогексан-1,3-дионами осуществляется их прямым взаимодействием, при этом образуются экзоциклические енаминодикетоны [11–13]. Енольные производные циклогексановых β -трикетонов (метиловые эфиры и хлорвинилдикетоны) обладают большей реакционной способностью и взаимодействуют с аминами по механизму винилового замещения, с образованием эндоциклических енаминодикетонов [8]. Однако мы не нашли в литературе сведений об исследовании подобных реакций с аминокислотами. В нашем случае при взаимодействии β -трикетона (**5**) с метиловым эфиром 5-АЛК (**4б**) в присутствии триэтиламина для связывания хлористого водорода с низким выходом был выделен экзоциклический енаминодикетон (**6**). Аналогичная реакция с самой 5-АЛК (**4а**) не дала положительного результата. Использование енаминодикетона (**7**) в реакции с 5-АЛК или ее метиловым эфиром оказалось гораздо более препаративным и целевые соединения (**8**), (**9**) были получены с выходом 30 и 70 % соответственно.



Нагревание метилового эфира (**10**) с триэтиламиновой солью 5-АЛК в метаноле привело к образованию тетрагидроиндолона (**11**). Аналогичная реакция соли 5-АЛК с хлорвинилдикетоном (**12**) при комнатной температуре дала енаминодикетон (**13**).

Весьма привлекательным, на наш взгляд, является повышение липофильности 5-АЛК за счет модификации ее кетогруппы, например, в О-алкильный эфир оксима. Любое вмешательство в структуру 5-АЛК неизбежно ставит вопросы селективности действия и метаболизма, а в предлагаемом нами случае – также и дополнительный вопрос о возможности трансформации в протопорфирин IX. Реакция гидрохлорида 5-АЛК с этоксиамином в метаноле привела к этоксиимину (**14**) с выходом 90 %.



Взаимодействие соединения (14) с метиловым эфиром (10) или хлорвинилдикетоном (12) в метаноле с использованием триэтиламина в качестве активатора аминогруппы протекает быстро (10 мин), давая енаминодикетоны (15), (16) с высоким выходом. Это свидетельствует о том, что этоксиимин (14) гораздо устойчивее в реакционной среде, чем 5-АЛК, и по своим химическим свойствам напоминает обычную аминокислоту. Структуры полученных соединений подтверждены данными ЯМР ^1H , ^{13}C , ИК, масс-спектров и элементного анализа.

Экспериментальная часть. Температуры плавления полученных соединений измерены на блоке Voetius. Спектры ЯМР ^1H (500 МГц) и ^{13}C (125,7 МГц) записаны на спектрометре Bruker Avance-500 с TMS в качестве внутреннего стандарта. ИК спектры сняты на приборе FT IR Bomem Michelson 100 для образцов в пленке или в таблетках KBr. Масс-спектры зарегистрированы на комплексе ВЭЖХ Accela с масс-детектором LCQ-Fleet (трехмерная ионная ловушка) в режиме химической ионизации при атмосферном давлении (APCI). Контроль протекания реакций и чистоты всех полученных соединений проводили методом ТСХ на пластинах Alufolien Kieselgel F₂₅₄ (Merck), пластины проявляли в УФ свете с последующим опрыскиванием раствором хлорного железа. Для хроматографии использовали силикагель Kieselgel 60 HF₂₅₄ TLC-стандарт (Merck) и Kieselgel 60 (Fluka).

1,1-Диметилэтил 5-(4,4-диметил-2,6-диоксоциклогексил)-2,5-диоксопентилкарбомат (2). К смеси 1,4 г (0,01 моль) димедона и 2,54 г (0,011 моль) кислоты (1) в 50 мл сухого хлористого метилена добавили при комнатной температуре и перемешивании 2,8 мл (0,02 моль) триэтиламина и 0,61 г (0,005 моль) 4-диметиламинопиридина. После того как реакционная смесь стала гомогенной, к ней прилили 10 мл 1,4 М раствора дициклогексилкарбодиимида и перемешивали 24 ч при комнатной температуре. Выпавший осадок отфильтровывали и промывали 2 × 50 мл хлористого метилена. Реакционную смесь экстрагировали 30 мл 1 М раствора соляной кислоты, промывали 2 × 20 мл воды, сушили безводным сульфатом магния, фильтровали и упаривали в вакууме на роторном испарителе. Из остатка методом колоночной хроматографии на силикагеле с последующей кристаллизацией из смеси этилацетат–петролейный эфир получили 1,77 г β-трикетона (2). Выход 50 %. Т. пл. 71–73 °С. ИК спектр, ν , см^{-1} : 1735сл, 1694 оч.с, 1671с (C=O сопр.), 1627 ср, 1605 ср, 1573 с (C=C сопр., C=O хелат.). Спектр ЯМР ^1H , CDCl_3 , δ , м. д.: 1,08с (6H, CH_3CCH_3), 1,45с (9H, t- C_4H_9), 2,35с и 2,53с (4H, CH_2CCH_2), 2,71т (2H, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COCH}_2$, J 6,0 Гц), 3,43т (2H, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COCH}_2$, J 6,0 Гц), 4,13д (2H, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COCH}_2$, J 4,5 Гц), 5,23уш.с (1H, NH), 17,47с (1H, OH). Спектр ЯМР ^{13}C , CDCl_3 , δ , м. д.: 28,21к, 28,21к, 28,33к ($\text{C}(\text{CH}_3)_3$), 30,84с, 33,33т, 35,55т, 45,87т, 50,29т, 52,36т, 79,90с, 112,05с, 155,55с, 195,13с, 195,60с, 203,89с, 204,58с. Найдено, %: С 61,09; Н 7,75; N 4,08. $\text{C}_{18}\text{H}_{27}\text{NO}_6$. Вычислено, %: С 61,17; Н 7,70; N 3,96. $[\text{MH}_2 - \text{OSOC}_4\text{H}_9]^+ = 254$.

1,1-Диметилэтил-5-(4,4-диметил-2,6-диоксоциклогексиден)-2-оксо-5-(фениламино)-пентилкарбомат (3). Раствор 0,71 г (2 ммоль) β-трикетона (2) и 0,38 мл (4 ммоль) анилина в 30 мл толуола кипятили с водоотделителем 3 ч. Тoluол удаляли в вакууме на роторном испарителе. Из остатка методом колоночной хроматографии на силикагеле получили 0,30 г маслообразного енаминодикетона (3). Выход 35 %. ИК спектр, ν , см^{-1} : 1730сл, 1695оч.с, 1645с (C=O сопр.), 1575оч.с (C=C сопр., C=O хелат.). Спектр ЯМР ^1H , CDCl_3 , δ , м. д.: 1,08с (6H, CH_3CCH_3), 1,42с (9H, $\text{C}(\text{CH}_3)_3$), 2,39с и 2,50с (4H, CH_2CCH_2), 2,65т (2H, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COCH}_2$, J 7,0 Гц), 3,11т (2H, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COCH}_2$, J 7,0 Гц), 4,98д (2H, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COCH}_2$, J 4,0 Гц), 5,21уш.с (1H, NH), 7,13д (2H, o- C_6H_5 , J 7,4 Гц), 7,36–7,45м (3H, m,p- C_6H_5), 15,00уш.с (1H, NH хел.). Спектр ЯМР ^{13}C , CDCl_3 , δ , м. д.: 25,37т, 28,40к ($\text{C}(\text{CH}_3)_2$), 28,40к ($\text{C}(\text{CH}_3)_3$), 30,22с, 38,04т, 39,96т, 52,36т, 53,72т, 79,88с, 110,55с, 126,23д, 128,44д, 129,80д, 136,13с, 155,68с, 174,75с, 196,53с, 200,57с, 203,65с. Найдено, %: С 67,33; Н 7,60; N 6,58. $\text{C}_{24}\text{H}_{32}\text{N}_2\text{O}_5$. Вычислено, %: С 67,27; Н 7,53; N 6,54.

2-Пропаноил-5-(2,4,6-триметилфенил)циклогексан-1,3-дион (5). Получен по методам, описанным в работах [14; 15]. Т. пл. 90–91 °С (петролейный эфир). ИК спектр, ν , см^{-1} : 1670с (C=O сопр.), 1565оч.с (C=O хел., C=C сопр.). Спектр ЯМР ^1H , CDCl_3 , δ , м. д.: 1,17т (3H, CH_3CCH_2 , J 7,2 Гц), 2,25с (3H, p- $\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_4$), 2,37с (6H, o-(CH_3)₂ C_6H_3), 2,57ддд (1H, 4 CH_A , J_1 16,5, J_2 4,0, J_3 2,0 Гц), 2,68ддд (1H, 6 CH_A , J_1 18,3, J_2 4,5, J_3 2,0 Гц), 3,07–3,15м (3H, CH_2CH_3 , 4 CH_B), 3,31дд (1H, 6 CH_B , J_1 18,3, J_2 13,5 Гц), 3,78м (1H, CH), 6,86с (2H, C_6H_2), 18,20с (1H, OH). Спектр ЯМР ^{13}C , CDCl_3 , δ , м. д.: 8,29к, 20,62к, 21,83к, 21,83к, 32,61д, 34,39т, 37,00т, 42,87т, 112,37с, 130,78д, 133,77с, 136,20с, 136,58с,

195,37с, 197,87с, 207,20с. Найдено, %: С 75,58; Н 7,75. $C_{18}H_{22}O_3$. Вычислено, %: С 75,50; Н 7,74. $[M]^{+} = 287$.

2-(Диметиламинометил)-5,5-диметилциклогексан-1,3-дион (7). Получен по методу [16]. Т. пл. 92–93 °С (бензол). Т. пл. лит. 92–94 °С.

5,5-Диметил-3-метокси-2-пропаноилциклогекс-2-ен-1-он (10). Получен по методу [17]. Т. пл. 104–105 °С (эфир). ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1710с (C=O), 1640с (C=O сопр.), 1605с, (C=C сопр.). Спектр ЯМР 1H , $CDCl_3$, δ , м. д.: 1,09т (3H, \underline{CH}_3CH_2 , J 7,3 Гц), 1,13с (6H, CH_3CCH_3), 2,25с и 2,44с (4H, CH_2CCH_2), 2,64к (2H, CH_3CH_2 , J 7,3 Гц), 3,80с (3H, CH_3O). Найдено, %: С 68,49; Н 8,75. $C_{12}H_{18}O_3$. Вычислено, %: С 68,55; Н 8,63. $[M]^{+} = 211$.

2-Пропаноил-5-(2,4,6-триметилфенил)-3-хлороциклогекс-2-ен-1-он (12). Получен по методу [18]. Т. пл. 118–119 °С (эфир). ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1715с (C=O), 1670с (C=O сопр.), 1620 (C=C сопр.). Спектр ЯМР 1H , $CDCl_3$, δ , м. д.: 1,17т (3H, \underline{CH}_3CH_2 , J 7,2 Гц), 2,25с (3H, $p-\underline{CH}_3C_6H_4$), 2,38с (6H, $o-(\underline{CH}_3)_2C_6H_4$), 2,54дд (1H, $4CH_A$, J_1 16,6, J_2 4,0 Гц), 2,68–2,74м (3H, \underline{CH}_2CH_3 , $4CH_B$), 3,12дд (1H, $6CH_A$, J_1 16,6, J_2 15,0 Гц), 3,35дд (1H, $6CH_B$, J_1 19,0, J_2 12,0 Гц), 3,90м (1H, CH), 6,86с (2H, C_6H_2).

Общая методика синтеза производных 5-АЛК. К смеси (1,3 ммоль) гидрохлоридов 5-АЛК (4а) или ее производных (4б), (14) и (1 ммоль) соответствующих реагентов (5), (7), (10), (12) в 10 мл метанола при комнатной температуре и перемешивании добавили 0,56 мл (4 ммоль) триэтиламина. Реакционную смесь перемешивали 8 ч при комнатной температуре, метанол удалили в вакууме на роторном испарителе. К остатку добавляли 30 мл хлороформа и экстрагировали 5 мл 1 М раствора соляной кислоты, промывали 10 мл воды, сушили безводным сульфатом магния, фильтровали и упаривали в вакууме на роторном испарителе. Из остатка методом колоночной хроматографии на силикагеле и последующей кристаллизацией из этилацетата получили производные 5-АЛК (6), (8), (9), (13), (15), (16).

Метил 5-((1-(2,6-диоксо-4-(2,4,6-триметилфенил)циклогексиден)пропил)амино)-4-оксопентаноат (6). Выделили 60 мг (15 %). Т. пл. 53–55 °С. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1735 оч. с (COOCH₃, C=O), 1638с (C=O сопр.), 1575 оч. с (C=C сопр.). Спектр ЯМР 1H , $CDCl_3$, δ , м. д.: 1,25т (2H, \underline{CH}_3CH_2 , J 7,5 Гц), 2,24с (3H, $4-\underline{CH}_3C_6H_4$), 2,37с (6H, $2,6-(\underline{CH}_3)_2C_6H_4$), 2,56м, 2,60м, 3,16м (4H, CH_2CCH_2), 2,76м (2H, \underline{CH}_2CH_3), 2,81т (2H, $CH_2CH_2COOCH_3$, J 7,3 Гц), 3,10т (2H, \underline{CH}_2CH_2CO OCH₃, J 7,3 Гц), 3,68с (3H, OCH₃), 3,76м (1H, CH), 4,45д (2H, NCH₂, J 4,5 Гц), 6,83с (2H, C_6H_2), 13,85с (1H, NH). Найдено, %: С 69,77; Н 7,60; N 3,28. $C_{24}H_{31}NO_5$. Вычислено, %: С 69,71; Н 7,56; N 3,39. $[M]^{+} = 414$.

5-(((4,4-Диметил-2,6-диоксоциклогексиден)метил)амино)-4-оксопентановая кислота (8). Выделили 85 мг (30 %). Т. пл. 186–189 °С. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 3210ср (NH), 1733с (COOH), 1720с (C=O), 1660с (C=O сопр.), 1596с (C=O хел.), 1569 оч. с (C=C сопр.). Спектр ЯМР 1H , DMSO- D_6 , δ , м. д.: 0,96с (6H, CH_3CCH_3), 2,24с и 2,30с (4H, CH_2CCH_2), 2,45т (2H, $CH_2CH_2COOCH_3$, J 6,5 Гц), 2,66т (2H, $\underline{CH}_2CH_2COOCH_3$, J 6,5 Гц), 4,48д (2H, $CH_2CH_2COCH_2$, J 6,0 Гц), 7,93д (1H, CH, J 14,5 Гц), 10,82м (1H, NH). Спектр ЯМР ^{13}C , DMSO- D_6 , δ , м. д.: 27,37т, 28,02к, 30,65с, 34,18т, 50,55т, 50,85т, 57,05т, 106,97с, 158,68д, 173,49с, 194,55с, 197,54с, 203,89с. Найдено, %: С 59,75; Н 6,85; N 5,03. $C_{14}H_{19}NO_5$. Вычислено, %: С 59,78; Н 6,81; N 4,98. $[M]^{+} = 282$.

Метил 5-(((4,4-диметил-2,6-диоксоциклогексиден)метил)амино)-4-оксопентаноат (9). Выделили 210 мг (70 %). Т. пл. 140–141 °С. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 3195ср (NH), 1733с (COOCH₃, C=O), 1667с (C=O сопр.), 1585оч.с (C=O хел., C=C сопр.). Спектр ЯМР 1H , $CDCl_3$, δ , м. д.: 1,05с (6H, CH_3CCH_3), 2,34с и 2,39с (4H, CH_2CCH_2), 2,69–2,75м (4H, $CH_2CH_2COOCH_3$), 3,69с (3H, OCH₃), 4,36д (2H, NCH₂, J 5,8 Гц), 7,98д (1H, CH, J 14,0 Гц), 11,20м (1H, NH). Спектр ЯМР ^{13}C , $CDCl_3$, δ , м. д.: 27,79т, 28,55к, 31,10с, 34,37т, 51,15т, 51,46т, 52,09к, 57,82т, 108,34с, 158,56д, 172,71с, 196,28с, 199,30с, 201,58с. Найдено, %: С 61,06; Н 7,22; N 4,35. $C_{15}H_{21}NO_5$. Вычислено, %: С 61,00; Н 7,17; N 4,74. $[M]^{+} = 296$.

4-(3-Этил-6,6-диметил-4-оксо-4,5,6,7-тетрагидро-1H-индол-2-ил)-4-оксобутановая кислота (11). Реакцию проводили по вышеприведенной методике при кипячении реакционной смеси в течение 8 ч. Выделили 75 мг (25 %). Т. пл. 183–186 °С. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1712с (COOH), 1674с (C=O сопр.), 1656с (C=O сопр.), 1626оч. с, 1573сл. Спектр ЯМР 1H , DMSO- D_6 , δ , м. д.: 1,01с (6H, CH_3CCH_3), 1,08т (3H, \underline{CH}_3CH_2 , J 7,3 Гц), 2,25с и 2,66с (4H, CH_2CCH_2), 2,55т (2H, CH_2CH_2CO-

OCH₃, *J* 6,5 Гц), 2,99–3,05м (4Н, CH₂CH₂CO, CH₃CH₂), 11,87уш.с (1Н, NH). Спектр ЯМР ¹³C, DM-SO-D₆, δ, м. д.: 15,08к, 18,45т, 27,52т, 27,94к, 34,02с, 34,66т, 35,93т, 52,60т, 117,27с, 127,82с, 132,74с, 145,71с, 173,86с, 188,97с, 193,77с. Найдено, %: С 65,89; Н 7,30; N 4,90. C₁₆H₂₁NO₄. Вычислено, %: С 65,96; Н 7,27; N 4,81. [МН]⁺ = 292.

4-Оксо-5-((3-оксо-2-пропаноил-5-(2,4,6-триметилфенил)циклогекс-1-ен-1-ил)амино)пентановая кислота (13). Выделили 120 мг (30 %). Т. пл. 107–109 °С. ИК спектр, ν, см⁻¹: 1731с (СООН, С=О), 1640с (С=О сопр.), 1591с (С=О хел.), 1558оч. с (С=С сопр.). Спектр ЯМР ¹H, CDCl₃, δ, м. д.: 1,09т (3Н, CH₃CH₂, *J* 7,0 Гц), 2,24с (3Н, *p*-CH₃C₆H₂), 2,35с (6Н, *o*-(CH₃)₂C₆H₂), 2,54м, 2,68м (6Н, CH₂CHCH₂, CH₂COOH), 2,94–3,11м (4Н, CH₂CH₃, CH₂CH₂COOH), 3,69м (1Н, СН), 4,26д (2Н, NCH₂, *J* 4,5 Гц), 6,84с (2Н, C₆H₂), 12,82т (1Н, NH, *J* 4,5 Гц). Спектр ЯМР ¹³C, CDCl₃, δ, м. д.: 8,96к, 20,61к, 21,87к, 27,69т, 33,20д, 33,66т, 34,25т, 36,98т, 42,18т, 52,64т, 108,90с, 130,77д, 134,23с, 136,46с, 136,59с, 172,90с, 175,87с, 195,55с, 201,29с, 204,89с. Найдено, %: С 69,21; Н 7,30; N 3,60. C₂₃H₂₉NO₅. Вычислено, %: С 69,15; Н 7,32; N 3,51. [МН]⁺ = 400.

5-Амино-4-((этоксимино)пентановая кислота гидрохлорид (14). К раствору 1,68 г (0,01 моль) гидрохлорида 5-АЛК (1) в 25 мл метанола добавили при комнатной температуре и перемешивании 0,75 мл (0,012 моль) этоксиамина. Через 12 ч растворитель удаляли в вакууме на роторном испарителе. Остаток кристаллизовали из ацетона. Получили 1,9 г (90 %) этоксииминопроизводного (14) в виде смеси син-анти изомеров 1 : 4. Т. пл. 108–121 °С. ИК спектр, ν, см⁻¹: 3190с, 3040с, 1710с (СООН), 1636ср, 1602сл. Спектр ЯМР ¹H, D₂O, δ, м. д.: 1,24т (3Н, CH₃CH₂O, *J* 7,0 Гц), 2,58–2,66м (4Н, CH₂CH₂), 3,82с и 3,85с (2Н(1 : 4), NCH₂), 4,14к (2Н, CH₃CH₂O, *J* 7,0 Гц). Спектр ЯМР ¹³C, D₂O, δ, м. д.: (основной изомер)- 16,63к, 25,81т, 32,83т, 43,89т, 73,18т, 155,61с, 180,33с. (минорный изомер)- 16,77к, 31,26т, 33,34т, 39,84т, 73,18т, 155,50с, 180,45с.

5-((5,5-Диметил-3-оксо-2-пропаноилциклогекс-1-ен-1-ил)амино)-4-((этоксимино)пентановая кислота (15). Получили 282 мг (80 %). Т. пл. 81–84 °С. ИК спектр, ν, см⁻¹: 1730с, 1715с (СООН), 1640с (С=О сопр.), 1590оч. с (С=О хел.), 1565оч. с (С=С сопр.). Спектр ЯМР ¹H, CDCl₃, δ, м. д.: (смесь син-анти изомеров 1 : 1) 1,04с и 1,05с (6Н, CH₃CCH₃), 1,07т (3Н, CH₃CH₂, *J* 7,3 Гц), 1,25т и 1,27т (3Н, CH₃CH₂O, *J* 7,0 Гц), 2,29с, 2,41с и 2,50с (4Н, CH₂CCH₂), 2,50–2,56м (2Н, CH₂CH₂COOH), 2,65–2,72м (2Н, CH₂CH₂COOH), 2,98–3,04м (2Н, CH₃CH₂), 4,11–4,15м (2Н, CH₃CH₂O), 4,16д и 4,26д (2Н, NHCH₂, *J* 6,0 Гц), 11,82уш.с и 11,90уш.с (1Н, NH). Спектр ЯМР ¹³C, CDCl₃, δ, м. д.: 8,95к, 9,03к, 14,64к, 22,59т, 26,31т, 28,24к, 29,62т, 29,84т, 30,65с, 36,92т, 40,09т, 40,32т, 40,51т, 46,83т, 51,94т, 69,95т, 69,98т, 108,16с, 108,18с, 152,31с, 152,92с, 172,61с, 176,92с, 194,86с, 194,94с, 204,47с, 204,66с. Найдено, %: С 61,31; Н 8,12; N 8,03. C₁₈H₂₈NO₅. Вычислено, %: С 61,34; Н 8,01; N 7,95. [МН]⁺ = 353.

5-((3-Оксо-2-пропаноил-5-(2,4,6-триметилфенил)циклогекс-1-ен-1-ил)амино)-4-((этоксимино)пентановая кислота (16). Получили 376 мг (85 %). Т. пл. 116–120 °С. ИК спектр, ν, см⁻¹: 1720с (СООН), 1636с (С=О сопр.), 1592оч. с (С=О хел.), 1565оч. с (С=С сопр.). Спектр ЯМР ¹H, CDCl₃, δ, м. д.: (смесь син-анти изомеров 2 : 1) 1,10т (3Н, CH₃CH₂, *J* 7,0 Гц), 1,06т и 1,22т (3Н, CH₃CH₂O, *J* 7,0 Гц), 2,25с (3Н, *p*-CH₃C₆H₂), 2,35с (6Н, *o*-(CH₃)₂C₆H₂), 2,49–2,56м (3Н, 4CH_A, CH₂COOH), 2,63–2,68м (2Н, CH₂CH₂COOH), 2,73уш.д и 2,84уш.д. (1Н, 6CH_A, *J* 17,0 Гц), 2,95–3,12м (4Н, CH₃CH₂, 4CH_B, 6CH_B), 3,67м (1Н, СН), 4,00к и 4,09к (2Н, CH₃CH₂O, *J* 7,0 Гц), 4,12м и 4,22м (2Н, NHCH₂), 6,85с (2Н, C₆H₂), 12,78уш.с и 12,88уш.с (1Н, NH). Спектр ЯМР ¹³C, CDCl₃, δ, м. д.: 9,00к, 9,08к, 14,26к, 14,55к, 20,61к, 21,89к, 22,74т, 26,49т, 29,60т, 29,74т, 31,01т, 31,19т, 33,24д, 33,27д, 36,94т, 40,73т, 42,34т, 46,80т, 69,97т, 70,03т, 108,76с, 130,84д, 134,26с, 136,40с, 136,30с, 136,38с, 136,50с, 151,90с, 152,62с, 173,41с, 173,52с, 176,56с, 176,74с, 195,44с, 204,88с, 205,07с. Найдено, %: С 67,89; Н 7,70; N 6,41. C₂₅H₃₄N₂O₅. Вычислено, %: С 67,85; Н 7,74; N 6,33. [МН]⁺ = 443.

Литература

1. Тростянюк И. В., Долгопалец В. И., Кисель М. А., Лахвич Ф. А. // Весці НАН Беларусі. Сер. хім. навук. 2009. № 1. С. 77–82.
2. Barbara K., Kristjan P. // Photochem. Photobiology Sci. 2008. Vol. 7, N 3. P. 282–289.
3. Casas A. et al. // J. Contr. Rel. 2009. Vol. 135. P. 136–143.
4. Johnson R. P. et al. // Inter. J. Nanomed. 2012. Vol. 7. P. 2497–2512.

5. Fotinos N., Campo M. A., Popowycz F. et al. // Photochem. Photobiol. 2006. Vol. 82. P. 994–1015.
6. Juzeniene A., Juzenas P., Moan J. // Methods Mol. Biol. 2010. Vol. 635. P. 97–106.
7. Рубинов Д. Б., Рубинова И. Л., Ахрем А. А. // Хим. природ. соед. 1995. Vol. 5. P. 635–663.
8. Rubinov D. B., Rubinova I. L., Akhrem A. A. // Chem. Rev. 1999. Vol. 99. P. 1047–1065.
9. Beaudegnies R. et al. // Bioorg. Med. Chem. 2009. Vol. 17. P. 4134–4152.
10. Лахвич Ф. А., Рубинов Д. Б., Рубинова И. Л. // Земледелие и защита растений. 2006. № 4 (47). С. 33–35.
11. Middleton R. J. et al. // Tetrahedron Lett. 2004. Vol. 45. P. 1237–1242.
12. Song H. et al. // ACS Comb. Sci. 2012. Vol. 14. P. 66–74.
13. Wernich S. et al. // Anal Bioanal Chem. 2013, DOI 10.1007/s00216-013-6932-z.
14. Watson K. G. // Chem. Austr. 1988. Vol. 55, N 6. P. 193–195.
15. Пат. AU 556148 Австралии, МКИ А01N47/40 (С.А. 1987, Vol. 107, 58649n).
16. Schenone P., Mosti L., Menozzi G. J. // J. Heterocycl. Chem. 1982. Vol. 19. P. 645.
17. Лахвич Ф. А., Лис Л. Г., Рубинов Д. Б., Борисов Е. В. // ЖОрХ. 1988. Т. 24, № 4. С. 755–759.
18. Tamura T. et al. // Chem. Pharm. Bull. 1981. Vol. 29, N 11. P. 3232–3237.

M. V. KHLEBUS, D. B. RUBINOV, M. G. GRIBOVSKY, F. A. LAKHVICH

rubinov@iboch.bas-net.by

SYNTHESIS OF 5-AMINOLEVULINIC ACID DERIVATIVES WITH CYCLOHEXANE β -DI- AND β -TRIKETONES

Summary

A number of new methods for modification of carboxyl, carbonyl, amino groups of 5-aminolevulinic acid using β -di- and β -tricarboxyl cyclohexane compounds, aimed to increase their lipophilicity, have been proposed. The obtained compounds are perspective as substances for research in the field of photodynamic diagnostics and therapy of cancer.

УДК 577.15:581.1

А. А. ВАЙНЕР¹, Ю. Е. КОЛУПАЕВ¹, Т. О. ЯСТРЕБ¹, член-корреспондент В. А. ХРИПАЧ²**ИНДУЦИРОВАНИЕ СОЛЕУСТОЙЧИВОСТИ 24-ЭПИБРАССИНОЛИДОМ
ПРОРОСТКОВ ПРОСА (*PANICUM MILIACEUM*)
С УЧАСТИЕМ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА**¹Харьковский национальный аграрный университет им. В. В. Докучаева, Украина²Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск

Поступило 19.05.2014

Брассиностероиды (БС) в настоящее время рассматриваются как фитогормоны, задействованные в адаптации растений к стресс-факторам различной природы, в т. ч. к засолению [1; 2]. Установлено, что растения арабидопсиса *det2*, отличающиеся пониженным эндогенным содержанием БС, характеризуются более высокой чувствительностью к действию засоления по сравнению с растениями дикого типа [3]. На крестоцветных, бобовых и злаковых зарегистрировано положительное влияние экзогенных БС на солеустойчивость [4–6]. В ряде работ показано повышение активности супероксиддисмутазы (СОД), каталазы, гваяколпероксидазы и других антиоксидантных ферментов при индуцировании БС устойчивости растений к засолению [6; 7]. При этом, однако, отмечается наличие видовых и сортовых различий в реакции растений на БС [6].

В последние годы получен значительный объем сведений о механизмах передачи сигнала БС в генетический аппарат растительных клеток, установлена природа рецептора БС, который является рецепторной киназой BRI1, содержащей лигандный, трансмембранный и протеинкиназный домены [8]. Присоединение БС к внеклеточной области рецептора BRI1 вызывает авто- и трансфосфорилирование BRI1, а затем процессы фосфорилирования и дефосфорилирования ряда других специфических белков. В конечном итоге активируются транскрипт-факторы BZR1 и BES1, вследствие чего усиливается экспрессия генов-мишеней [8].

Помимо специфических белков в трансдукции сигнала БС, очевидно, задействованы сигнальные посредники небелковой природы, в частности, активные формы кислорода (АФК). Так, на растениях огурца показана способность БС усиливать генерацию АФК – супероксидного анион-радикала и пероксида водорода [9]. Этот эффект подавлялся ингибитором НАДФН-оксидазы дифенилениодониумом. Обработка растений огурца 24-эпибрассинолидом (24-ЭБЛ) вызывала комплекс реакций, обуславливающих повышение устойчивости к абиотическим стрессорам (действию параквата и холода) [9], а также системной устойчивости к фузариозу [10]. Такие эффекты были связаны с зависимым от АФК усилением экспрессии целого ряда защитных генов, в т. ч. генов антиоксидантных ферментов.

Менее исследованы механизмы индуцирования БС защитных реакций у однодольных. На листьях кукурузы показано, что БС вызывал накопление транскриптов и повышение активности НАДФН-оксидазы [11]. АФК, генерируемые НАДФН-оксидазой, были необходимы как сигнал для повышения активности антиоксидантных ферментов. Однако связь этих реакций с формированием устойчивости растений к конкретным стресс-факторам в указанной работе не изучалась.

Цель работы – выяснить участие АФК в процессе индуцирования эпибрассинолидом солеустойчивости растений проса (*Panicum miliaceum* L.) на ранних фазах развития. Выбор проса как объекта исследования был обусловлен тем, что оно относится к числу немногих культурных растений, на которых стресс-протекторные эффекты БС до сих пор не исследовались.

Материалы и методы исследования. В работе использовали растения проса сорта Константиновское. Семена обеззараживали путем 30-минутной обработки 3 %-ным пероксидом водоро-

да и проращивали в чашках Петри с добавлением дистиллированной воды в течение 4 сут. Затем проростки переносили в пластиковые кюветы, размещая их на завернутых в марлю стеклянных пластинах. Растения выращивали на очищенной водопроводной воде при 12-часовом световом периоде и освещенности 5 клк, температура воздуха 25 ± 1 °С (днем) и 20 ± 1 °С (ночью). На 9-е сутки в кюветы опытных вариантов добавляли эффекторы: 24-ЭБЛ в конечной концентрации 10 нМ, антиоксидант диметилтиомочевину (ДМТМ – 300 мкМ), ингибитор НАДФН-оксидазы имидазол (60 мкМ). Время инкубации растений на растворе 24-ЭБЛ – 24 ч. В соответствующих вариантах опытов проростки инкубировали 27 ч на растворах ДМТМ или имидазола. В вариантах с комбинированным действием ДМТМ или имидазол вносили в среду инкубации за 3 ч до введения в нее 24-ЭБЛ. Эффективные концентрации исследуемых соединений были выбраны на основании предварительных опытов.

После обработки эффекторами часть 10-дневных растений подвергали потенциально летальному солевому стрессу путем 7-часовой инкубации на 500 мкМ растворе NaCl, после завершения которой проростки переносили на очищенную водопроводную воду. Выживание растений оценивали через 4 сут. после стрессового воздействия.

Содержание пероксида водорода определяли ферроцианидным методом, экстрагируя его из растертых на холоде листьев 5 %-ным ТХУ [12].

Для определения активности антиоксидантных ферментов навески листьев гомогенизировали на холоде в 0,15 М К,Na-фосфатном буфере (рН 7,6) с добавлением ЭДТА (0,1 мМ), дитиотреитола (1 мМ), фенолметилсульфонилфторида (0,5 мМ) и детергента Тритона X-100 (конечная концентрация 0,1 %). Для анализа использовали супернатант после центрифугирования гомогената при 8000 g в течение 10 мин при 4 °С. Условия определения активности СОД (КФ 1.15.1.1), каталазы (КФ 1.11.1.6), гваяколпероксидазы (КФ 1.11.1.7) подробно описаны ранее [13]. Белок определяли по Бредфорд.

На рисунках приведены средние значения трех независимых опытов и их стандартные отклонения.

Результаты и их обсуждение. Обработка проростков проса 24-ЭБЛ существенно повышала их выживание после потенциально летального действия NaCl (рис. 1).

Под влиянием 24-ЭБЛ в листьях происходило транзитное увеличение содержания пероксида водорода с максимумом через 7 ч (рис. 2). К моменту окончания инкубации проростков на растворе 24-ЭБЛ (24 ч) содержание H_2O_2 в листьях снижалось до уровня контроля.

Если допустить, что пероксид водорода задействован в передаче сигнала экзогенного 24-ЭБЛ в генетический аппарат клетки и индуцировании защитных реакций, то антиоксиданты и инги-

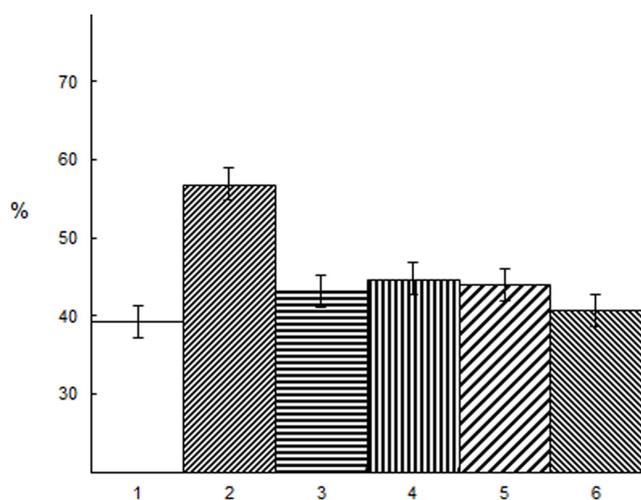


Рис. 1. Выживание (%) проростков проса после 7-часового воздействия 500 мкМ NaCl. Здесь и на рис. 3: 1 – контроль; 2 – 24-ЭБЛ (10 нМ); 3 – ДМТМ (300 мкМ) 4 – имидазол (60 мкМ); 5 – 24-ЭБЛ (10 нМ) + ДМТМ (300 мкМ); 6 – 24-ЭБЛ (10 нМ) + имидазол (60 мкМ)

биторы ферментов, участвующих в генерации АФК, должны препятствовать вызываемому БС развитию солеустойчивости проростков проса. Обработка растений ДМТМ сама по себе немного снижала содержание пероксида водорода в листьях и нивелировала его повышение, вызываемое 24-ЭБЛ (рис. 3). Известно, что одним из основных ферментов, обеспечивающих генерацию АФК на поверхности растительных клеток, является НАДФН-оксидаза [14]. Супероксидный анион-радикал, образуемый этим ферментом, спонтанно или под влиянием СОД превращается в пероксид водорода, который способен проникать в цитоплазму. Кроме того, возможно прохождение супероксидного анион-радикала в протонированном виде через плазмалемму в цитозоль и превращение его в пероксид водорода

внутриклеточными формами СОД [15]. В наших экспериментах обработка проростков ингибитором НАДФН-оксидазы имидазолом снижала содержание пероксида водорода в листьях и частично нивелировала повышение его количества, вызываемое 24-ЭБЛ (рис. 3).

Антиоксидант ДМТМ и ингибитор НАДФН-оксидазы имидазол сами по себе существенно не влияли на солеустойчивость проростков проса (рис. 1). В то же время оба эффиктора достоверно уменьшали положительное действие 24-ЭБЛ на выживание проростков после действия солевого стресса.

Одной из стресс-протекторных систем, индуцируемых БС и обеспечивающих повышение солеустойчивости проростков, может быть антиоксидантная. Обработка 24-ЭБЛ повышала активность СОД, солевой стресс сам по себе вызывал ее снижение (таблица). При этом 24-ЭБЛ устранял ингибирование активности фермента, вызываемое действием хлорида натрия. Предобработка проростков ДМТМ или имидазолом нивелировала повышение активности СОД, вызываемое БС как в варианте без стрессового воздействия, так и на фоне солевого стресса.

Активность каталазы в варианте с обработкой 24-ЭБЛ также повышалась. Засоление слабо влияло на активность фермента. Однако в варианте с предобработкой 24-ЭБЛ и последующим солевым стрессом активность каталазы была заметно выше (таблица). ДМТМ и имидазол частично снимали эффект повышения активности этого фермента, вызываемый действием 24-ЭБЛ.

Активность другого фермента, участвующего в обезвреживании пероксида водорода – гваяколпероксидазы, увеличивалась в листьях проса как под влиянием предобработки фитогормоном, так и при действии NaCl. Наиболее существенное увеличение активности гваяколпероксидазы наблюдалось в варианте с комбинированным влиянием засоления и 24-ЭБЛ (таблица). При этом антиоксидант и ингибитор НАДФН-оксидазы устраняли вызываемое 24-ЭБЛ повышение активности фермента в варианте без стрессового воздействия и в условиях действия на растения хлорида натрия.

Таким образом, есть основания полагать, что индуцирование солеустойчивости проса экзогенным БС опосредовано усилением генерации АФК, связанным с повышением активности НАДФН-оксидазы. Об этом свидетельствует устранение положительного влияния 24-ЭБЛ на солеустойчивость растений и активность ключевых антиоксидантных ферментов действием антиоксиданта ДМТМ и ингибитора НАДФН-оксидазы имидазола. Ранее снятие антиоксидантами вызываемого БС эффекта повышения устойчивости к гипотермии и агенту окислительного стресса параквату было показано на растениях огурца [9]. Полученные нами результаты позволяют полагать, что формирование сигнала БС, индуцирующего развитие устойчивости расте-

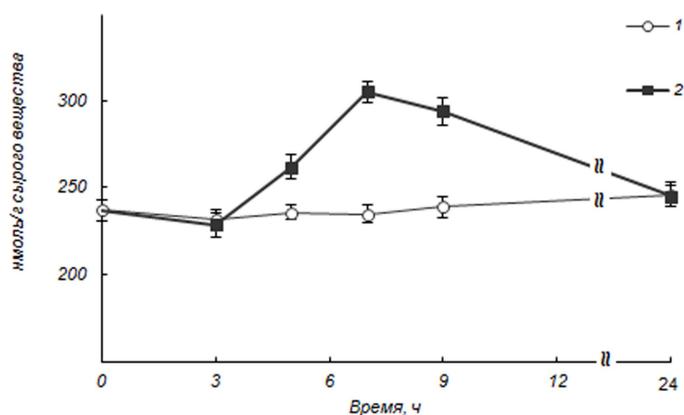


Рис. 2. Динамика содержания пероксида водорода (нмоль/г сырого вещества) в листьях при обработке проростков проса 24-ЭБЛ: 1 – контроль; 2 – 24-ЭБЛ (10 нМ)

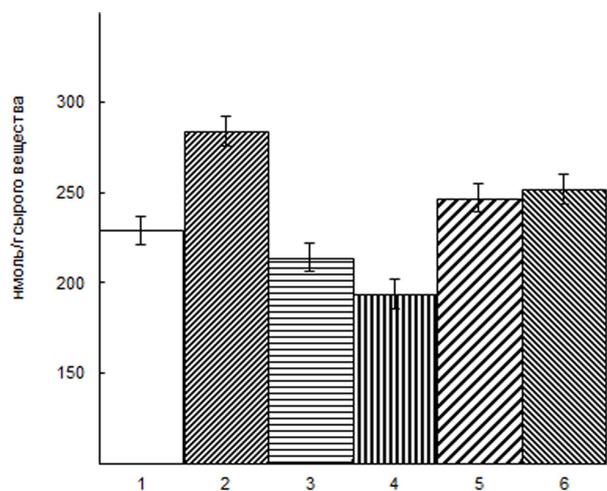


Рис. 3. Содержание пероксида водорода (нмоль/г сырого вещества) в листьях проростков проса при их обработке 24-ЭБЛ и (или) другими эффекторами. Обозначения см. на рис. 1

Активность антиоксидантных ферментов в листьях проса

Вариант опыта	СОД, усл. ед/(мг белка · мин)	Каталаза, мкмоль Н ₂ О ₂ /(мг белка · мин)	Пероксидаза, усл. ед/(мг белка · мин)
Контроль	3,62 ± 0,11	274 ± 6	5,14 ± 0,07
24-ЭБЛ (10 нМ)	4,24 ± 0,13	323 ± 7	5,59 ± 0,10
24-ЭБЛ (10 нМ) + ДМТМ (300 мкМ)	3,71 ± 0,09	301 ± 7	5,23 ± 0,08
24-ЭБЛ (10 нМ) + имидазол (60 мкМ)	3,73 ± 0,11	288 ± 9	5,08 ± 0,10
NaCl (500 мМ)	2,66 ± 0,10	265 ± 11	5,83 ± 0,11
24-ЭБЛ (10 нМ) + NaCl (500 мМ)	3,42 ± 0,12	326 ± 8	6,32 ± 0,09
24-ЭБЛ (10 нМ) + NaCl (500 мМ) + ДМТМ (300 мкМ)	2,88 ± 0,14	290 ± 8	5,87 ± 0,08
24-ЭБЛ (10 нМ) + NaCl (500 мМ) + имидазол (60 мкМ)	2,96 ± 0,11	292 ± 7	5,78 ± 0,10

ний проса к солевому стрессу, по-видимому, происходит с участием АФК, образующихся за счет повышения активности НАДФН-оксидазы. Естественно, при этом нельзя полностью исключить вклад других ферментных систем, в частности, внеклеточных форм пероксидазы в генерацию АФК [15]. Однако, судя по данным ингибиторного анализа, роль НАДФН-оксидазы в этих процессах может быть ведущей.

Литература

1. Khripach V., Zhabinskii V., De Groot A. // Ann. Bot. 2000. Vol. 86. P. 441–447.
2. Divi U. K., Rahman T., Krishna P. // BMC Plant Biology. 2010. Vol. 10; doi: 10.1186/1471-2229-10-151.
3. Zeng H. Tang Qi, Hua X. // J. Plant Growth Regul. 2010. Vol. 29. P. 44–52.
4. Ali B., Hayat S., Fariduddin Q., Ahmad A. // Chemosphere. 2008. Vol. 72. P. 1387–1392.
5. Shahid M. A., Pervez M. A., Balal R. M. et al. // Austr. J. Crop Sci. 2011. Vol. 5. P. 500–510.
6. Talaat N. B., Shawkly B. T. // Acta Physiol. Plant. 2013. Vol. 35. P. 729–740.
7. Fariduddin Q., Khalil R. R., Mir B. A. et al. // Environ. Monit. Assess. 2013. Vol. 185. P. 7845–7856.
8. Gruszka D. // Int. J. Mol. Sci. 2013. Vol. 14. P. 8740–8774.
9. Xia X. J., Wang Y. J., Zhou Y. H. et al. // Plant Physiol. 2009. Vol. 150. P. 801–814.
10. Xia X. J., Zhou Y. H., Ding J. et al. // New Phytol. 2011. Vol. 191. P. 706–720.
11. Zhang A., Zhang J., Ye N. et al. // J. Exp. Bot. 2010. Vol. 61. P. 4399–4411.
12. Sagisaka S. // Plant Physiol. 1976. Vol. 57. P. 308–309.
13. Karpets Yu. V., Kolupaev Yu. E., Lugovaya A. A., Oboznyi A. I. // Rus. J. Plant Physiol. 2014. Vol. 61. P. 339–346.
14. Sagi M., Fluhr R. // Plant Physiol. 2006. Vol. 141. P. 336–340.
15. Kolupaev Yu. E., Karpets Yu. V. // Handbook on Reactive Oxygen Species (ROS): Formation Mechanisms, Physiological Roles and Common Harmful Effects / ed. M. Suzuki, S. Yamamoto. NY, 2013. P. 109–136.

A. A. VAYNER, Yu. E. KOLUPAEV, T. O. YASTREB, V. A. KHRIPACH

plant_biology@mail.ru, khripach@iboch.bas-net.by

24-EPIBRASSINOLIDE INDUCES SALT TOLERANCE OF MILLET (*PANICUM MILIACEUM*) SEEDLINGS INVOLVING REACTIVE OXYGEN SPECIES

Summary

The treatment of millet seedlings with 24-epibrassinolide (24-EBL) was shown to cause a transient increase in their hydrogen peroxide content, the subsequent activation of antioxidant enzymes (superoxide dismutase, catalase, guaiacol peroxidase) and the development of their resistance to salt stress. Antioxidant dimethylthiourea and NADPH oxidase inhibitor imidazole leveled these processes. It was concluded that the induction of millet salt tolerance by exogenous 24-EBL was mediated by the enhancement of reactive oxygen species level associated with the increased activity of NADPH oxidase.

БИОЛОГИЯ

УДК 577.15+579.22

Л. И. САПУНОВА¹, А. А. КОСТЕНЕВИЧ¹, академик А. Г. ЛОБАНОК¹, И. О. ТАМКОВИЧ¹,
С. А. КУЛИШ¹, Д. П. БАЖАНОВ², К. К. ЯЦЕВИЧ²

ФЕРМЕНТАТИВНАЯ АКТИВНОСТЬ БАКТЕРИЙ РОДА *ARTHROBACTER*
И ИХ ГЕНОТИПИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ¹Институт микробиологии НАН Беларуси, Минск²Институт генетики и цитологии НАН Беларуси, Минск

Поступило 04.08.2014

Введение. Бактерии рода *Arthrobacter* представляют собой гетерогенную группу преимущественно сапрофитных аэробных грамположительных бактерий, утилизирующих разнообразные соединения неорганической и органической природы. Отдельные представители этого рода прокарриот являются коммерческими продуцентами биологически активных веществ, включая ферменты [1; 2]. Однако для большинства бактерий рода *Arthrobacter* характерен невысокий уровень синтеза вне- или внутриклеточных ферментов, участвующих в превращении природных органических соединений [3–13].

Ранее нами среди культур, предварительно идентифицированных как *Arthrobacter species*, были отобраны и селективированы штаммы – высокоактивные продуценты глюкозоизомеразы [14] и β-галактозидазы [15]. Показана возможность использования штамма *Arthrobacter sp.*, продуцирующего β-галактозидазу трансгалактозилирующего действия, для получения кормовой добавки пребиотического действия из цельного или обезжиренного молока и отходов его переработки. Эффективность получаемого кормового продукта может быть повышена путем ферментативного гидролиза жиров, казеина и других белков, содержащихся в указанных субстратах и вызывающих у животных диспепсию и аллергические реакции. Существенное улучшение функциональных свойств кормовой добавки, кроме того, возможно за счет дополнения ферментного комплекса штамма-продуцента глюкозо(ксилозо)изомеразой: совместно с β-галактозидазой фермент в среде с лактозой катализирует синтез лактулозы – олигосахарида пребиотического действия.

Цель исследования – характеристика комплекса продуцируемых бактериями рода *Arthrobacter* ферментов, участвующих в превращении входящих в состав молока ингредиентов – белков, жиров и углеводов.

Материалы и методы исследования. Объектами исследования явились культуры бактерий рода *Arthrobacter* из Белорусской коллекции непатогенных микроорганизмов и коллекции лаборатории ферментов Института микробиологии НАН Беларуси.

Скрининг продуцируемых бактериями ферментов, участвующих в гидролизе лактозы, казеина и липидов, проводили в два этапа. На первом из них использовали чашечный метод, который предусматривает выращивание бактерий при 26–28 °С в течение 72 ч на пептонно-дрожжевом агаре (в %: пептон – 1,0; дрожжевой экстракт – 0,5; K₂HPO₄ – 0,3; MgSO₄·7H₂O – 0,1; агар-агар – 2,0; pH 6,8), содержащем субстраты исследуемых ферментов в количестве 1,0 %. Для индукции синтеза β-галактозидазы в среду культивирования бактерий вводили лактозу, протеазы – казеинат натрия, липазы – глицерилтрибутират (трибутирин), α-амилазы – крахмал, глюкозо(ксилозо)изомеразы – D-ксилозу.

Активность липолитических, протеолитических и амилолитических ферментов обнаруживали по зонам просветления, которые образуются вокруг колоний исследуемых культур в результате ферментативного гидролиза специфических субстратов. Колонии синтезирующих β -галактозидазу бактерий в присутствии индикатора 5-бром-4-хлор-3-индолил- β -D-галактозида (40 мМ) приобретали синий цвет, характерный для продукта его ферментативного гидролиза – 5-бром-4-хлориндиго. Колонии культур, продуцирующих глюкозо(ксилозо)изомеразу, становились темно-розового цвета вследствие окисления D-ксилозой – продуктом ферментативной изомеризации D-ксилозы – бесцветного хлорида 2,3,5-трифенилтетразолия с образованием окрашенного в соответствующий цвет формазана.

На втором этапе проводили количественную оценку эффективности синтеза ферментов исследуемыми культурами в условиях глубинного культивирования в колбах Эрленмейера объемом 250 мл, содержащих 50 мл питательной среды, на качалке (180–200 об/мин) при 28–30 °С в течение 3 сут.

Питательная среда для глубинного выращивания бактерий включала (в %): пептон – 1,0; дрожжевой экстракт – 0,5; K_2HPO_4 – 0,3; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,1; исходный pH – 6,8. В качестве источника углеводного питания (1,0 % по весу) и индуктора синтеза β -галактозидазы использовали лактозу, липазы – оливковое масло, протеазы – казеинат натрия, α -амилазы – крахмал, глюкозо(ксилозо)изомеразы – D-ксилозу.

Питательная среда на основе цельного молока (белки – 2,8 %, жиры – 3,8 %, углеводы – 4,7 %) использована в качестве комплексного субстрата для синтеза бактериями комплекса ферментов.

Для инокуляции питательной среды использовали 4 об. % водной суспензии клеток бактерий, выращенных на пептонно-дрожжевом агаре при 28–30 °С в течение 3 сут.

Для определения активности ферментов использовали биомассу бактерий, отделенную от культуральной жидкости центрифугированием (8000 г, 20 мин) и дважды промытую дистиллированной водой, а также бесклеточный супернатант.

Активность β -галактозидазы определяли спектрофотометрическим методом (40 °С, pH 7,0, субстрат – *o*-нитрофенил- β -D-галактозид) [16], протеиназы – методом Ансона (37 °С, pH 7,0, субстрат – казеинат натрия) в модификации [17], липазы – титрометрическим методом (37 °С, pH 7,5, субстрат – оливковое масло) [18], глюкозо(ксилозо)изомеразы – цистеин-карбазольным методом (40 °С, pH 7,8, субстрат – ксилоза) [19], α -амилазы (40 °С, pH 7,8, субстрат – крахмал растворимый) согласно [20].

За единицу активности ферментов принимали такое их количество, которое в условиях проведения реакции за 1 мин катализирует образование из субстрата 1 мкмоль продукта. Активность ферментов выражали в условных единицах в расчете на 1 мл культуральной жидкости (ед/мл).

Для выявления галактоолигосахаридов, синтезируемых бактериями в питательной среде на основе цельного молока, бесклеточные фильтраты культуральной жидкости для инактивации ферментов выдерживали в течение 5–10 мин на кипящей водяной бане, охлаждали и после разбавления дистиллированной водой наносили на хроматографические пластины в количестве 1,0–1,5 мкл. Разделение маркерных углеводов (глюкоза, галактоза, лактоза) и сахаридов культуральной жидкости проводили методом восходящей тонкослойной хроматографии на пластинах Silufol (Kavalier, Чехия) в системе изопропанол–этилацетат–вода (2 : 2 : 1). Продукты разделения проявляли 0,2 %-ным раствором β -нафторезорцина в 96 %-ном этиловом спирте, содержащем 10 об. % ортофосфорной кислоты, при температуре 110 °С в течение 5 мин. Документирование полученных результатов проводили сканированием хроматографических пластин.

Молекулярно-генетическую идентификацию бактериальных культур проводили методом анализа нуклеотидных последовательностей генов 16S рПНК. Для этого их геномную ДНК выделяли с использованием набора Genomic DNA Purification Kit (Fermentas, Литва), придерживаясь рекомендаций производителя. Матрицы для секвенирования синтезировали ПЦР-методом, используя праймеры fD1 (5' AGAGTTTGATCCTGGCTCAG 3') и rP2 (5' ACGGCTACCT TGTTACGACTT 3') [21], что позволяло практически полностью амплифицировать ген 16S рПНК, за исключением его коротких концевых участков.

Реакционная смесь (30 мкл) содержала 3 мкл 10х реакционного буфера (Диалат Лтд., Россия), 1,5 мМ MgCl₂, 0,2 мМ каждого из дезоксирибонуклеозидтрифосфатов, по 30 пкмоль каждого из праймеров, 1 единицу активности *Taq*-полимеразы (Диалат Лтд., Россия) и 15 нг геномной ДНК в качестве матрицы.

ПЦР проводили в термоциклере MJ MiniTM (BioRad, США). Реакцию инициировали инкубированием смеси при 95 °С в течение 4 мин, затем следовало 30 циклов, состоящих из инкубаций: 94 °С – 30 с, 55 °С – 30 с, 72 °С – 2 мин. Завершающую элонгацию проводили при 72 °С в течение 7 мин. Продукты амплификации разделяли в 1 %-ном агарозном геле. Фрагменты размером около 1,5 т.п.н. вырезали и очищали с помощью набора DNA Extraction Kit (Fermentas, Литва) согласно инструкциям производителя.

Секвенирование фрагментов гена 16S рРНК идентифицируемых бактерий проводили на автоматическом секвенаторе ABI PRISM 310 Genetic Analyzer (Applied Biosystems, США) с использованием набора BigDye Terminator v3.1 Cycle Sequencing Kit (Applied Biosystems, США), придерживаясь рекомендаций производителя. При проведении «секвенирующей ПЦР» помимо праймеров fD1 и rP2 использовали «внутренний» праймер 960r (5' GCTTGTGCGGGYCCCCG 3') [22].

Полученные в результате секвенирования данные обрабатывали с использованием программы Sequencing Analysis Software v5.2 (Applied Biosystems, США).

Поиск гомологичных нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК осуществляли с помощью программы BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) в базе данных GenBank Национального центра биотехнологической информации США [23]. Филогенетический анализ проводили с помощью программы MEGA4 [24], используя алгоритм «объединения соседей».

Приведенные результаты представляют собой усредненные величины 2–3 опытов, выполненных в трех повторностях и статистически обработанных с использованием компьютерных программ из пакета Microsoft Windows.

Результаты и их обсуждение. Ранее было установлено отсутствие корреляции между способностью бактерий рода *Arthrobacter* расти на агаризованных средах со специфическими субстратами и синтезом ими β-галактозидазы [25] и липазы [26]. Аналогично из 14 исследованных нами представителей этой группы микроорганизмов, активно растущих на агаризованной среде с крахмалом в качестве единственного источника углерода, только 4 (*Arthrobacter* sp. GP-3, *Arthrobacter* sp. GP-4, *A. globiformis* БИМ В-10 и *A. oxydans* БИМ В-248) образовывали зоны гидролиза субстрата диаметром от 3–4 до 8–10 мм и в условиях глубинного культивирования синтезировали α-амилазу в количестве 0,002–0,097 ед/мл (табл. 1). В то же время штамм *A. nicotianae* БИМ В-5, не формирующий зон гидролиза крахмала в процессе роста на агаризованной среде, характеризовался в 4,3–206,5 раза более высоким, чем названные выше культуры, уровнем внеклеточной амилолитической активности (0,413 ед/мл).

Т а б л и ц а 1. Характеристика внеклеточной ферментативной активности бактерий рода *Arthrobacter*, растущих в средах со специфическими субстратами

Бактерия	Активность (ед/мл):				
	липазы	β-галактозидазы	протеазы	α-амилазы	глюкозо(ксилозо)изомеры
<i>Arthrobacter</i> sp. GP-3	0,156 ± 0,0078	0,23 ± 0,001	0	0,002 ± 0,0001	0
<i>Arthrobacter</i> sp. GP-4	0,145 ± 0,0073	0,04 ± 0,002	0	0,006 ± 0,0001	0
<i>Arthrobacter</i> sp. БИМ В-2239	0,112 ± 0,0056	6,70 ± 0,312	22,04 ± 0,521	0	0,204 ± 0,009
<i>Arthrobacter</i> sp. БИМ В-2240	0,054 ± 0,0027	18,17 ± 0,890	12,80 ± 0,326	0	0,226 ± 0,010
<i>Arthrobacter</i> sp. БИМ В-2241	0,068 ± 0,0034	16,44 ± 0,811	10,58 ± 0,218	0	0,193 ± 0,008
<i>Arthrobacter</i> sp. БИМ В-2242	0,072 ± 0,0036	24,17 ± 0,905	33,60 ± 1,097	0	0,240 ± 0,011
<i>Arthrobacter</i> sp. БОС В-1761	0,105 ± 0,0053	0,03 ± 0,001	0,01 ± 0,001	0	0
<i>A. citreus</i> БИМ В-3	0,150 ± 0,0075	0,13 ± 0,01	1,87 ± 0,038	0	0
<i>A. crystallopoietes</i> БИМ В-13	0,082 ± 0,0041	0,02 ± 0,001	2,61 ± 0,055	0	0
<i>A. globiformis</i> БИМ В-10	0,102 ± 0,0051	0,01 ± 0,001	0,95 ± 0,036	0,097 ± 0,0035	0
<i>A. globiformis</i> БИМ В-255	0,076 ± 0,0038	0,02 ± 0,001	0,82 ± 0,012	0	0
<i>A. nicotianae</i> БИМ В-5	0,120 ± 0,0060	0,02 ± 0,001	3,50 ± 0,041	0,413 ± 0,0312	0,285 ± 0,012
<i>A. oxydans</i> БИМ В-248	0,115 ± 0,0058	0,52 ± 0,031	2,51 ± 0,068	0,006 ± 0,0001	0
<i>A. ureafaciens</i> БИМ В-6	0,108 ± 0,0054	0,09 ± 0,001	6,86 ± 0,223	0	0,186 ± 0,008

В свою очередь, все предварительно отобранные на агаризованных питательных средах с казеинатом натрия (87,5 %, или 12 штаммов) и D-ксилозой (42,9 %, или 6 штаммов) культуры при их выращивании в жидких питательных средах с соответствующими субстратами синтезировали протеазу и глюкозо(ксилозо)изомеразу. Согласно приведенным в табл. 1 данным, диапазон их внеклеточной протеолитической активности варьировался от 0,01 у *Arthrobacter* sp. БОС В-1761 до 33,60 ед/мл у *Arthrobacter* sp. БИМ В-2242, глюкозо(ксилозо)изомеразной – в пределах 0,186–0,226 ед/мл у *A. ureafaciens* БИМ В-6 и *Arthrobacter* sp. БИМ В-2240 соответственно. Причем, для обоих ферментов отмечалась прямая зависимость между величиной внеклеточной активности и размером зон просветления субстрата (протеаза) или интенсивностью окраски их колоний (глюкозо(ксилозо)изомеразы).

Суммируя полученные данные о ферментативной активности исследуемых бактерий рода *Arthrobacter*, следует заметить, что свойство синтезировать весь комплекс исследуемых ферментов в средах со специфическими субстратами выявлено лишь у *A. nicotianaе* БИМ В-5. Однако этому штамму при максимальном уровне синтеза протеазы (0,413 ед/мл) и глюкозо(ксилозо)изомеразы (0,285 ед/мл), а также сопоставимой с другими исследованными культурами активностью липазы (0,120 ед/мл) была свойственна невысокая β -галактозидазная (0,02 ед/мл) и протеазная (3,50 ед/мл) активность.

Наиболее сбалансированными по компонентному составу и активности оказались внеклеточные ферментные комплексы штаммов БИМ В-2239, БИМ В-2240, БИМ В-2241 и БИМ В-2242 *Arthrobacter* sp., растущих в средах со специфическими субстратами (табл. 1). Их преимуществом перед другими исследованными культурами является высокий уровень продукции β -галактозидазы (6,70–24,17 ед/мл против 0,01–0,52 ед/мл) и протеазы (10,58–33,60 ед/мл против 0,01–6,86 ед/мл) при сопоставимом уровне синтеза липазы (0,054–0,112 ед/мл против 0,076–0,156 ед/мл) и глюкозо(ксилозо)изомеразы (0,193–0,240 ед/мл против 0,186–0,285 ед/мл).

Сходные результаты по составу ферментных комплексов и активности их отдельных компонентов получены при глубинном выращивании штаммов БИМ В-2239, БИМ В-2240, БИМ В-2241 и БИМ В-2242 *Arthrobacter* sp. в питательных средах на основе цельного молока (табл. 2). Установлено, что в условиях эксперимента все названные культуры синтезировали ферментные белки, участвующие в превращении углеводов, белков и жиров молока. Однако только штамм БИМ В-2242 *Arthrobacter* sp. выделялся относительно высоким уровнем продукции одновременно всех исследуемых ферментов. Так, величина накопления им липазы в культуральной жидкости достигала 0,052 ед/мл, протеазы – 25,82 ед/мл, глюкозо(ксилозо)изомеразы – 0,207 ед/мл, β -галактозидазы – 16,8 ед/мл, что соответственно в 1,0–1,7; 1,3–4,1; 1,1–2,0 и 1,6–3,8 раза превышало аналогичные показатели у штаммов БИМ В-2239, БИМ В-2240 и БИМ В-2241 *Arthrobacter* sp.

Т а б л и ц а 2. Состав внеклеточных ферментных комплексов, синтезируемых штаммами БИМ В-2239, БИМ В-2240, БИМ В-2241 и БИМ В-2242 *Arthrobacter* sp. в питательных средах на основе цельного молока

Штамм <i>Arthrobacter</i> sp.	Активность (ед/мл):			
	липазы	β -галактозидазы	протеазы	глюкозо(ксилозо)изомеры*
БИМ В-2239	0,052 \pm 0,0021	4,37 \pm 0,198	19,35 \pm 0,423	0,102 \pm 0,004
БИМ В-2240	0,031 \pm 0,0013	10,50 \pm 0,465	7,95 \pm 0,103	0,183 \pm 0,009
БИМ В-2241	0,040 \pm 0,0017	8,67 \pm 0,393	6,24 \pm 0,195	0,148 \pm 0,006
БИМ В-2242	0,052 \pm 0,0022	16,80 \pm 0,547	25,82 \pm 0,924	0,207 \pm 0,008

П р и м е ч а н и е: * – среда дополнительно содержала 0,5 % ксилозы.

Согласно данным хроматографического анализа, в культуральных жидкостях штаммов БИМ В-2239, БИМ В-2240, БИМ В-2241 и БИМ В-2242 *Arthrobacter* sp. наряду с остатками неупотребленной лактозы молока обнаруживались сахарады существенно большей молекулярной массы (рис. 1). Причем, количество галактоолигосахаридов, синтезированных *in vivo* из продуктов ферментативного гидролиза лактозы, существенно различалось и коррелировало с активностью β -галактозидазы исследуемых культур.

С целью выбора штамма для разработки на его основе биотехнологии получения из молочного сырья кормовой добавки планируется более детально исследовать эффективность гидролиза белков и жиров, а также трансформации лактозы молока и продуктов ее гидролиза с участием липаз, протеаз, β -галактозидаз и глюкозо(ксилозо)изомераз, синтезируемых штаммами БИМ В-2239, БИМ В-2240, БИМ В-2241 и БИМ В-2242 *Arthrobacter* sp.

Для уточнения таксономической принадлежности отобранных штаммов, которые на основании культурально-морфологических и физиолого-биохимических особенностей были предварительно отнесены к роду *Arthrobacter*, проводили анализ нуклеотидных последовательностей их генов 16S рРНК. В результате выполненных исследований определены нуклеотидные последовательности указанных генов изолятов БИМ В-2239, БИМ В-2240, БИМ В-2241 и БИМ В-2242 на протяженности более 1400 п. о. и депонированы в GenBank (коды доступа KF537268, KF537269, KF537270 и KF537271 соответственно). Результаты BLAST-поиска в упомянутой базе данных показали, что гены 16S рРНК исследуемых бактерий действительно имеют наибольшую степень сходства с соответствующими генами бактерий рода *Arthrobacter*, относящегося к семейству *Micrococcaceae*.

При попарном сравнении нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК установлено их максимальное сходство (99,3 %) у изолятов В2239, В2240, В2241, В2242 *Arthrobacter* sp. и типового штамма *Arthrobacter sulfonivorans* DSM 14002^T (табл. 3). Филогенетический анализ, учитывающий степень сходства нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК исследуемых бактерий и типовых штаммов рода *Arthrobacter*, также показал наибольшую близость изолятов БИМ В-2239, БИМ В-2240, БИМ В-2241 и БИМ В-2242 и типового штамма *Arthrobacter sulfonivorans* DSM 14002^T (рис. 2). При этом значение бутстрапа находилось на высоком уровне (92) для всей сформированной ветви, что свидетельствует о статистической достоверности кластеризации.

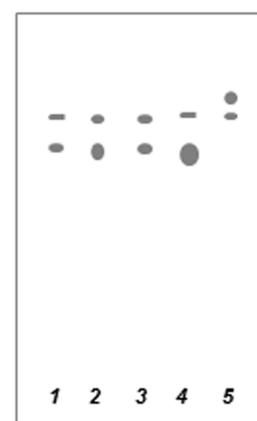


Рис. 1. Хроматограмма сахаридов культуральной жидкости штаммов В2239 (1), В2240 (2), В2241 (3) и В2242 (4) *Arthrobacter* sp. и маркерных углеводов – смеси глюкозы + галактозы и лактозы (5)

Т а б л и ц а 3. Сходство нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК бактерий рода *Arthrobacter* и родственных типовых и референтных штаммов из базы данных GenBank, %

Вид бактерий	Код доступа в GenBank	Степень сходства нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК штаммов, %			
		B2239	B2240	B2241	B2242
		на участке длиной, н.			
		1435	1435	1439	1436
<i>A. sulfonivorans</i> DSM 14002 ^T	NR_025084	99,5	99,5	99,3	99,5
<i>A. polychromogenes</i> DSM20136 ^T	NR_026192	98,3	98,3	98,1	98,3
<i>A. oxydans</i> DSM 20119 ^T	NR_026236	98,2	98,2	98,0	98,2
<i>A. equi</i> IMMIB L-1606 ^T	FN673551	98,2	98,2	98,0	98,2
<i>A. oryzae</i> KV-651 ^T	NR_041545	98,1	98,1	98,0	98,1
<i>A. defluvii</i> 4C1-a	NR_042573	98,1	98,1	97,9	98,1
<i>A. defluvii</i> 4C1-b ^T	AM409362	98,1	98,1	97,9	98,1
<i>A. ramosus</i> DSM 20546 ^T	NR_026193	98,0	98,0	97,8	98,0
<i>A. pascens</i> DSM 20545 ^T	NR_026191	98,0	98,0	97,8	98,0
<i>A. phenanthrenivorans</i> Sphe3 ^T	NR_042469	98,0	98,0	97,8	98,0
<i>A. scleromae</i> YH-2001 ^T	NR_041824	97,9	97,9	97,7	97,9
<i>A. niigatensis</i> LC4 ^T	NR_041400	97,8	97,8	97,6	97,8
<i>A. humicola</i> KV-653 ^T	NR_041546	97,8	97,8	97,6	97,8
<i>A. globiformis</i> DSM 20124 ^T	NR_026187	97,6	97,6	97,5	97,6
<i>A. chlorophenicus</i> A-6 ^T	NR_024954	97,6	97,6	97,4	97,6
<i>A. roseus</i> DSM 14508 ^T	AJ278870	97,4	97,4	97,1	97,4
<i>A. cryotolerans</i> LI3 ^T	GQ406812	97,2	97,2	97,0	97,2
<i>A. livingstonensis</i> LI2 ^T	GQ406811	96,7	96,7	96,5	96,7

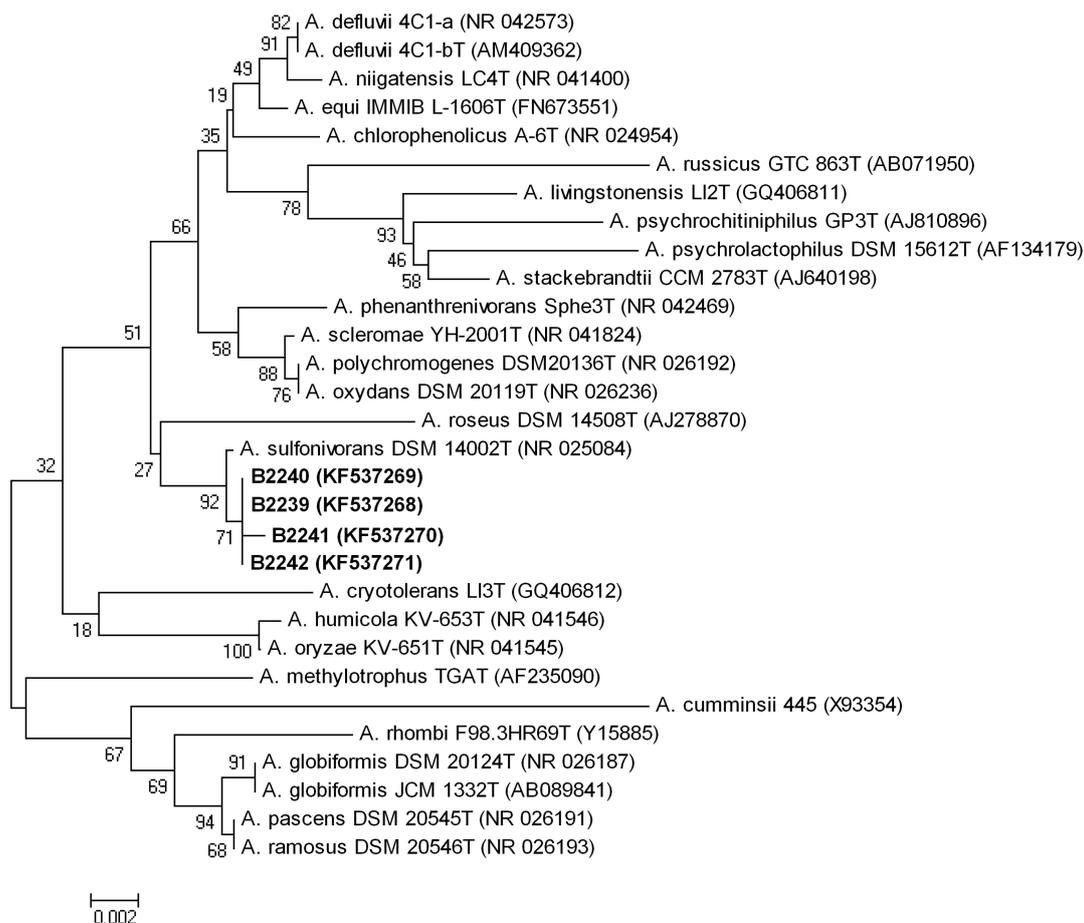


Рис. 2. Филогенетическое древо, отражающее родство штаммов B2239, B2240, B2241, B2242 *Arthrobacter* sp. и типовых штаммов рода *Arthrobacter*. В скобках приведены номера доступа последовательностей в GenBank. Блок сравнения включает 1063 нуклеотида. Значения бутстрапа вычислены на основании анализа 1000 деревьев. Линейка соответствует 0,002 замене на нуклеотидную позицию

Заключение. У бактерий рода *Arthrobacter* проведен двухступенчатый скрининг ферментов, участвующих в трансформации белков, жиров и углеводов – липаз, протеаз, β -галактозидаз и глюкозо(ксилозо)изомераз. Определены состав ферментных комплексов, продуцируемых исследуемыми культурами в средах со специфическим субстратом, и активность их отдельных компонентов. Установлено, что наиболее сбалансированными по компонентному составу и активности являются ферментные комплексы штаммов БИМ В-2239, БИМ В-2240, БИМ В-2241 и БИМ В-2242 *Arthrobacter* sp.

Определены и депонированы в базе данных GenBank нуклеотидные последовательности генов 16S рРНК изолятов БИМ В-2239, БИМ В-2240, БИМ В-2241 и БИМ В-2242 *Arthrobacter* sp. размером более 1400 п. о. Принимая во внимание высокий уровень отличий между нуклеотидными последовательностями генов 16S рРНК представителей рода *Arthrobacter* и типового штамма *A. sulfonivorans* DSM 14002^T (1,5–2 % между близкими вариантами в пределах рода), высокую (более 99,3 %) степень сходства анализируемых последовательностей у исследуемых и типового штаммов, высокое (92) значение результатов бутстрап-анализа для кластера *A. sulfonivorans*, изоляты БИМ В-2239, БИМ В-2240, БИМ В-2241 и БИМ В-2242 идентифицированы как *Arthrobacter sulfonivorans*.

Планируется детальное исследование условий эффективного гидролиза белков и жиров с участием липаз и протеаз, а также трансформации лактозы молока и продуктов ее гидролиза с участием β -галактозидаз и глюкозо(ксилозо)изомераз штаммов БИМ В-2239, БИМ В-2240, БИМ В-2241 и БИМ В-2242 *Arthrobacter sulfonivorans* с целью выбора продуцента для разработки биотехнологии получения из молочного сырья гипоаллергенной биологически активной кормовой добавки пребиотического действия.

Литература

1. Квасников Е. И., Писарчук Е. Н. Артробактер в природе и производстве. Киев, 1980. – 220 с.
2. Comi G., Cantoni C. // Psychrotrophic Bacteria. 2002. Vol. 1. P. 111–116.
3. John E., Hampel W. A. // Appl. Microbiol. Biotechnol. 1991. Vol. 35, N 1. P. 60–64.
4. Latzko F., Hampel W. A. // Appl. Microbiol. Biotechnol. 1993. Vol. 40, N 1. P. 12–16.
5. Latzko F., Hampel W. A. // Appl. Microbiol. Biotechnol. 1995. Vol. 44, N 1–2. P. 185–189.
6. Lobanok A. G., Sapunova L. I., Dikhtievski Ya. O. et al. // World J. Microbiol. Biotechnol. 1998. Vol. 14, N 2. P. 259–262.
7. Khandeparkar R., Bhosle N. B. // Bioresour. Technol. 2007. Vol. 98, N 4. P. 897–903.
8. Nakagawa T., Ikehata R., Myoda T. et al. // Protein Expression Purif. 2007. Vol. 54, N 2. P. 295–299.
9. Brushan I., Yadav A. K., Parshad R. // Asiatic J. Biothechnol. Res. 2011. Vol. 2, N 5. P. 522–534.
10. Siala R., Fakhfakh N., Hamza-Mnif I. et al. // Biotechnol. Bioprocess Eng. 2012. Vol. 17, N 3. P. 556–564.
11. Soares F. L. Jr., Melo I. S., Dias A. C. et al. // World J. Microbiol. Biotechnol. 2012. Vol. 28, N 5. P. 2195–2203.
12. Chu J., Wu X., Wu B. et al. // J. Agric. Food Chem. 2014. Vol. 62, N 24. P. 5408–5411.
13. Smith M. R., Zahnley J. C. // J. Ind. Microbiol. Biotechnol. 2005. Vol. 32, N 7. P. 277–283.
14. Патент 11170 Респ. Беларусь. № а20061327; заявл. 22.12.2006; опубл. 30.10.2008.
15. Патент 15050 Респ. Беларусь. а 20091062; заявл. 14.07.2009; опубл. 28.02.2011.
16. Kuby S. A., Lardy H. A. // J. Amer. Chem. Soc. 1953. Vol. 75, N 4. P. 890–896.
17. ГОСТ 20264.2–88. Введ. 01.07.90. М., 1988. – 11 с.
18. Yang G., Wu J., Xu G. et al. // Bioresour. Technol. 2009. Vol. 100, N 19. P. 4311–4316.
19. Dische Z., Borenfreund E. // J. Biol. Chem. 1951. Vol. 192, N 2. P. 583–587.
20. ГОСТ 20264–89. Введ. 01.07.90. М., 1989. – 17 с.
21. Weisburg W. G., Barns S. M., Pelletier D. A. // J. Bacteriol. 1991. Vol. 173, N 2. P. 697–703.
22. Reed D. L., Hafner M. S. // Microbial Ecol. 2002. Vol. 44, N 1. P. 78–93.
23. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov>.
24. Tamura K., Dudley J., Nei M. et al. // Mol. Biol. Evolut. 2007. Vol. 24, N 8. P. 1596–1599.
25. Ерхова Л. В., Костеневич А. А., Лобанок А. Г. и др. // Докл. НАН Беларуси. 2013. Т. 57, № 5. С. 77–80.
26. Сапунова Л. И., Костеневич А. А., Лобанок А. Г. и др. // Докл. НАН Беларуси. 2013. Т. 57, № 6. С. 70–74.

L. I. SAPUNOVA, A. A. KASTSIANEVICH, A. G. LOBANOK, I. O. TAMKOVICH, S. A. KULISH,
D. P. BAZHANAU, K. K. YATSEVICH

leonida@mbio.bas-net.by

ENZYMATIC ACTIVITY OF *ARTHROBACTER* GENUS BACTERIA AND THEIR GENOTYPIC IDENTIFICATION

Summary

Two-stage screening enabled one to define the composition of enzyme complexes produced by bacteria of genus *Arthrobacter* in media with specific substrates and activity of individual constituents involved in the transformation of milk proteins, lipids and carbohydrates. It was found that enzyme complexes of *Arthrobacter* strains BIM B-2239, BIM B-2240, BIM B-2241 and BIM B-2242 showed the most balanced activity of lipase, protease, β -galactosidase and glucose(xylose)isomerase components. Following the nucleotide sequence analysis of 16S rRNA gene the examined cultures were identified as *Arthrobacter sulfonivorans*. 16S rRNA gene sequences over 1400 bp in size were deposited in GenBank database.

Detailed investigation of conditions favoring the efficient hydrolysis of proteins and lipids by proteases and lipases produced by *Arthrobacter sulfonivorans* strains BIM B-2239, BIM B-2240, BIM B-2241, BIM B-2242 and the transformation of milk lactose and derived hydrolysis products mediated by β -galactosidases and glucose(xylose)isomerases will allow one to select microbial strain to develop the biotechnology of manufacturing hypoallergenic feed additive with prebiotic activity from dairy substrates.

УДК 577.352

Г. П. ЗУБРИЦКАЯ, Л. М. ЛУКЪЯНЕНКО, Е. И. ВЕНСКАЯ,
член-корреспондент Е. И. СЛОБОЖАНИНА

ИНДУЦИРОВАННАЯ АМИЛОИДАМИ МОДИФИКАЦИЯ МЕМБРАН ЭРИТРОЦИТОВ ЧЕЛОВЕКА. ВЛИЯНИЕ АНТИОКСИДАНТОВ

Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси, Минск

Поступило 04.08.2014

Введение. Последнее десятилетие наблюдается повышение интереса к изучению структурных и токсических свойств амилоидных фибрилл, участвующих в патогенезе и развитии нейродегенеративных заболеваний. Это обусловлено тем, что число случаев таких заболеваний в возрастной группе 55–75 лет удваивается каждые 5 лет [1].

Известно, что при заболеваниях Паркинсона, Альцгеймера и Гентингтона, сосудистых деменциях, множественной системной атрофии и других заболеваниях амилоидные пептиды в значительных количествах накапливаются в сосудах мозга, вызывая окислительный стресс, повреждение эндотелия капилляров, снижение скорости кровотока и снабжения мозга глюкозой и кислородом [2]. Амилоидные отложения тормозят передачу импульсов между нейронами, что в итоге приводит к поражению нервной системы и развитию деменции. Предполагается, что взаимодействие амилоидных фибрилл с липидным бислоем мембран и запускает окислительный стресс, который приводит к разрушению клеточной мембраны [3]. Попадая в кровь, амилоиды могут влиять на клетки, в том числе и на эритроциты. Считается, что в разрушение амилоидами эритроцитарных мембран может быть вовлечено экспонирование внутренних гидрофобных участков и повышенный уровень дисульфидов, доступных для них. Однако вопросы о механизмах действия амилоидов на эритроциты недостаточно изучены.

Нами ранее в экспериментах *in vitro* обнаружено снижение уровня ТБК-активных продуктов в эритроцитах человека, преинкубированных с амилоидами [4].

Цель исследования – выяснение вопроса о состоянии антиоксидантной системы в модифицированных амилоидами эритроцитах и о влиянии антиоксидантов на степень модификации мембран эритроцитов при воздействии на них амилоидных олигомеров.

Материалы и методы исследования. Амилоидные структуры были получены из лизоцима куриного яйца путем выдерживания его в 10 мМ HCl при 65 °С в течение 7 сут. при постоянном перемешивании [5]. Контроль за процессом образования амилоидов из лизоцима осуществляли ежедневно флуоресцентным методом с использованием тиофлавина Т [6]. Эритроциты отделяли от плазмы путем центрифугирования образцов крови (1500 g, 5 мин) и последующего отмывания в изотоническом растворе NaCl. Отмытые эритроциты помещали в среды, содержащие амилоидные структуры в присутствии и без антиоксидантов, и инкубировали в течение 3 ч при 37 °С. Затем из них выделяли мембраны (тени эритроцитов) по методу Доджа и сотр. Концентрацию белка в тенях эритроцитов измеряли по методу [7]. Оценку состояния липидного бислоя мембран эритроцитов осуществляли по параметрам флуоресценции липофильных зондов – 1-(4-триметиламмоний-фенил)-6-фенил-1,3,5-гексатриена (ТМА-ДФГ) и 6-додеканол-2-диметиламинонафтадена (лаурдана), встроенных в изолированные мембраны эритроцитов, как в работе [4]. Активность глутатионпероксидазы, супероксиддисмутазы и каталазы в эритроцитах определяли спектрофотометрически по методам, описанным ранее [8]. Уровень образования продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) в эритроцитах определяли по ТБК-тесту.

Флуориметрические измерения проведены на люминесцентном спектрофотометре SM2203 (Солар, Беларусь), спектрофотометрические – на спектрофотометре Specord M-40 (Германия).

Результаты экспериментов анализировали методом вариационной статистики с использованием параметрического критерия Стьюдента [9].

Результаты и их обсуждение. Ранее нами показано, что амилоидные структуры, полученные из лизоцима куриного яйца, взаимодействуя с эритроцитами человека *in vitro*, модифицируют физическое состояние липидного бислоя мембран, не индуцируя в клетках генерацию активных форм кислорода [4].

Наиболее важным фактором в оксигенации является способность эритроцитов к переносу кислорода, которая, в свою очередь, зависит от энергетического и антиоксидантного статуса эритроцитов. Поскольку эритроциты находятся в постоянном контакте с амилоидными пептидами, локализованными в сосудах мозга, мы предположили, что такое взаимодействие может приводить к изменению метаболизма и антиоксидантного статуса клеток. В литературе описаны изменения в антиоксидантной системе эритроцита, в ее ферментативной части и системе глутатиона, изменения в метаболизме клеток и структуре мембраны при действии коммерческого амилоидного A β 25-35 пептида [10; 11]. Авторами показано, что активность глутатион пероксидазы в эритроцитах при их инкубации с A β 25-35 пептидом в среде, содержащей глюкозу, не меняется в течение всего периода инкубации, но достоверно снижается к концу инкубационного периода в среде, не содержащей глюкозу. Накопление перекиси водорода в эритроцитах особенно опасно, поскольку под ее воздействием образуется метгемоглобин, неспособный переносить кислород к тканям. Было обнаружено, что концентрация GSH в эритроцитах при их контакте с A β -пептидами быстро уменьшается, и через час в клетках остается около 40 % от необходимого физиологического уровня, что приводит к резкому снижению отношения GSH/GSSG, развитию окислительного стресса, повреждению и преждевременному старению клеток [10; 11].

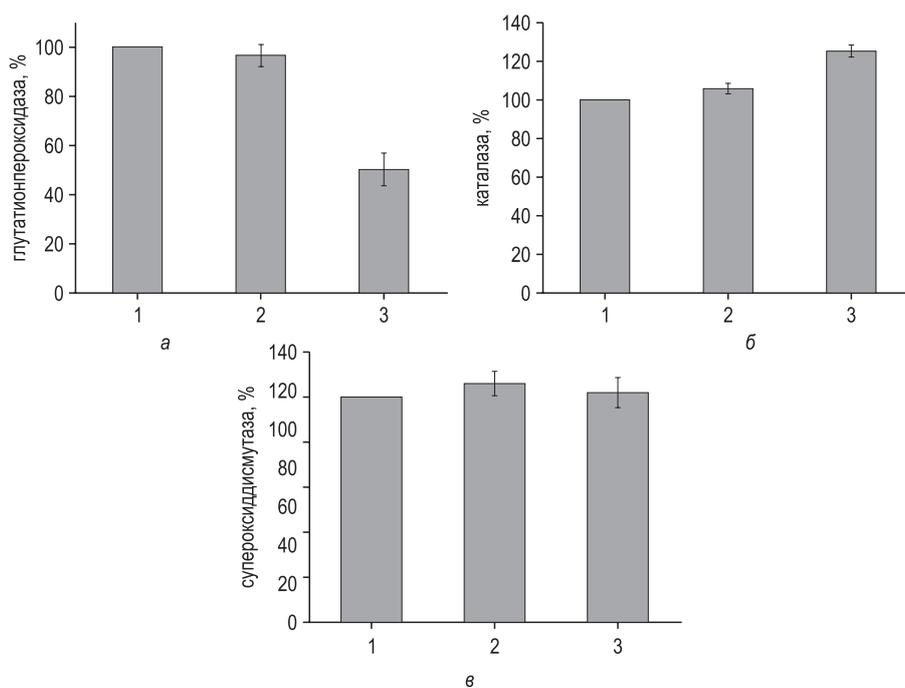
В настоящей работе выявлено, что в эритроцитах, обработанных амилоидными олигомерами в течение 3 ч при 37 °С, происходит снижение активности глутатионпероксидазы (рисунок, а), повышение активности каталазы (рисунок, б), по сравнению с клетками, предварительно проинкубированными то же время с раствором лизоцима. Активность супероксиддисмутазы в эритроцитах, обработанных олигомерами, практически не изменялась по сравнению с клетками, предварительно проинкубированными с лизоцимом (рисунок, в). Уровень ТБК-продуктов в эритроцитах, проинкубированных 3 ч при 37 °С, снижался, как и в работе [4] (данные не приведены).

При анализе связи между активностью ферментов антиоксидантной защиты (глутатионпероксидазы и каталазы) и уровнем ТБК-продуктов в эритроцитах, нагруженных амилоидами, показано, что она незначительна. Установлено, что существует обратная связь между активностью супероксиддисмутазы и содержанием ТБК-продуктов в эритроцитах, обработанных амилоидными структурами ($r = -0,82$, $P < 0,05$) по сравнению с эритроцитами, обработанными только лизоцимом ($r = 0,45$).

Для оценки влияния антиоксидантов на степень модификации липидов в мембранах эритроцитов при воздействии на них амилоидных олигомеров в данной работе использованы кверцетин, α -токоферол и липофильные флуоресцентные зонды.

Известно, что кверцетин относится к группе растительных флавоноидов, обладает высокой антирадикальной и антиокислительной активностью [12; 13] и может эффективно поступать в эритроциты путем пассивной диффузии [14]. Так как он является хорошим субстратом трансмембранной оксидоредуктазы эритроцитов [15], осуществляющей перенос электронов от внутриклеточных доноров на внешние акцепторы, то способствует увеличению восстановительного потенциала эритроцитов, а эритроциты могут служить важным компонентом, обеспечивающим транспорт кверцетина в кровотоке. Иначе говоря, эритроциты могут выступать естественным резервуаром флавоноидов [15].

Обнаружено, что предварительная инкубация эритроцитов человека в среде, содержащей 10^{-5} М кверцетина, а затем последующее выдерживание клеток с амилоидными структурами в течение 3 ч при 37 °С увеличивали изменения параметров флуоресценции липофильных зон-



Средние значения активности глутатионпероксидазы (а), каталазы (б) и супероксиддисмутазы (в) в эритроцитах человека до и после инкубации их с лизоцимом и амилоидными олигомерами: 1 – 10 %-ная суспензия эритроцитов предварительно выдержана в 0,155 М растворе NaCl (контроль); 2 – 10 %-ная суспензия эритроцитов предварительно выдержана 3 ч в 0,155 М растворе NaCl, содержащем 10 мг/мл лизоцима; 3 – 10 %-ная суспензия эритроцитов предварительно выдержана 3 ч в 0,155 М растворе NaCl, содержащем амилоидные структуры из лизоцима (10 мг/мл). За 100 % принято среднее значение активности фермента, характерное для нативных эритроцитов

дов, включенных в мембраны эритроцитов, вызванных только влиянием амилоидов – генерализованной поляризации флуоресценции лаурдана и поляризации флуоресценции ТМА-ДФГ (таблица). Результаты экспериментов с другим антиоксидантом – α -токоферолом показали, что в эритроцитах, предварительно проинкубированных с 500 мкМ α -токоферола, а затем подвергшихся влиянию амилоидных структур в течение 3 ч при 37 °С, происходит также увеличение поляризации флуоресценции ТМА-ДФГ (но не лаурдана) по сравнению с клетками, предварительно проинкубированными то же время только с амилоидными структурами (таблица). Полученные данные свидетельствуют об увеличении изменения микровязкости липидов в мембранах эритроцитов после совместного воздействия на клетки амилоидов и антиоксидантов.

Флуоресцентные параметры ТМА-ДФГ и лаурдана, включенных в мембраны, изолированные из эритроцитов после инкубации их в течение 3 ч при 37 °С в различных средах

Серия экспериментов (среда инкубации эритроцитов)	α -токоферол, 500 мкМ		Кверцетин, 10^{-5} М	
	ТМА-ДФГ, P, отн. ед.	Лаурдан, GP, отн. ед.	ТМА-ДФГ, P, отн. ед.	Лаурдан, GP, отн. ед.
Забуференный раствор NaCl, pH 7,4 (контроль)	$0,375 \pm 0,009$	$0,2 \pm 0,0035$	$0,39 \pm 0,009$	$0,17 \pm 0,003$
Забуференный раствор NaCl, pH 7,4 + амилоидные структуры лизоцима (1,4 мМ)	$0,4 \pm 0,007$ $P < 0,05$	$0,18 \pm 0,004$ $P > 0,05$	$0,45 \pm 0,008$ $P < 0,05$	$0,15 \pm 0,005$ $P > 0,05$
Забуференный раствор NaCl pH 7,4 + антиоксиданты и лизоцим (1,4 мМ)	$0,38 \pm 0,0095$ $P > 0,05$	$0,18 \pm 0,0045$ $P > 0,05$	$0,37 \pm 0,008$ $P > 0,05$	$0,19 \pm 0,004$ $P > 0,05$
Забуференный раствор NaCl pH 7,4 + антиоксиданты и амилоидные структуры лизоцима (1,4 мМ)	$0,55 \pm 0,0085$ $P < 0,01$	$0,185 \pm 0,004$ $P > 0,05$	$0,51 \pm 0,009$ $P < 0,01$	$0,22 \pm 0,006$ $P < 0,05$

П р и м е ч а н и е. Данные представлены в виде $X_{cp} \pm S_d$; P – поляризация флуоресценции ТМА-ДФГ; GP – генерализованная поляризация флуоресценции лаурдана; P – достоверность различий по сравнению с контролем. В каждой серии использованы эритроциты 6–8 доноров.

Нарушение структурно-функционального состояния мембран эритроцитов, обработанных амилоидами, может быть связано с окислительной деструкцией белков и липидов. Учитывая большую нагрузку белков в мембранах, их окислительная модификация может носить в отличие от перекисидации липидов более избирательный и специфический характер.

Заключение. Таким образом, полученные результаты подтверждают ранее высказанное нами предположение, что амилоидные структуры, взаимодействуя с эритроцитами человека *in vitro*, модифицируют мембрану эритроцитов человека, не вызывая генерацию активных форм кислорода. По-видимому, это происходит за счет того, что общая активность всех ферментов антиоксидантной защиты в эритроцитах человека под воздействием амилоидных олигомеров *in vitro* не претерпевает значительных изменений – незначительно снижается активность глутатионпероксидазы, но повышается активность каталазы, а активность супероксиддисмутазы остается на уровне контрольных эритроцитов.

Судя по поляризации флуоресценции липофильных зондов, степень модификации амилоидами мембран эритроцитов в присутствии антиоксидантов более выражена.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (гранты № Б11К-152 и Б13К-115).

Литература

1. Мальцев А. В., Галзитская О. В. // Биомед. химия. 2010. Т. 56, вып. 6. Р. 624–638.
2. Aliev G. et al. // Neurotox Res. 2003. Vol. 5, N. 7. P. 491–504.
3. Huang B. et al. // Biochemistry. 2009. Vol. 48. P. 5794–5800.
4. Лукьяненко Л. М., Зубрицкая Г. П., Венская Е. И. и др. // Новости мед.-биол. наук. 2013. Т. 7, № 1.
5. Malisauskas M. et al. // The J. of Biol. Chem. 2005. Vol. 280. P. 6269–6275.
6. Слуцкая А. И. // Цитология. 2010. Т. 52. С. 955–958.
7. Markwell M. A., Haas S. M., Tolbert N. E. // Analyt. Biochem. 1978. Vol. 8. P. 206–210.
8. Козарезов С. Н., Войтович Т. Н., Зубрицкая Г. П. и др. // Мед. журн. 2009. № 1, вып. 27. С. 61–64.
9. Гланц С. Медико-биологическая статистика. М., 1999.
10. Косенко Е. А., Соломадин И. Н., Каминский Ю. Г. // Биоорган. химия. 2009. Т. 35, № 2. С. 172–177.
11. Косенко Е. А., Соломадин И. Н., Маров Н. В. и др. // Биоорган. химия. 2008. Т. 34, № 5. С. 654–660.
12. Kandaswami C., Middleton Jr. E. // Adv. Exp. Med. Biol. 1994. Vol. 366. P. 351–376.
13. Костюк В. А., Потапович А. И. Биорадикалы и биоантиоксиданты. Минск, 2004. – 179 с.
14. Fiorani M. et al. // Free Radic. Res. 2003. Vol. 37, N 12. P. 1331–1338.
15. Fiorani M. et al. // Free Radic. Biol. Med. 2002. Vol. 32. P. 64–69.

G. P. ZUBRITSKAYA, L. M. LUKYANENKO, E. I. VENSKAYA, E. I. SLOBOZHANINA

petro371@mail.ru

AMYLOID-INDUCED MODIFICATION OF HUMAN ERYTHROCYTE MEMBRANES. INFLUENCE OF ANTIOXIDANTS

Summary

We studied the antioxidant defense enzyme activity in amyloid- modified human erythrocytes *in vitro*, and the influence of antioxidants on the amyloid-induced modification of erythrocyte membranes. It was shown that a combined action of amyloid structures of lysozyme and tocopherol or quercetin on human erythrocytes *in vitro* enhances membrane lipids microviscosity changes, but the activation of peroxidation process wasn't detected. Most likely it happens because a total antioxidant activity of all antioxidant defense enzymes in human erythrocytes *in vitro* does not change under the influence of amyloid oligomers. The activity of glutathione peroxidase decreases while the catalase activity increases and the superoxide dismutase activity doesn't change as compared to control.

УДК 577.1+599:539.1.047

*В. А. ГОЛОВАЧ¹, М. М. ЗАФРАНСКАЯ¹, К. Я. БУЛАНОВА¹,
В. Э. СЯХОВИЧ¹, А. С. ЩЕКОЛОВА², С. В. КВАЧ²,
член-корреспондент А. И. ЗИНЧЕНКО², С. Б. БОКУТЬ¹*

ОСОБЕННОСТИ СВЯЗЫВАНИЯ БИС-(3',5')-ЦИКЛИЧЕСКОГО ДИМЕРНОГО ГУАНОЗИНМОНОФОСФАТА С ТЕТРАМЕРАМИ ГЕМОГЛОБИНА ЧЕЛОВЕКА

¹Международный государственный экологический
университет им. А. Д. Сахарова, Минск

²Институт микробиологии НАН Беларуси, Минск

Поступило 04.08.2014

Введение. Гемоглобин представляет собой тетрамерный аллостерический белок, выполняющий две важнейшие биологические функции: транспорт молекулярного кислорода из легких к периферическим тканям и перенос углекислого газа и протонов от периферических тканей к дыхательным органам для последующего выведения из организма. Эффективность функционирования гемоглобина в качестве переносчика кислорода зависит от связывания эндогенных гетеротропных эффекторов, таких как 2,3-дифосфоглицерат (DPG), двуокись углерода, протоны и хлорид-ионы, которые модулируют аффинность к кислороду и кооперативное поведение тетрамеров белка. С другой стороны, описан целый ряд синтетических лигандов, которые также способны связываться с гемоглобином и модулировать его транспортную активность путем сдвига равновесия от Т-состояния к R-состоянию гемопротейда и наоборот [1]. Способность синтетических эффекторов аллостерически регулировать это равновесие в любом направлении представляет огромный интерес для медицины вследствие их практической значимости. Эффекторы, которые сдвигают аллостерическое равновесие в сторону высокоаффинного состояния гемоглобина, определены клинически как агенты, пригодные для лечения серповидноклеточной анемии, поскольку повышение аффинности S-гемоглобина к кислороду способствует увеличению его растворимости и препятствует, тем самым, формированию полимеров гемопротейда [2; 3]. В то же время соединения, которые сдвигают равновесие в сторону низкоаффинного состояния гемоглобина и усиливают доставку кислорода к тканям рассматриваются как потенциальные препараты для терапии гипоксических и ишемических состояний [4; 5].

Ранее было установлено [6], что ряд широко распространенных соединений нуклеиновой природы, к которым относятся АТФ, никотинамидадениновые динуклеотиды (NADPH, NADP и NADH), а также диаденозинполифосфаты (Ar_nA) являются мощными эндогенными аллостерическими эффекторами, способными связываться с тетрамерами гемоглобина человека в его низкоаффинном Т-состоянии и стабилизировать гемопротейд в Т-конформации. Существенным структурным сходством (рис. 1) с никотинамидадениновыми динуклеотидами и Ar_nA обладают некоторые не свойственные для эукариотических клеток необычные циклические динуклеотиды, в частности, бис-3',5'-циклический димерный гуанозинмонофосфат (с-di-GMP), физиологические эффекты и различные терапевтические активности которого вызывают в последнее время повышенный интерес исследователей [7].

Если поведение никотинамидадениновых динуклеотидов и Ar_nA в качестве регуляторов функции гемоглобина описано [6], то данные о роли с-di-GMP как возможного гетеротропного эффектора, способного влиять на аллостерические свойства данного гемопротейда, в литературе отсутствуют.

Поскольку, как естественные [1; 8], так и синтетические [1; 8] гетеротропные эффекторы способны взаимодействовать не только с дезокси-, но и оксиформой гемоглобина человека, в настоящей работе сделана попытка методами молекулярного моделирования и ингибиторного анализа с использованием стационарной флуоресцентной спектроскопии охарактеризовать сайты связывания c-di-GMP в тетрамерах основной формы гемоглобина человека (HbA₁) в оксигенированном R-состоянии.

Материалы и методы исследования. Гемоглобин выделяли методом ионообменной колоночной хроматографии на ДЭАЭ-целлюлозе DE-52. Концентрацию гемоглобина на всех стадиях выделения и очистки определяли спектрофотометрически, используя для расчетов молярный коэффициент поглощения, равный при 541 нм $13,8 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$ [9]. C-di-GMP синтезировали из GTP с помощью рекомбинантной дигуанилатциклазы [10].

Ингибиторный анализ проводили методом стационарной флуоресцентной спектроскопии. Ингибирующее действие c-di-GMP на взаимодействие 1-анилинонафталин-8-сульфоната (1,8-ANS) с гемоглобином оценивали по параметрам флуоресценции 1,8-ANS при его связывании с тетрамерами гемопротеида. Спектры флуоресценции 1,8-ANS регистрировали при 20 °С в термостабируемой кювете. Ширина щелей на возбуждение и регистрацию флуоресценции составляла 7,5 нм. Сродство гемоглобина к 1,8-ANS в отсутствие и в присутствии c-di-GMP определяли по значениям констант диссоциации (K_S), которые рассчитывали из концентрационных кривых насыщения при длине волны регистрации флуоресценции $\lambda_{em} = 486 \text{ нм}$ с использованием программы Enzfitter. Константы ингибирования (K_i) рассчитывали с использованием программного обеспечения Enzyme Kinetics Pro (Chem SW).

Приведенные в работе экспериментальные данные представляют собой доверительные интервалы среднего арифметического для 95 %-ного уровня вероятности.

Результаты и их обсуждение. Известно, что добавление 1,8-ANS в раствор оксигемоглобина человека с последующим увеличением концентрации зонда приводит к снижению интенсивности белковой флуоресценции, сдвигу максимума люминесценции 1,8-ANS с 550 нм для водного раствора до ~486 нм в присутствии белка и увеличению интенсивности флуоресценции зонда в области 470–486 нм [11]. Указанное поведение 1,8-ANS в растворе оксигемоглобина позволяет количественно охарактеризовать взаимодействие зонда с HbA₁. Количественной мерой связывания 1,8-ANS с HbA₁ могут служить K_S , рассчитываемые из зависимостей обратной величины интенсивности флуоресценции зонда от обратной величины его концентрации в растворе оксигемоглобина. Как следует из данных таблицы, процесс взаимодействия 1,8-ANS с тетрамерами HbA₁ характеризуется двумя K_S . Для диапазона концентраций зонда $1,25\text{--}9,95 \cdot 10^{-6} \text{ М}$ в отсутствие c-di-GMP значение первой K_S^1 составляет величину, равную $3,11 \pm 0,30 \cdot 10^{-6} \text{ М}$. В интервале концентраций 1,8-ANS $9,95\text{--}39,2 \cdot 10^{-6} \text{ М}$ обнаруживается вторая K_S^2 , равная $1,54 \pm 0,08 \cdot 10^{-5} \text{ М}$. Двойной набор K_S указывает на существование двух типов центров связывания 1,8-ANS в тетрамерной молекуле HbA₁. Приведенные выше результаты хорошо согласуются с данными анализа кривых затухания флуоресценции 1,8-ANS в растворе HbA₁, полученными методом лазерной спектродиффузиометрии с субнаносекундным временным разрешением [12]. Так, кинетики затухания флуоресценции зонда содержат компоненты со средним временем жизни <0,5 нс, 3,1–5,5 нс и 12,4–15,1 нс; при этом наиболее короткоживущая компонента относится к молекулам 1,8-ANS, находящимся в водной фазе, а две долгоживущие компоненты характеризуют два типа центров связывания 1,8-ANS в тетрамерах HbA₁, различающихся полярностью и доступностью для молекул воды.

В последнее время представления о природе сайтов связывания 1,8-ANS в белках претерпели ряд существенных изменений. Вследствие двойственной природы зонда, который может существовать как в виде нейтральной гидрофобной молекулы, так и в виде иона, процесс связывания 1,8-ANS в первую очередь определяется электростатическим взаимодействием его сульфатной группы с катионными группами (остатками Lys, His и Arg) водорастворимых белков [13].

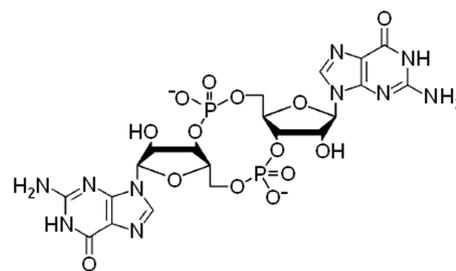


Рис. 1 Структурная формула бис-(3',5')-циклического димерного гуанозинмонофосфата

**Ингибирующее действие с-di-GMP на связывание 1,8-ANS с гемоглобином человека
в 50 мМ калий-фосфатном буфере (рН 7,4)**

Интервал концентраций 1,8-ANS, 10^{-6} М	Концентрация с-di-GMP, 10^{-6} М	Тип ингибирования	K_S^1 , 10^{-6} М	K_S^2 , 10^{-5} М	K_i^K , 10^{-5} М	K_i^H , 10^{-4} М
1,25–9,95	– 20 40	Конкурентный	$3,11 \pm 0,30$ $5,49 \pm 0,17$ $7,04 \pm 0,26$		$2,91 \pm 0,54$	
9,95–39,2	– 20 40	Неконкурентный		$1,54 \pm 0,08$ $1,54 \pm 0,08$ $1,54 \pm 0,08$		$0,79 \pm 0,11$

Примечание. Длина волны регистрации флуоресценции $\lambda_{em} = 486$ нм. Длина волны возбуждения $\lambda_{ex} = 296$ нм; $[HbA_1-O_2] = 20 \cdot 10^{-6}$ М; $T = 20$ °С. * – K_i^K – константа ингибирования для конкурентного типа; ** – K_i^H – константа ингибирования для неконкурентного типа.

Основываясь на склонности 1,8-ANS взаимодействовать с катионными группами белков и формировать при этом свое гидрофобное микроокружение, которое обеспечивает флуоресценцию зонда [13], установлено, что наиболее специфичным участком связывания 1,8-ANS в молекуле оксигемоглобина HbA₁ является регуляторный DPG-связывающий сайт белка [14], расположенный у β-входа в центральную полость тетрамеров и представленный кластером из восьми положительно заряженных остатков Val NA1, His NA2, Lys EF6 и His H21 в каждой β-цепи.

Принимая во внимание приведенные выше рассуждения, можно утверждать, что первая из обнаруженных K_S^1 (таблица) характеризует взаимодействие зонда в центральной регуляторной области тетрамеров HbA₁, а вторая K_S^2 относится к поверхностным участкам в молекулах гемоглобина, которые отличаются большей доступностью для молекул воды.

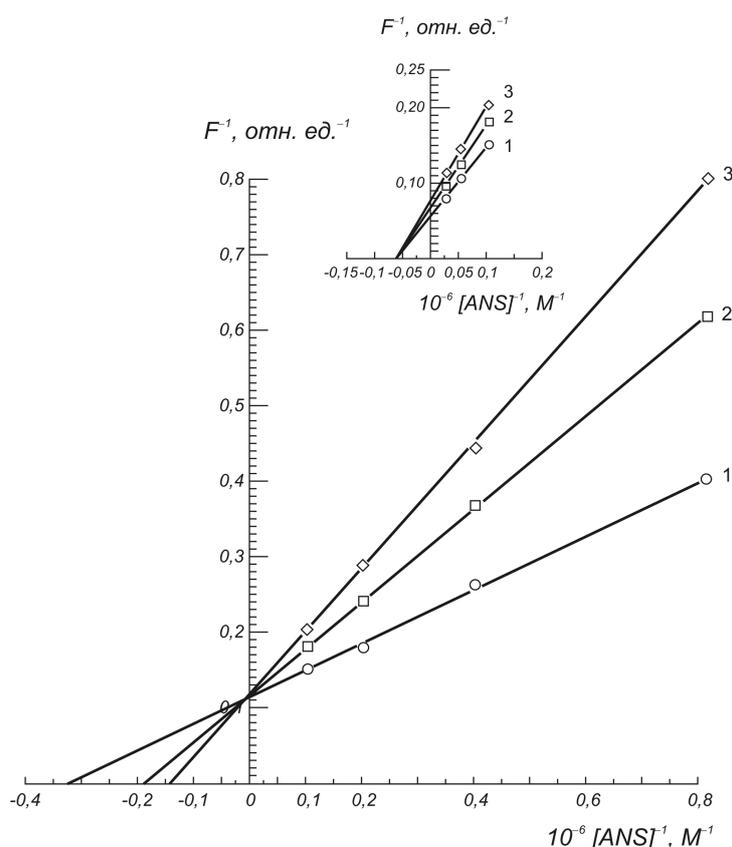


Рис. 2. Ингибирующее действие с-di-GMP на связывание 1,8-ANS с оксигемоглобином человека в 50 мМ калий-фосфатном буфере (рН 7,4) при 20 °С: 1 – в отсутствие с-di-GMP; 2 – 20 мкМ с-di-GMP; 3 – 40 мкМ с-di-GMP. Длина волны возбуждения $\lambda_{ex} = 296$ нм, длина волны испускания $\lambda_{em} = 486$ нм; $[HbA_1-O_2] = 20$ мкМ

Экспериментально доказать способность *c*-di-GMP связываться с тетрамерами HbA₁ можно путем сравнительного изучения флуоресцентных характеристик 1,8-ANS в растворе гемопротейда как в отсутствие, так и в присутствии *c*-di-GMP. На рис. 2 в координатах Лайнуивера–Берка приведены зависимости интенсивности флуоресценции 1,8-ANS от его концентрации в отсутствие (прямые 1) и в присутствии (прямые 2, 3) разных концентраций *c*-di-GMP. Из этого рисунка и таблицы следует, что при концентрациях зонда $1,25-9,95 \cdot 10^{-6}$ М *c*-di-GMP оказывает на взаимодействие 1,8-ANS с гемоглобином ингибирующее действие конкурентного типа, а при концентрациях 1,8-ANS $9,95-39,2 \cdot 10^{-6}$ М ингибирование становится неконкурентным. Величины констант ингибирования, рассчитанные для первого K_i^K и второго K_i^H интервалов концентраций зонда, составляют при 20 °С $2,91 \pm 0,54 \cdot 10^{-5}$ М и $0,79 \pm 0,11 \cdot 10^{-4}$ М соответственно (таблица).

Результаты молекулярного моделирования комплексов *c*-di-GMP с гемоглобином человека в окислительном состоянии показали, что *c*-di-GMP связывается с тетрамерами гемоглобина человека в R-состоянии со стороны β-входа в центральную регуляторную полость гемопротейда в DPG-связующем сайте белка.

В стабилизации комплекса димерного циклодигуанилата с оксигемоглобином принимают участие многочисленные водородные связи, возникающие, главным образом, между остатками LysEF6 и HisH21 β-цепей белка и, в зависимости от ориентации, атомами N7, O⁶, N² азотистых оснований и 2'ОН-группами рибозы циклодигуанилата, а также солевые мостики между протонированными ε-аминогруппами LysEF6 и ионизованным кислородом фосфатных групп *c*-di-GMP.

Заключение. Молекулярные модели комплексов *c*-di-GMP с оксигемоглобином человека HbA₁ показывают, что одним из сайтов связывания изученного алармона в олигомерах данного белка является его центральная регуляторная область. Полученные модели хорошо согласуются с данными ингибирующего действия *c*-di-GMP на связывание 1,8-ANS с HbA₁. При низких концентрациях 1,8-ANS наблюдается ингибирующее действие циклической диугуаниловой кислоты конкурентного типа на взаимодействие зонда с HbA₁. Такой характер ингибирования и молекулярные модели указывают на то, что *c*-di-GMP специфично связывается в DPG-сайте центральной полости олигомеров гемоглобина, что подтверждается численным значением ($2,91 \pm 0,54 \cdot 10^{-5}$ М) константы конкурентного ингибирования. При концентрациях 1,8-ANS выше насыщающей ($\sim 10 \cdot 10^{-6}$ М) молекулы зонда и, возможно, *c*-di-GMP взаимодействуют с разными и менее специфическими поверхностными участками оксигемоглобина.

Таким образом, обнаруженная способность *c*-di-GMP связываться с тетрамерами гемоглобина человека со стороны β-входа в центральную полость в DPG-связующем сайте позволяет рассматривать данное соединение подобно другим эффекторам, таким как DPG, инозитолгексафосфат и инозитолтриспирофосфат [1] в качестве аллостерического регулятора транспортной функции гемоглобина человека, склонного понижать аффинность гемоглобина к кислороду.

Литература

1. Safo M. K., Ahmed M. H., Ghatge M. S., Boyiri T. // Biochim. Biophys. Acta. 2011. Vol. 1814. P. 797–809.
2. Nnamani I. N., Joshi G. S., Danso-Danquah R. et al. // Chem. Biodivers. 2008. Vol. 5. P. 1762–1769.
3. Abdulmalik O., Safo M. K., Chen Q. et al. // Br. J. Haematol. 2005. Vol. 128. P. 552–561.
4. Watanabe T., Takeda T., Omiya S. et al. // J. Am. Coll. Cardiol. 2008. Vol. 52. P. 779–786.
5. Kieda C., El Hafny-Rahbi B., Collet G. et al. // J. Mol. Med. 2013. Vol. 91. P. 883–899.
6. Bonaventura C., Cashon R., Colacino J. M., Hilderman R. H. // J. Biol. Chem. 1992. Vol. 267. P. 4652–4657.
7. Kalia D., Mery G., Nakayama S. et al. // Chem. Soc. Rev. 2013. Vol. 42. P. 305–341.
8. Laberge M., Kövesi I., Yonetani T., Fidy J. // FEBS Lett. 2005. Vol. 579. P. 627–632.
9. Antonini E., Brunori M. Hemoglobin and myoglobin in their reactions with ligands. Amsterdam, 1971.
10. Korovashkina A. S., Rymko A. N., Kvach S. V., Zinchenko A. I. // J. Biotechnol. 2012. Vol. 164, N 2. P. 276–280.
11. Паруль Д. А., Бокуть С. Б., Киселев П. А. и др. // Биохимия. 2001. Т. 66. С. 481–488.
12. Parul D. A., Bokut S. B., Milyutin A. A. et al. // J. Photochem. Photobiol. B: Biol. 2000. Vol. 58. P. 156–162.
13. Matulis D., Lovrien R. // Biophys. J. 1998. Vol. 74. P. 422–429.
14. Syakhovich V. E., Parul D. A., Ruta E. Ya. et al. // Biochem. Biophys. Res. Commun. 2004. Vol. 317. P. 761–767.

*V. A. GOLOVACH, M. M. ZAPHRANSKAYA, K. Ya. BULANOVA, V. E. SYAKHOVICH, A. S. SHCHOKOLOVA,
S. V. KVACH, A. I. ZINCHENKO, S. B. BOKUT*

microbio@mbio.bas-net.by

**PECULIARITY OF BIS-(3', 5')-CYCLIC DIMERIC GUANOSINE MONOPHOSPHATE BINDING
TO HUMAN HEMOGLOBIN TETRAMERS**

Summary

Molecular modeling complexes of bis-(3', 5')-cyclic dimeric guanosine monophosphate (c-di-GMP) with human oxyhemoglobin HbA₁ and the analysis of the cyclic diguanylic acid inhibitory effect on the binding of 1,8-ANS to HbA₁ carried out by the steady-state fluorescence spectroscopy showed that the most specific binding site of c-di-GMP in hemoglobin oligomers is the central regulatory region of this protein (competitive inhibition constant is $2.91 \pm 0.54 \cdot 10^{-5}$ M). At high concentrations of 1,8-ANS c-di-GMP inhibitory effect on the probe binding is non-competitive (non-competitive inhibition constant is $0.79 \pm 0.11 \cdot 10^{-4}$ M), indicating the ability of c-di-GMP interact with less specific surface areas of human oxyhemoglobin.

УДК 502.52–027.21; 631.6.02–027.2

А. С. САМСОНОВА

ТЕХНОЛОГИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОБНОГО ПРЕПАРАТА ЭКОБЕЛ

(Представлено академиком А. Г. Лобанком)

Институт микробиологии НАН Беларуси, Минск

Поступило 12.05.2014

Введение. Республика Беларусь обладает значительным количеством промышленных предприятий, добывающих, транспортирующих, хранящих и перерабатывающих нефть. Аварийные разливы нефти и нефтепродуктов на почве и воде, а также систематическое поступление их в окружающую среду при использовании, транспортировке и переработке создают, в ряде случаев, критическую нагрузку на природные компоненты. Очистка природных и производственных объектов, загрязненных нефтью и продуктами ее переработки, является одной из задач охраны окружающей среды, основанной на использовании физико-химических, химических и биологических методов [1]. Использование биологических методов для очистки природных и производственных объектов экономически обосновано и экологически оправдано. Применение их дешевле физико-химических способов, экологически безопасно, приводит к полной минерализации загрязняющих веществ.

Биотехнологические приемы очистки почвы от загрязнения нефтью и нефтепродуктами основаны на использовании метаболической активности микроорганизмов, потребляющих в качестве источников питания практически любое органическое соединение. Методы биоремедиации экосистем от загрязняющих веществ включают приемы, основанные на активации метаболической деятельности естественной микрофлоры в месте обитания путем изменения соответствующих физико-химических условий среды, а также на внесении в загрязненные природные и производственные объекты (почвы, сточные воды, природные водоемы и др.) специально подобранных популяций микроорганизмов – деструкторов ксенобиотиков [2]. Использование микроорганизмов – активных деструкторов углеводов для разрушения нефти осуществляется путем создания и интродукции высокоактивных микробных препаратов-биоремедиаторов в загрязненные природные и производственные среды [3]. В Институте микробиологии НАН Беларуси для ликвидации последствий загрязнения почвы в результате аварийных разливов нефти разработан микробный препарат Экобел, который по материалам информационно-аналитического агентства Cleandex и интернет-журнала «Коммерческая биотехнология» известен в России наряду с другими популярными препаратами-биоремедиаторами такими, как «Путидойл», «Олеоворин», «Нафтокс», «Uni-rem», «Родер», «Центрин», «Псевдомин», «Дестройл», «Микромицет», «Лидер», «Валентис», «Деворойл» (РФ), «Родобел», «Родобел-Т» (Беларусь), «Эконадин», «Десна», «Консорциум микроорганизмов» и «Simbinal» (Украина).

Основные преимущества препарата Экобел заключаются в более высокой эффективности применения и стоимости ниже цены мировых аналогов.

Цель работы – анализ эффективности использования микробного препарата Экобел для очистки почвы, загрязненной в результате аварийного разлива нефти.

Материалы и методы исследования. Количественное определение нефтепродуктов проводили в образцах почвы на 16 контрольных площадках по «Методике выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02» (Методика М 03-03-2007, Санкт-Петербург) [4].

Содержание в почве, обработанной препаратом Экобел, микроорганизмов – деструкторов нефти определяли методом посева серийных разведений почвенной вытяжки на синтетическую среду Е-8 с гексадеканом в качестве источника углерода [5].

Объектом исследования явилась почва, загрязненная нефтью в результате аварийного механического повреждения нефтепровода на территории, расположенной в двух километрах от д. Грушевка Каменецкого р-на, площадью, равной 11906 м², с давностью загрязнения 2 года.

Почва преимущественно представлена суглинком при наличии супеси, что требует усиленного режима увлажнения и рыхления при обработке ее микробным препаратом Экобел.

На загрязненном участке среди 16 контрольных площадок выявлены 7, содержащих большое количество крупных обгорелых почвенных комков, образованных в результате возгорания нефти, разлившейся во время аварии (рисунок).

Для очистки почвы, загрязненной нефтепродуктами, использовали препарат Экобел, состоящий из смеси микроорганизмов рода *Rhodococcus* (*Rhodococcus erythropolis* 23Ф, 70Ф, 37Ф и *Rhodococcus ruber* 2В).

Жидкая форма препарата Экобел в виде культуральной жидкости составляющих его микроорганизмов наработана на РУП «Энзим» (г. Пинск) в соответствии с ТУ РБ 100289066.024–2004. Норма внесения жидкой формы препарата для очистки почвы от нефти рассчитывается исходя из соотношения нефть : препарат, равного 1 : 0,025.

Результаты и их обсуждение. Технология очистки почвы, включала следующие этапы:

на участок, подлежащий рекультивации, доставлен препарат Экобел в количестве 15000 л (4,8 м³ на бензовозе ГАЗ-3307 и 10,2 м³ в 10 пластмассовых емкостях, установленных на специализированном КАМАЗе 43118);

препарат Экобел с помощью пожарных шлангов с регулируемой подачей стволов, оборудованных на автоматизированной пожарной цистерне ёмкостью 3 м³, был нанесен на загрязненную почву путем орошения. Первый этап нанесения осуществили с использованием 7,5 м³ препарата;

после нанесения препарата Экобел на поверхность загрязненной почвы она была подвержена механическому рыхлению с целью равномерного распределения препарата в объеме обработанной почвы. Дискование провели с использованием трактора К700А, оснащенного дисковой бороной БДМ 2,5 с шириной захвата 2,5 м;

после дискования почву, обработанную препаратом, обильно увлажнили путем орошения с помощью пожарных шлангов с регулируемой подачей стволов, оборудованных на автоматизированной пожарной цистерне;

повторное нанесение препарата Экобел в количестве 7,5 м³ осуществили после увлажнения почвы;



Фрагмент поверхности загрязненной почвы контрольной площадки 1

повторное дискование провели после увлажнения почвы, обработанной препаратом Экобел, для активного перемешивания микроорганизмов – деструкторов нефти с содержащимися в почве нефтяными углеводородами;

после повторного дискования в почву, обработанную препаратом Экобел, внесли NPK в виде полного минерального удобрения (амофоска) для обеспечения сбалансированного питания микроорганизмов – деструкторов нефти;

после внесения полного минерального удобрения почву продисковали совместно с обильным поливом ранее описанными способами.

Контроль содержания углеводородов нефти в очищаемой почве (на 16 контрольных площадках, характеризующихся различным уровнем загрязнения нефтяными углеводородами) с целью наблюдения за динамикой процесса их деструкции в результате примененной технологии использования препарата Экобел осуществляли 28.06; 25.08; 22.09; 26.10.2011 г.

В течение четырех месяцев (с 28 июня до 26 октября) содержание нефти в почве, обработанной препаратом, снизилось в соответствии с исходным уровнем загрязнения (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Динамика содержания углеводородов (УВ) в загрязненной почве, обработанной препаратом Экобел

№ пробной площадки	Содержание УВ, мг/кг				Снижение содержания УВ, % от исходного
	Дата проведения анализа				
	28.06	25.08	22.09	26.10	За 4 месяца
1	3815	1534	1301	660	82,7
2	4833	1855	1239	805	83,3
3	4901	1620	941	525	89,3
4	5594	1486	1200	795	85,8
5	11199	6344	3773	1410	87,4
6	12049	2785	2078	1250	89,6
7	1780	585	50	25	98,6
8	395	105	50	0	100
9	165	50	5	0	100
10	255	45	5	0	100
11	60	35	10	0	100
12	155	25	0	0	100
13	280	15	5	5	100
14	55	10	0	0	100
15	55	5	0	0	100
16	55	10	0	0	100

Почва с исходным уровнем загрязнения нефтяными углеводородами, составившим от 280 до 55 мг/кг (площадки 10–16), в результате обработки препаратом Экобел была очищена до ПДК за 2 месяца. Период деструкции нефти до предельно допустимой концентрации в образцах почвы с уровнем загрязнения от 395 до 1780 мг/кг (площадки 7 и 8) составил 3 месяца.

Случаи возгорания нефти в период аварийных порывов нефтепроводов редки и сопровождаются усложнением процесса очистки территорий, загрязненных остатками не окончательно сгоревших на почве углеводородов. Это связано с невозможностью механического разрыхления спекшихся с почвой тяжелых фракций нефти, что снижает контакт загрязняющего вещества с микроорганизмами-деструкторами и существенно влияет на сроки осуществляемой ими деструкции углеводородов.

Примененная для биоремедиации двукратная обработка почвы, загрязненной остатками сгоревшей на ней нефти, препаратом Экобел позволила достичь высокого для данной ситуации уровня очистки почвы. Углеводороды в концентрации от 3815 до 12049 мг/кг (площадки 1–6) в результате первой обработки препаратом (28.06.2011) были разрушены в образцах исследуемой почвы на 60–83 % за 2 месяца и на 82–90 % за 4 месяца. Наблюдаемое несоответствие степени деструкции углеводородов их начальной концентрации объясняется различным количеством в очищаемой почве жидкой нефти и тяжелых продуктов, содержащихся в неокончательно сгоревшей нефти. Углеводороды в концентрации 11199 и 12049 мг/кг были представлены в почве 5-й

и 6-й площадок большим количеством жидкой нефти, которая активнее разрушалась микроорганизмами-деструкторами, составляющими препарат Экобел.

Контроль содержания углеводородов в почве данных участков через год после применения препарата Экобел выявил отсутствие их на всех контролируемых площадках. Это свидетельствует о пролонгированном эффекте деструктивных свойств препарата.

Эффективная деструкция нефти в почве при обработке ее препаратом Экобел подтверждается показателями развития в ней микроорганизмов – деструкторов углеводородов. Результаты, приведенные в табл. 2, свидетельствуют об увеличении численности деструкторов в почве в 6–14 раз через месяц после интродукции в нее специализированных микроорганизмов-деструкторов. Снижение содержания нефти в почве в процессе утилизации ее микроорганизмами, составляющими препарат Экобел, сопровождается соответственным снижением количества самих деструкторов в связи с исчерпанием необходимого для их развития источника углерода.

Т а б л и ц а 2. Динамика развития микроорганизмов – деструкторов нефтепродуктов в загрязненной почве, обработанной препаратом Экобел

№ пробы	Количество КОЕ в 1 г сухой почвы, $1 \cdot 10^7$		
	До внесения препарата Экобел	Через 1 месяц после внесения препарата Экобел	Через 4 месяца после внесения препарата Экобел
1	0,27 ± 0,07	2,70 ± 0,10	0,99 ± 0,10
2	0,30 ± 0,02	2,45 ± 0,13	0,77 ± 0,12
3	0,20 ± 0,01	2,23 ± 0,06	0,70 ± 0,11
4	0,22 ± 0,03	2,16 ± 0,02	0,51 ± 0,20
5	0,20 ± 0,02	2,90 ± 0,01	1,01 ± 0,20
6	0,44 ± 0,02	3,60 ± 0,30	1,92 ± 0,18
7	0,40 ± 0,02	2,44 ± 0,17	0,77 ± 0,12
18 (к)	0,26 ± 0,02	0,59 ± 0,07	0,36 ± 0,10

Закключение. Микробным препаратом Экобел обработан участок почвы размером 12000 м², содержащий 1800 кг нефтяных углеводородов. Норма расхода препарата с микробной нагрузкой $1 \cdot 10^9$ КОЕ/мл из расчета нефть : препарат 1 : 0,025 составила 1,25 л, содержащих 3,7 г биомассы микроорганизмов – деструкторов нефти, на 1 м² загрязненной почвы. Показатели эффективности деструкции нефти в условиях, осложненных как сроком ее поступления в почву (давность разлива нефти 2 года), так и уровнем содержания в почве нефтепродуктов, «тяжелых» для микробной деструкции (остатки не полностью сгоревшей в почве нефти), свидетельствуют о высоком биоремедиационном потенциале препарата Экобел для очистки нефтезагрязненной почвы. Они могут служить основанием для успешного расширения сферы применения препарата с целью очистки грунтов и шламов, содержащих продукты переработки нефти, проблемные для микробной деструкции.

Литература

1. Corapcioglu M. J., Hossain M. A. // J. Theor. Biol. 1990. Vol. 142, 4. P. 503–516.
2. Brown L. R. // Chem. Eng. Progr. 1987. Vol. 83, N 10. P. 35.
3. Пат. 3418 ВУ, МПК 6- В 09С 1/10, 101:00, С 09К 3/32. Способ очистки почвы от нефти / А. С. Самсонова, З. М. Алещенкова, А. Э. Томсон, В. Н. Журавлев, Н. Ф. Семочкина, М. М. Бегельман. – № 970052; Заявл. 06.02.97; Опубл. 30.06.2000 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. 2000. № 2. С. 87.
4. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «ФЛЮОРАТ-02», Методика М 03-03-2007. Санкт-Петербург, 2007. – 22 с.
5. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под. ред. Д. Г. Звягинцева. М., 1991. – 304 с.

A. S. SAMSONOVA

microbio@mbio.bas-net.by

TECHNOLOGY AND APPLICATION EFFICIENCY OF MICROBIAL PREPARATION ECOBEL

Summary

A high application efficiency of microbial preparation Ecobel for remediation of soil polluted with hydrocarbons resulting from emergency oil spills was demonstrated.

Expense of liquid biopreparation calculated at 1: 0.025 oil-Ecobel ratio equaled 1.25 liters of the product encharged with microbial titer $1 \cdot 10^9$ a CFU/ml and containing 3.125 g biomass of petroleum-degrading species per 1 m² of contaminated soil.

УДК 575.174.015.3;57.088

М. Е. МИХАЙЛОВА, Е. Л. РОМАНИШКО

ОЦЕНКА ПОЛИМОРФИЗМА *ESR1-PvuII* ГЕНА ЭСТРОГЕНОВОГО РЕЦЕПТОРА У СВИНЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПЦР–ПДРФ И ТЕХНОЛОГИИ HRM-АНАЛИЗА

(Представлено академиком Л. В. Хотылевой)

Институт генетики и цитологии НАН Беларуси, Минск

Поступило 04.08.2014

Введение. Различия в продуктивности между отдельными животными, линиями и породами обусловлены, с одной стороны, средовыми, с другой – генетическими факторами. Большинство хозяйственно полезных признаков сельскохозяйственных животных относится к полигенным признакам, т. е. их количественный уровень генетически определяется целым рядом генов (локусов), разбросанных по всему геному. Такие локусы получили название локусов количественных признаков (QTLs, Quantitative Trait Loci's) [1]. Одним из перспективных направлений использования QTLs в животноводстве является молекулярно-генетический анализ генов-кандидатов, которые кодируют ключевые белки, ответственные за проявления признака.

Выявление молекулярных маркеров, влияющих на показатели воспроизводства на первом плане у молекулярных генетиков и селекционеров. Для управления селекционным процессом и ведения генетического мониторинга в свиноводстве значительный интерес представляет ген эстрогенового рецептора *ESR1*, который является ДНК-маркером плодовитости свиней [2].

Эстрогены – стероидные половые гормоны, способные регулировать рост, дифференцировку и функции в различных клетках и тканях млекопитающих. Проводниками гормональных сигналов являются эстрогеновые рецепторы (ESR), представленные в клетках-мишенях органов животных. В настоящее время широко известны два типа эстрогеновых рецепторов – *ESR1* и *ESR2*, которые являются транскрипционными факторами, имеющие центры связывания с регуляторными участками ДНК (промоторами, энхансерами). Гены *ESR* у свиньи локализованы на коротком плече 1-й хромосомы (SSC1) в регионе p.2.5–p.2.4 [3]. Ген *ESR1* получил наиболее широкое распространение в качестве маркера плодовитости свиней.

Для *ESR1-PvuII* полиморфизма выявлена ассоциация с репродуктивными качествами свиней породы крупная белая (масса гнезда при рождении, процент мертворожденных поросят и т. д.) [4]. Свиноматки с различными генотипами отличаются по воспроизводительным качествам. Установлено положительное влияние аллеля В на воспроизводительную функцию свиней, в частности, на многоплодие свиней английской крупной белой породы. Свиньи этой породы получили данный аллель от китайской многоплодной породы мэйшан в процессе ее создания в XIX в. с последующей передачей аллеля породам, созданным с участием крупной белой свиньи. В результате исследований установлено, что предпочтительным, с точки зрения селекции, является генотип ВВ. Превосходство по многоплодию маток составило 0,9 поросенка по сравнению с генотипом АА, а по размерам гнезда на 0,7–1,4 поросенка [5; 6].

В настоящее время для определения полиморфизма *ESR1-PvuII* используется традиционный метод анализа ПЦР–ПДРФ, который является достаточно длительным по времени и затратным.

Цель работы – разработка достоверного и недорогого экспресс-метода для определения полиморфизма *ESR1-PvuII* с использованием технологии HRM (High Resolution Melting) для массового скрининга животных, а также оценка его эффективности в сравнении с методом ПЦР–ПДРФ.

Материал и методы исследования. В работе в качестве объекта исследования были использованы свиньи белорусской крупной белой породы. Материалом для исследования служила ДНК, выделенная из биологического материала – проб ткани (ушной выщип) и цельной крови. Для выделения ДНК использовали набор реагентов для выделения ДНК «Нуклеосорб» (Праймтех, Беларусь). Была проанализирована выборка животных ($n = 125$) по полиморфизму *ESR1-PvuII* гена эстрогенового рецептора. Количество выделенной ДНК определяли с помощью Qubit® 2.0 Fluorometer с использованием набора Molecular probes Qubit®ds DNA BR Assay kit (Life technologies, США). Для постановки ПЦР-РВ и проведения HRM-анализа геномная ДНК образцов была нормализована (концентрация 4 нг/мкл).

ПЦР-ПДРФ метод. Для амплификации фрагмента гена *ESR1* длиной 120 п. н. использованы прямой праймер 5'-CCTGTTTTTACAGTGACTTTTACAGAG-3' и обратный праймер 5'-CACTTC-GAGGGTCAGTCCAAATTAG-3' (Short, 1997) [7]. Реакционная смесь объемом 25 мкл содержала деионизированную воду, 1х ПЦР буфер, 1,5 мМ MgCl₂, 200 мкМ смеси dNTP, 300 нМ каждого праймера, 1,5 U Taq-полимеразы (Thermo scientific, Литва) и 50 нг геномной ДНК. Амплификацию проводили на приборе C1000™ Thermal Cycler (Bio-Rad, США) при следующих условиях: 94 °C – 4 мин; 35 циклов: 94 °C – 30 с, 58 °C – 40 с, 72 °C – 40 с; 72 °C – 5 мин. Рестрикция продуктов амплификации длилась в течение ночи при 37 °C с использованием рестриктазы PvuII (Thermo scientific, Литва). Идентификацию фрагментов после рестрикционного анализа проводили в 4 %-ном агарозном геле (SeaKem® LE Agarose, Lonsa) с использованием интеркалирующего красителя ZUBR Green-1 (Праймтех, Беларусь) относительно маркера молекулярных масс DNA Ladder (Thermo scientific, Литва).

Секвенирование ДНК. Специфичные ПЦР-продукты изучаемого локуса гена *ESR1* вырезали из геля и очищали с помощью набора реагентов Silica Bead DNA Gel Extraction Kit (Thermo scientific, Литва) согласно прилагаемой производителем инструкции по применению. Для постановки секвенирующей ПЦР использовали Big Dye Terminator v3.1 Cycle Sequencing Kit. Секвенирующую ПЦР проводили согласно следующим условиям: 96 °C 1 мин; 25 циклов: 96 °C 10 с, 50 °C 5 с, 60 °C 4 мин; 16 °C 5 мин. ПЦР-продукты после секвенирующей ПЦР очищали от непрореагировавших флуоресцентно меченых терминаторных нуклеотидов переосаждением этанолом/Na₂ЭДТА. Определение нуклеотидной последовательности проводили на приборе 3500 Genetic Analyzer (Applied Biosystems, США).

HRMA (High Resolution Melting Analysis). Образцы геномной ДНК животных ($n = 51$) анализировали с использованием технологии HRM-анализа на приборе CFX96 (BioRad, США). Для амплификации фрагмента гена длиной 120 п. н. использованы те же праймеры, что и для ПЦР-ПДРФ анализа. Реакционная смесь в общем объеме 25 мкл содержала 1х ПЦР мастер-микс (Синтол, Россия) с интеркалирующим красителем EvaGreen, 500 нМ каждого праймера и по 20 нг ДНК каждого образца. Условия проведения амплификации и HRM-анализа были следующими: 95 °C – 5 мин; 35 циклов: 95 °C – 10 с, 63 °C – 30 с, 72 °C – 15 с; 94 °C – 1 мин, 72 °C – 30 с; Melt Curve 72 °C – 85 °C: Increment 0,2 °C – 5 с. Анализ результатов HRM-анализа проводили с помощью программного обеспечения Precision Melt Analysis™ software.

Пост-HRM секвенирование. После определения генотипов методом HRM по 4 образца из каждого кластера с генотипами AA, BB, AB были секвенированы. Полученные ПЦР-продукты после HRM-анализа очищали с помощью набора реагентов Silica Bead DNA Gel Extraction Kit (Thermo scientific, Литва). Секвенирующую ПЦР ставили с использованием BigDye® Terminator v3.1 Cycle Sequencing Kit (Applied Biosystems, США). Определение нуклеотидной последовательности проводили на генетическом анализаторе 3500 (Applied Biosystems, США).

Результаты и их обсуждение. Выборка свиней ($n = 125$) белорусской крупной белой породы исследована для определения полиморфизма *ESR1-PvuII* методом ПЦР-ПДРФ. Результаты ПЦР-ПДРФ анализа получены с помощью системы гель-документирования Quantum ST4 (Vilber Lourman, Франция) и представлены на рис. 1.

После ПЦР-ПДРФ анализа были отобраны 3 образца с различными генотипами: AA, AB и BB. Данные образцы были секвенированы с целью дальнейшего использования их в качестве контрольных образцов для HRM-анализа. Оценка и обработка данных проводились с использованием программного обеспечения Sequencing Analysis, версия 5.4 (рис. 2).

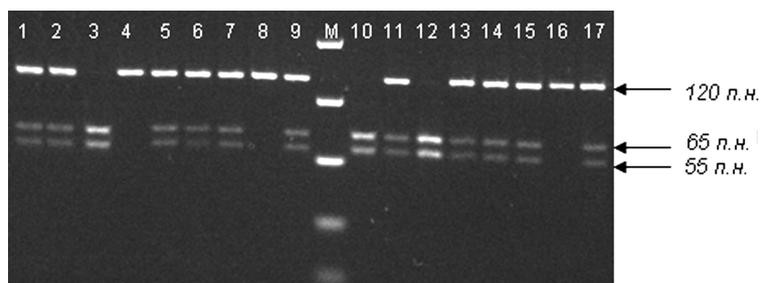


Рис. 1. Определение полиморфизма *ESRI-PvuII* методом ПЦР–ПДФ: М – маркер FastRulerUltra Low Range DNA Ladder; дорожки 8, 16 – гомозиготный генотип AA (120 п. н.); дорожки 1, 2, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 14, 15, 17 – гетерозиготный генотип АВ (120 п. н., 65 п. н., 55 п. н.); дорожки 3, 10, 12 – гомозиготный генотип ВВ (65 п. н., 55 п. н.)

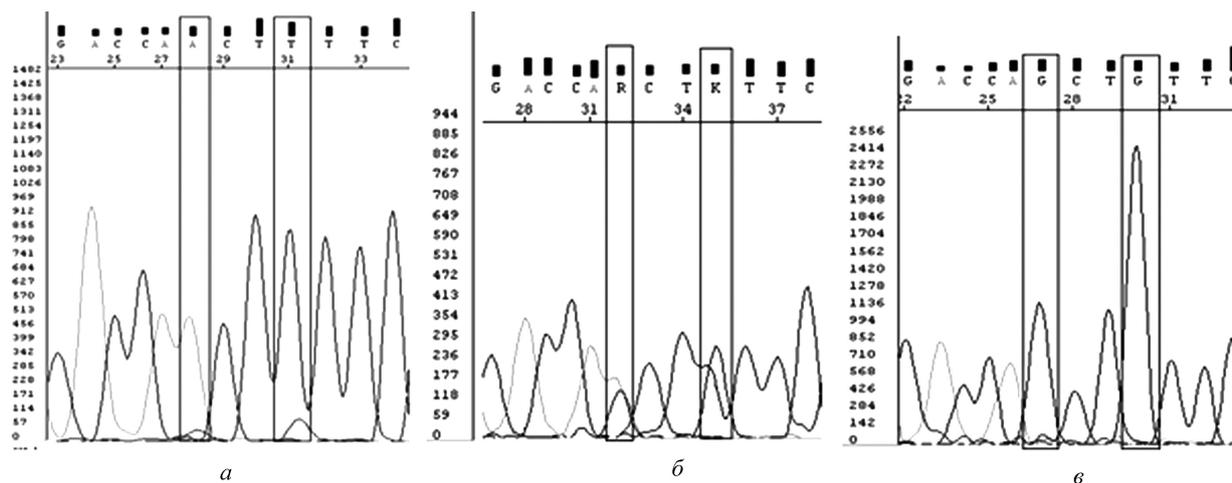


Рис. 2. Секвенирование образцов для выявления полиморфизма *ESRI-PvuII*: а – двойная гомозигота (генотип AA); б – двойная гетерозигота (генотип АВ); в – двойная гомозигота (генотип ВВ)

По результатам секвенирования было выявлено, что полиморфизм *ESRI-PvuII* включает две однонуклеотидные замены (SNP) 65А→G, 68Т→G в 3 интроне гене *ESRI* (GenBank HF947272). Только наличие двух SNP дает сайт рестрикции для эндонуклеазы PvuII, что позволяет выявлять особей с генотипом ВВ.

Из общей выборки исследованных животных были отобраны свиньи белорусской крупной белой породы ($n = 51$) для определения полиморфизма *ESRI-PvuII* методом ПЦР в реальном времени с использованием HRM-анализа. Анализ HRM был выполнен с помощью программного обеспечения после амплификации специфичного продукта в режиме реального времени. Этот анализ состоял из одного цикла с ростом температуры от 72 до 85 °С, где изменения флуоресценции фиксировали при каждом подъеме температуры на 0,2 °С в течение 5 с.

Первая реакция амплификации на CFX96 была также проверена на наличие неспецифических продуктов на 4 %-ном агарозном геле.

Для определения генотипов в исследуемых образцах использовали кривые плавления (рис. 3). В результате исследуемые образцы образовывали три четких кластера, соответствующих генотипам AA, ВВ, АВ.

Деление на кластеры по результатам HRM-анализа было подтверждено пост-HRM секвенированием, данные которого представлены справа на рис. 4.

Плавление с высоким разрешением (High Resolution Melts, HRM) – это технология, используемая после проведения ПЦР в реальном времени, основана на определении различий в кривых плавления (диссоциации ДНК) с помощью специального программного обеспечения. HRM начинается с ПЦР-амплификации интересующей области в присутствии интеркалирующего красителя (SYTO® 9, EvaGreen®, SYBR Green I), который имеет интенсивную флуоресценцию при связывании с дцДНК и слабую флуоресценцию в свободном состоянии. Далее осуществляется

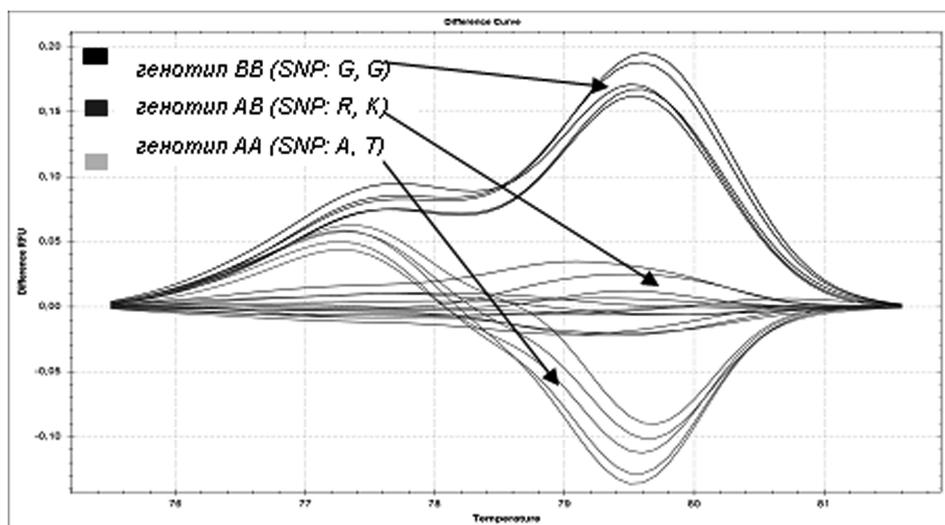


Рис. 3. Результаты HRM-анализа в программе Precision Melt Analysis™ software

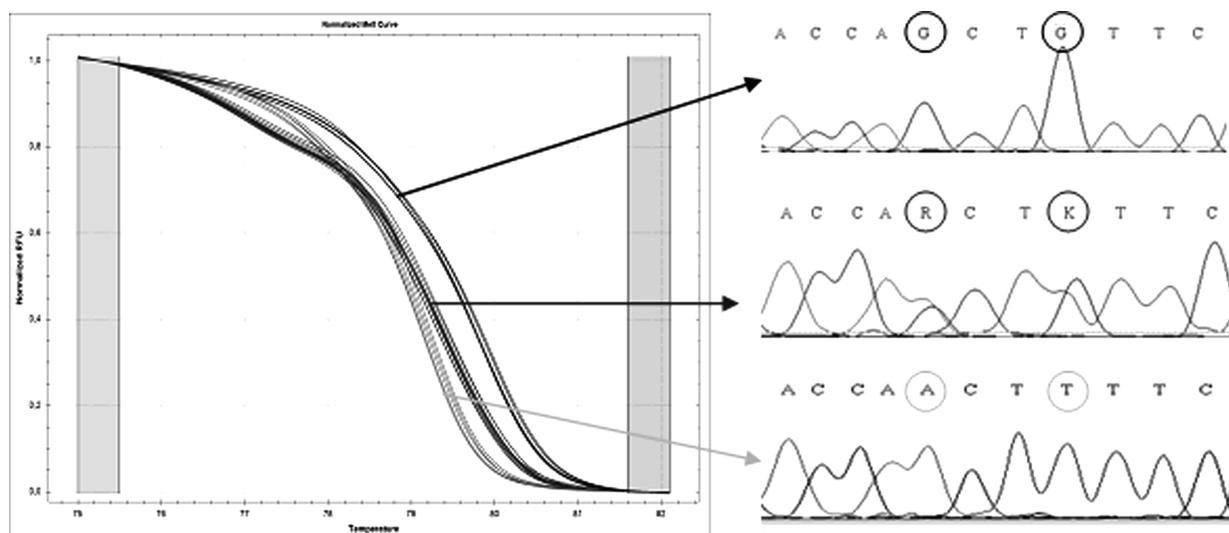


Рис. 4. Результаты пост-HRM секвенирования

плавление продукта: двойная спираль ДНК диссоциирует с высвобождением интеркалирующего красителя, что приводит к снижению уровня флуоресценции. Процесс изменения уровня флуоресценции в зависимости от температуры отслеживается с помощью специального программного обеспечения, которое преобразует полученные данные в виде графика кривой плавления. При изменении в структуре ДНК кривая плавления меняется. Эта разница может быть очень небольшой, в доли градуса, однако даже с помощью этой разницы можно выявлять однонуклеотидные замены (SNP), небольшие инсерции, делеции и метилирование ДНК.

HRM-анализом подтверждены генотипы животных по гену *ESR1*, выявленные методом ПЦР–ПДРФ. Эффективность HRM-анализа в сравнении с ПЦР–ПДРФ методом для определения полиморфизма *ESR1-PvuII* включает высокую чувствительность, низкий риск контаминации (ПЦР и плавление продукта амплификации происходит в 1 закрытой пробирке, с последующим анализом результатов с помощью компьютерного программного обеспечения, исключая этап электрофореза), воспроизводимые и точные результаты, минимальные временные затраты и низкую стоимость.

Заключение. Технология HRM-анализа характеризуется высокой чувствительностью и специфичностью, является быстрой по времени и недорогой по стоимости, что позволяет использовать ее как экспресс-метод для выявления полиморфизма *ESR1-PvuII* для массового скрининга животных в селекционно-племенной работе в свиноводстве.

Развитие молекулярно-генетических исследований и ДНК-технологий позволяет выявлять предпочтительные аллели и генотипы, что дает возможность прогнозировать развитие хозяйственно полезных признаков у животных для быстрого введения в популяцию особей желаемого генотипа с целью повышения рентабельности производства свинины.

Литература

1. Эрнст Л. К., Зиновьева Н. А. Биотехнология в животноводстве. М., 2008. – 510 с.
2. Terman A., Kmiec M., Polasik D. // Arch. Tierz., Dummerstorf. 2006. N 49. P. 71–76.
3. Сметник А. А. // Проблемы репродукции. 2011. № 3. С. 31–37.
4. Munoz G., Ovilo C., Estelle J. // Genet. Sel. 2007. Vol. 39. P. 195–206.
5. Зиновьева Н. А., Гладырь Е. А., Эрнст Л. К., Брем Г. Введение в молекулярно-генную диагностику сельскохозяйственных животных. М., 2002. С. 68–70.
6. Шейко И. П., Лобан Н. А., Василюк О. Я., Драбинович Д. С. // Весці НАН Беларусі. Сер. аграрных навук. 2006. № 3. С. 77–81.
7. Short T. H., Rothschild M. F., Southwood O. I., McLaren D. G. // J. Animal Science. 1997. N 75. P. 3138–3142.

M. E. MIKHAILOVA, E. L. RAMANISHKA

M. Mikhailova@igc.bas-net.by, LenaRamanishko@mail.ru

EVALUATION OF THE POLYMORPHISM *ESR1-PVUII* OF THE ESTROGEN RECEPTOR GENE IN PIGS USING THE PCR–RFLP METHOD AND THE HRM-ANALYSIS TECHNOLOGY

Summary

The DNA typing for the estrogen receptor gene (*ESR1*) in pigs is proposed to carry out with the aid of the technology of the HRM-analysis (High Resolution Melting) and continue to use it as an express method for mass screening of breeding animals in order to increase the fertility and to improve the breeding animals process in the pig. Assessed polymorphism *ESR1-PvuII* of the estrogen receptor gene in the Belarusian large white pigs ($n = 51$) with the use of the HRM-analysis, which is highly sensitive and cost-effective as compared to the traditional PCR-RFLP method. The conditions for real-time PCR are worked out, the accuracy of identification of genotypes AA, BB, AB is confirmed, and the effectiveness of the HRM-method is also analyzed.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 504.3.054

*С. В. КАКАРЕКА, О. Ю. КРУКОВСКАЯ***ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИОКСИДА АЗОТА
В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ МИНСКА***(Представлено академиком В. Ф. Логиновым)**Институт природопользования НАН Беларуси, Минск**Поступило 23.06.2014*

Введение. Для условий городской застройки характерна высокая неоднородность концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, что усложняет оценку качества воздушной среды на основании данных стационарного мониторинга. В наибольшей степени поля концентраций загрязняющих веществ неоднородны в городах при плотной высотной застройке вдоль улиц с интенсивным движением автомобильного транспорта. Впервые особые условия рассеивания выбросов от передвижных источников на городских улицах были отмечены в 1970-х годах [1]. Было установлено, что на улицах, где высота зданий сопоставима или превышает ширину улицы, формируются зоны практически замкнутой циркуляции, названные «уличными каньонами». Различные аспекты распределения концентраций загрязняющих веществ в условиях городской застройки отражены в [2; 3]. Вместе с тем наличие замкнутой циркуляции в «уличных каньонах» в городах Беларуси ранее не отмечалось и экспериментальные исследования распространения примесей в таких условиях не проводились.

Цель исследования – выявление зон специфической циркуляции воздуха в Минске и изучение особенностей распространения загрязняющих веществ в них. Исследование выполнено на примере диоксида азота – одного из приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха в городах Беларуси, поступление которого на 67 % определяется автомобильным транспортом.

Материалы и методы исследования. Вследствие особенностей планировки в Минске большая часть улиц с интенсивным движением транспорта характеризуется благоприятными условиями рассеяния примесей загрязняющих веществ и выноса их за пределы города. Вместе с тем в центральной части города расстояние между прилегающими к улице зданиями часто на отдельных участках не превышает 30 м.

В качестве объектов исследования были выбраны 10 участков улиц в центральной и восточной частях Минска, в том числе два участка в центральной части, которые по параметрам относятся к «уличным каньонам»: ул. Сурганова вблизи пересечения с пр. Независимости и ул. Куйбышева вблизи пр. Машерова. На ул. Сурганова в качестве объекта исследования был выбран участок длиной 230 м между пересечением с пр. Независимости и ул. К. Чорного, ориентированный с юго-востока на северо-запад. Высота зданий по обеим сторонам ул. Сурганова на данном участке составляет около 25 м, ширина улицы – 29 м. Движение транспорта на данном участке двухстороннее по трем полосам в каждом направлении суммарной среднесуточной интенсивностью 2600 ед/ч. На ул. Куйбышева был выбран участок длиной 110 м между пр. Машерова и ул. Киселева, ориентированный с юго-запада на северо-восток. Высота зданий составляет на выбранном участке 20 м, ширина улицы – 23 м. Улица имеет районное значение; движение осуществляется по двум полосам в каждом направлении суммарной среднесуточной интенсивностью 1600 ед/ч.

Измерение концентраций диоксида азота выполнялось в 2011–2013 гг. по стандартизированной методике путем аспирирования воздуха в течение 20 мин на барботеры с последующим фотометрическим определением [4]. В рамках исследования опробование выполнялось на расстоянии 1–3 м от края проезжей части с подветренной стороны улицы, в «уличных каньонах» – синхронно с двух сторон. В качестве контрольных использованы данные о содержании диоксида азота на автоматических постах сети Национальной системы мониторинга окружающей среды (НСМОС) в Минске и на постоянных площадках.

Всего выполнено 176 измерений содержания диоксида азота вблизи проезжей части 10 участков улиц Минска, в том числе 43 измерения содержания диоксида азота в «уличных каньонах», составляющие 11 серий по 3–4 измерения в каждой.

В Минске в сроки опробования в выбранных «уличных каньонах» было облачно, температура воздуха находилась в диапазоне 15,5–19,8 °С, преобладал слабый ветер западного и северо-западного направлений. Сторона улицы (наветренная/подветренная) устанавливалась по отношению к направлению ветра на уровне крыш зданий. В сроки выполнения экспериментальных исследований содержание диоксида азота в атмосферном воздухе в Минске составило 16–56 мкг/м³ (июль 2012 г.), 24–92 мкг/м³ (июль 2013 г.). За период 2008–2013 гг. ветры западного направления зарегистрированы в Минске в 10,6 % наблюдений, северо-западного – 14,0 % наблюдений.

Результаты и их обсуждение. Полученные средние концентрации диоксида азота в атмосферном воздухе приведены в табл. 1. Вблизи изучаемых участков улиц среднее содержание диоксида азота составило 81,0 мкг/м³, что в 2,9 раз выше фонового содержания данного загрязняющего вещества в Минске по данным наблюдений на станциях НСМОС.

Т а б л и ц а 1. Среднее содержание NO₂ в атмосферном воздухе вблизи участков дорог Минска

Место отбора	Средняя интенсивность движения транспорта, ед/час	NO ₂ , мкг/м ³	Кратность превышения содержания в жилой зоне
ул. Скорины, 10	984	47,0	1,69
ул. Филимонова, 63	1545	48,5	1,75
пр-т Независимости, 95	4119	60,2	2,17
ул. Куйбышева, 45	561	60,5	2,18
Круглая площадь	2089	68,1	2,45
МКАД, 2-й км	5310	69,0	2,49
ул. Филимонова, 24	942	82,4	2,97
ул. Бобруйская, 7	1716	82,8	2,98
ул. Радиальная, 52	1838	129,8	4,67
ул. Сурганова, 14	1211	161,7	5,82
Среднее	2032	81,0	2,92

На отдельных участках улиц кратность превышения содержания диоксида азота в жилой зоне вблизи проезжей части изменялись в диапазоне 1,7–5,8 раз. Измеренные концентрации в «уличных каньонах» составили на ул. Сурганова – 45–244 мкг/м³, на ул. Куйбышева – 20–121 мкг/м³ (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Содержание диоксида азота в атмосферном воздухе «уличных каньонов»

Серия	Место отбора	Дата	Время	Содержание NO ₂ , мкг/м ³	
				диапазон	среднее
1	ул. Сурганова, 14	16.07.2012	10.25–10.45	45,0–177,8	113,8
2			10.50–11.10	141,9–200,2	167,4
3			11.25–11.45	178,3–243,8	216,5
4			12.10–12.30	134,6–171	533,9
5	ул. Куйбышева, 45	18.07.2012	11.35–11.55	19,9–106,3	61,7
6			12.10–12.30	25,2–99,2	58,1
7			12.40–13.00	46,3–106,7	88,0
8	ул. Куйбышева, 45	16.07.2013	11.05–11.25	32,5–54,7	46,9
9			11.25–11.45	32,4–120,9	82,2
10			12.10–12.30	28,0–76,7	52,4
11			12.47–13.07	45,9–54,8	49,2

Установлено, что среднее содержание диоксида азота в пределах «уличных каньонов» выше, чем вблизи других автомобильных дорог со сходной интенсивностью движения транспорта.

В пределах «уличных каньонов» отмечены повышенные в 4,6 раз концентрации диоксида азота по отношению к средним концентрациям в городе, что существенно (в 2,7–3,5 раз) выше, чем по данным наблюдений на станциях НСМОС, расположенных вблизи автомобильных дорог.

Оценка содержания диоксида азота с различных сторон (подветренной и наветренной) «уличных каньонов» относительно направления ветра на уровне крыш зданий показала статистически значимые различия для отдельных опробований. Среднее измеренное содержание диоксида азота в «уличном каньоне» на ул. Сурганова составило 161,7 мкг/м³, в том числе с подветренной стороны – 145,1 мкг/м³, с наветренной – 178,6 мкг/м³. Аналогично в «уличном каньоне» на ул. Куйбышева, концентрация диоксида азота с подветренной стороны составила 50,7 мкг/м³, что меньше, чем с наветренной, где в среднем наблюдалась концентрация диоксида азота 71,0 мкг/м³. При этом в пределах каждого из рассматриваемых «уличных каньонов» различие между концентрациями диоксида азота с наветренной и подветренной сторон статистически значимо.

Более высокие концентрации диоксида азота с наветренной стороны отмечены в 9 сериях опробований из 11. Соотношение между средним измеренным содержанием диоксида азота с наветренной и подветренной сторон на ул. Куйбышева составляет 1,40, на ул. Сурганова – 1,23. Следовательно, для «уличного каньона» с более выраженными особенностями циркуляции отмечается большее различие между концентрациями с подветренной и наветренной.

В ходе отбора проб воздуха интенсивность движения транспортных средств составила 987–2622 ед/ч. Для участка по ул. Сурганова отмечена интенсивность движения в среднем 2422 ед/ч, что более чем в 2 раза превышает интенсивность по ул. Куйбышева (1123 ед/ч). Полученные значения интенсивностей движения соответствуют 70–88 % среднесуточной часовой интенсивности на данных участках улиц (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Интенсивность движения транспорта в период опробования

Серия	Место отбора	Дата	Время	Интенсивность движения транспорта		
				Фактическая за время опробования (20 мин) в разрезе категорий и направлений (легковые/грузовые/малые коммерческие/автобусы/тракторы/мотоциклы)		маш/ч
				нечетная сторона	четная сторона	
1	ул. Сурганова, 14	16.07.2012	10.25–10.45	311/13/32/1/0/0	339/27/44/2/2/0	2313
2		16.07.2012	10.50–11.10	412/15/35/1/1/2	305/28/42/5/3/0	2547
3		16.07.2012	11.25–11.45	348/25/32/0/2/0	382/31/50/0/4/0	2622
4		16.07.2012	12.10–12.30	297/10/40/0/2/0	321/22/40/0/3/0	2205
5	ул. Куйбышева, 45	18.07.2012	11.35–11.55	209/2/37/0/4/0	140/3/16/0/1/0	1236
6		18.07.2012	12.10–12.30	140/1/15/0/3/0	162/2/18/0/1/0	1026
7		18.07.2012	12.40–13.00	190/0/28/0/5/0	186/4/18/0/1/0	1296
8		16.07.2013	11.05–11.25	151/5/10/1/0/0	134/7/16/4/0/1	987
9		16.07.2013	11.25–11.45	160/5/17/1/0/0	157/6/17/4/0/0	1101
10		16.07.2013	12.10–12.30	160/5/18/1/0/0	183/2/19/4/0/0	1176
11		16.07.2013	12.47–13.07	141/4/14/0/1/0	168/1/14/1/0/0	1032

Установлено, что между интенсивностью движения и измеренным содержанием диоксида азота в атмосферном воздухе в «уличных каньонах» наблюдается статистически значимая линейная зависимость, не выявленная при других условиях рассеяния в городе. В целом наблюдается закономерная тенденция к увеличению выбросов оксидов азота с увеличением интенсивности движения транспорта, которая также зависит от структуры транспортного потока. При общей интенсивности 988 ед/ч, увеличение доли грузовых автомобилей и автобусов с 5 до 10 % приведет к росту выбросов оксидов азота на 22 %.

Был выполнен расчет выбросов диоксида азота от автомобильного транспорта за период опробования с использованием модели COPERT 4 с учетом интенсивности движения транспорт-

ных средств в разрезе категорий и экологических классов, метеорологических условий, характеристик топлива и других показателей [5]. Выбросы диоксида азота при различной интенсивности и структуре транспортных потоков за период опробования (20 мин) составили на ул. Сурганова от 113,7 до 127,7 мг/км, на ул. Куйбышева – от 43,4 до 76,5 мг/км. Наибольший вклад в выбросы диоксида азота во всех сериях опробования внесли малые коммерческие грузовые (30–46 %) и легковые (32–63 %) автомобили (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Поступление диоксида азота в атмосферный воздух от автомобильного транспорта в пределах «уличных каньонов» за период опробования (20 мин), мг NO₂/км

Серия	По категориям транспортных средств					По направлениям движения		Всего	
	легковые автомобили	грузовые автомобили	малые коммерческие грузовые автомобили	автобусы	тракторы	нечетная сторона	четная сторона	мг/км	мг
1	42,1	22,1	45,4	3,0	1,1	68,2	45,5	113,7	26,2
2	46,5	23,8	48,8	5,9	2,2	80,2	47,1	127,3	29,3
3	47,3	31,0	46,1	0,0	3,3	77,3	50,3	127,7	29,4
4	40,0	17,7	54,8	0,0	2,8	75,7	39,6	115,3	26,5
5	22,7	2,8	48,3	0,0	2,8	63,2	13,3	76,5	8,4
6	19,7	1,7	21,0	0,0	2,2	30,1	14,5	44,5	4,9
7	24,5	2,2	37,3	0,0	3,3	50,2	17,1	67,3	7,4
8	18,4	6,6	14,4	4,9	0,0	25,9	18,5	44,4	4,9
9	20,5	6,1	23,2	4,9	0,0	35,2	19,5	54,8	6,0
10	22,2	3,9	24,7	4,9	0,0	36,5	19,2	55,7	6,1
11	20,0	2,8	19,1	1,0	0,6	29,3	14,1	43,4	4,8

Связь между уровнем выбросов и средним содержанием диоксида азота в пределах уличных каньонов статистически достоверно описывается линейной зависимостью. Принимая в качестве городского фона среднее содержание диоксида азота в ландшафтно-рекреационной зоне Минска – 31,6 мкг/м³, согласно [6], связь между выбросами и концентрацией может быть описана зависимостью

$$C_{\text{NO}_2} = 4,90E_{\text{NO}_2} + 31,6,$$

где C_{NO_2} – содержание диоксида азота в атмосферном воздухе, мкг/м³; E_{NO_2} – выбросы диоксида азота, мкг/м. Линейная зависимость с такими коэффициентами является статистически достоверной и объясняет 85 % дисперсии измеренного содержания диоксида азота.

В соответствии с полученной регрессионной линейной моделью, в условиях изучаемых «уличных каньонов» увеличение интенсивности движения, приводящее к увеличению выбросов диоксида азота на 1 г, увеличивает в свою очередь его концентрацию в атмосферном воздухе на обочине дороги на высоте 1,5 м на 4,9 мкг/м³.

Полученные результаты в целом согласуются с наблюдениями, выполненными в других городах Европы (Лондоне, Париже, Копенгагене, Берлине), и результатами моделирования распространения примесей в условиях «уличных каньонов». Максимальные суточные значения на высоте 1–2 м отмечаются в диапазоне 50–340 мкг/м³ при направлении ветра, близком к перпендикулярному направлению улицы [7]. Следовательно, представленные результаты исследований концентраций диоксида азота в пределах «уличных каньонов» близки к максимальным наблюдаемым их значениям в местах опробования. Превышение концентраций в «уличных каньонах» по отношению к среднему содержанию в городах составляет 2,5–4,5 раза и отмечается во всех случаях проведения подобных сравнений [8].

Отношение высоты зданий, прилегающих к улице, к расстоянию между ними (ширина проезжей части, зеленая зона, тротуар), определяющее особенности циркуляции атмосферного воздуха в «уличном каньоне», на ул. Сурганова составляет 0,86, на ул. Куйбышева – 0,87. При таком соотношении сторон «уличного каньона» формируется поле ветра и концентраций с одним центром, смещенным к подветренной стороне [9]. Соотношение концентраций на различных сторо-

нах «уличного каньона» зависит от скорости ветра и изменяется в пределах 1,2–2,6 раз в диапазоне скорости ветра 1–9 м/с [10]. Следовательно, полученное в данном исследовании значение различий содержания диоксида азота в 1,2–1,4 раза приближается к нижней границе диапазона различий, что может быть объяснено невысокой скоростью ветра в сроки опробования.

Таким образом, экспериментально подтверждено наличие на территории Минска «уличных каньонов» и существенная неоднородность распространения диоксида азота в атмосферном воздухе, проявляющаяся в повышенном на 21–40 % содержании диоксида азота с наветренной стороны относительно направления ветра на уровне крыш зданий. Различие между концентрациями на сторонах «уличного каньона» возрастает при увеличении соотношения высоты зданий к ширине улицы. Сопоставление полученных результатов с аналогичными исследованиями позволяет сделать вывод, что измеренные концентрации диоксида азота при аналогичных интенсивностях движения являются одними из наиболее высоких, наблюдаемых в данных «уличных каньонах», однако различие между содержанием с наветренной и подветренной сторон может возрастать до 2,5 раз при скорости ветра 8–9 м/с. Следовательно, при высокой скорости ветра (5 м/с и более) в городе в целом формируются благоприятные условия рассеивания загрязняющих веществ, тогда как в «уличных каньонах» могут формироваться локальные зоны очень высоких концентраций. Помимо обследованных, к улицам, где могут создаваться такие условия, в Минске могут быть отнесены участки улиц Кирова, Энгельса, Маркса, Комсомольской, Волгоградской, Интернациональной, Киселева, Первомайской и некоторые другие, а также некоторые улицы в других городах Беларуси.

Литература

1. Hoydysh W. G., Griffiths R. A., Ogawa Y. // APCA Paper. 1974. N 14. P. 175.
2. DePaul F. T., Sheih C. M. // *Atm. Env.* 1985. Vol. 19, N 4. P. 555–559.
3. Georgii H. W., Busch E., Weber E. Investigation of the temporal and spatial distribution of the emission concentration of carbon monoxide in Frankfurt/Main. Report of the Institute for Meteorology and Geophysics, University of Frankfurt/Main, 1967.
4. Сборник методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении измерений в области охраны окружающей среды: В 3 ч. Минск. 2011. Ч. 3. С. 26.
5. Ntziachristos L., Gkatzoflias D., Kouridis C., Samaras Z. // *Information technologies in environmental engineering*. 2009. P. 491.
6. Круковская О. Ю. // Молодежь в науке-2013: прил. к журн. «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі»: В 5 ч. Минск, 2014. Ч. 1. С. 53.
7. Berkowicz R., Palmgren F., Hertel O., Vignati E. // *Science of the total environment*. 1996. Vol. 189. P. 259–265.
8. Ghenu A., Rosant J.-M., Sini J.-F. // *Environmental Modelling & Software*. 2008. Vol. 23, N 3. P. 314.
9. Sini J. F., Anquetin S., Mestayer P. G. // *Atm. Env.* 1996. Vol. 30(15). P. 2659.
10. Vardoulakis S., Valiantis M., Milner J., ApSimon H. // *Atm. Env.* 2007. Vol. 41(22). P. 4622.

S. V. KAKAREKA, O. Y. KRUKOWSKAYA

sk001@yandex.ru

PECULIARITIES OF THE NITROGEN DIOXIDE DISTRIBUTION IN THE ATMOSPHERIC AIR OF THE ROAD NETWORK IN MINSK

Summary

Results of the first studied peculiarities of the nitrogen dioxide distribution in the atmospheric air in Minsk based on measurements in special conditions in ‘street canyons’ are described. It is shown that the ratio between ‘street canyons’ and background mean air concentrations of nitrogen dioxide is 2.2–5.8. In accordance to measurements, the nitrogen dioxide concentration on the windward side of street canyons is 1.2–1.4 times greater than its content on the leeward when the wind direction is close to the perpendicular direction of the street. A relation between emissions of nitrogen dioxide from vehicles based on the structure of traffic flows and nitrogen dioxide concentrations in street canyons in Minsk is evaluated.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.78.001, 621.793.18

*Академик П. А. ВИТЯЗЬ, А. А. ШМАТОВ, О. Г. ДЕВОЙНО***УПРОЧНЕНИЕ БЫСТРОРЕЖУЩИХ И ШТАМПОВЫХ СТАЛЕЙ
МЕТОДОМ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ***Белорусский национальный технический университет, Минск**Поступило 23.06.2014*

Уровень развития современной техники характеризуется высокой интенсивностью эксплуатации стальных инструментов. Особо актуальна проблема повышения стойкости тонких, мелко-размерных, длинномерных и ударных инструментов с малым ресурсом работы, поскольку любое значительное повышение твердости и прочности сталей закономерно увеличивает их хрупкость. Поэтому ученые вынуждены создавать принципиально новые материалы с композиционными структурами, в которых оптимально сочетаются взаимно противоположные критерии прочности и надежности. С помощью упрочняющей обработки можно сформировать такие композиционные структуры, которые присущи нанокompозитным, градиентным, дискретным и мозаично-дискретным материалам [1–11].

В настоящее время известны различные технологии упрочнения стальных режущих и штамповых инструментов, однако не все методы могут сформировать необходимые композиционные структуры. Наибольший научный и практический интерес в этом плане представляет простой и производительный способ упрочняющей термоциклической обработки (УТЦО), который повышает взаимно противоположные свойства сталей: прочность (твердость) наряду с вязкостью разрушения [2–5].

При УТЦО инструментальных сталей реализуется теория метастабильности систем, согласно которой наилучшие показатели свойств достигаются при получении метастабильных структур [12]. В отличие от традиционной термообработки при УТЦО появляются дополнительные источники воздействия на структуру сталей, основными из которых являются циклические твердофазные превращения, градиенты температур, термические и межфазовые напряжения. Авторами настоящей работы предложена гипотеза создания при УТЦО метастабильных структур сталей путем быстрой циклической смены параметров процесса и твердофазных превращений. При многократном повторении операций нагрева и охлаждения выше и ниже температуры фазовых превращений протекают два противоположных процесса: фазового наклепа и рекристаллизации, что в итоге приводит к измельчению всех составляющих структуры сталей [13; 14]. При этом проявляется эффект структурной наследственности, когда от цикла к циклу накапливаются положительные изменения в структуре, которые существенно улучшают эксплуатационные свойства сталей.

В настоящей работе все исследования проведены на быстрорежущих сталях P18, P6M5 и ударно-штамповой стали У8, которые подвергали УТЦО. Этот процесс осуществляли путем многократного нагрева и охлаждения сталей выше и ниже критической точки A_1 с окончательным закалочным охлаждением и последующим традиционным отпуском [2–5]. Максимальная температура цикла соответствовала температуре нагрева сталей под закалку: 1270 °С для P18, 1220 °С для P6M5, 810 °С для У8, а минимальная температура цикла была не ниже комнатной (20 °С). Для термоциклирования сталей применяли две соляные ванны или печи.

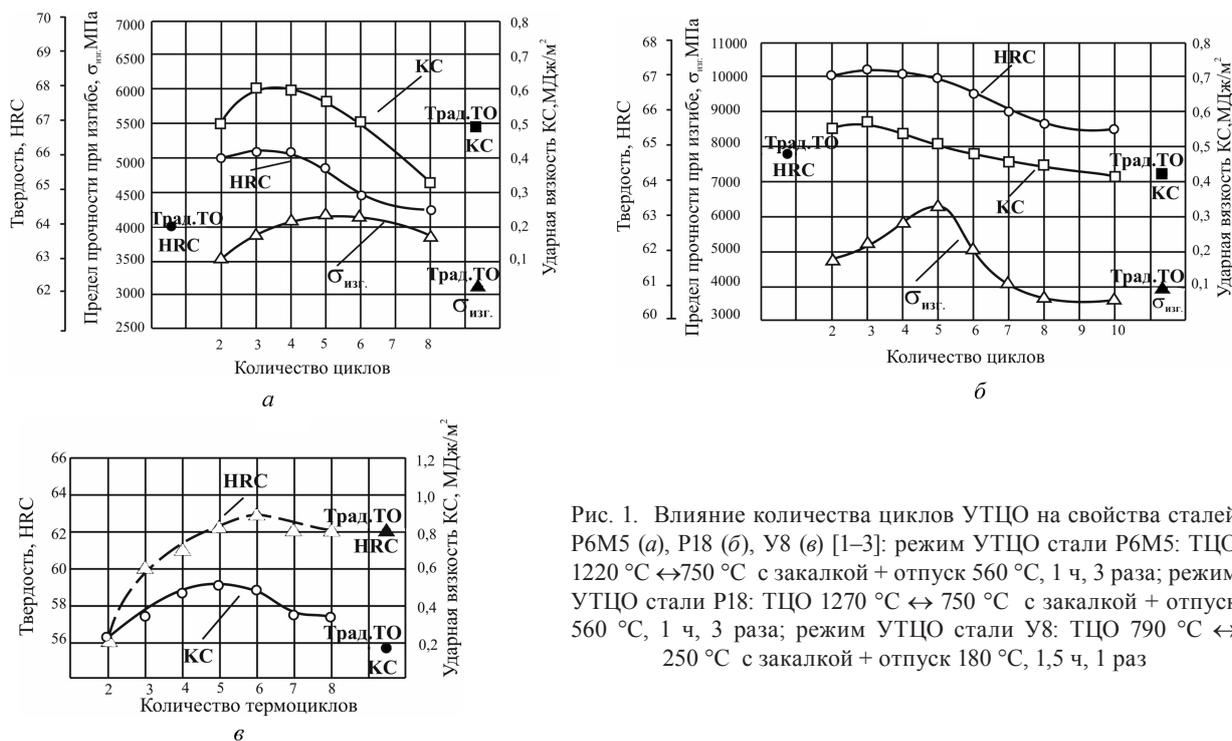


Рис. 1. Влияние количества циклов УТЦО на свойства сталей P6M5 (а), P18 (б), У8 (в) [1–3]: режим УТЦО стали P6M5: ТЦО 1220 °C ↔ 750 °C с закалкой + отпуск 560 °C, 1 ч, 3 раза; режим УТЦО стали P18: ТЦО 1270 °C ↔ 750 °C с закалкой + отпуск 560 °C, 1 ч, 3 раза; режим УТЦО стали У8: ТЦО 790 °C ↔ 250 °C с закалкой + отпуск 180 °C, 1,5 ч, 1 раз

На основании изучения влияния параметров процессов УТЦО на механические свойства сталей P18, P6M5, У8 впервые установлен новый детерминированный по времени эффект упрочнения инструментальных сталей в условиях циклически повторяющихся твердофазных превращений и создания большого градиента температур (450–550 °C) [2–4]. Это означает, что свойства сталей: ударная вязкость КС, прочность при изгибе $\sigma_{изг}$ и твердость HRC повышаются только в начальный период циклической обработки, в частности, для быстрорежущих сталей P18, P6M5 при проведении 3–5 термоциклов, для штамповой стали У8 при 4–6 термоциклах; а затем с увеличением времени процесса рабочие характеристики сталей снижаются из-за деградации их структуры (рис. 1).

С помощью синтез-технологий определены оптимальные температурно-временные режимы УТЦО инструментальных сталей P18, P6M5 и У8. В результате оптимизации этого процесса достигнуто, по сравнению с традиционной термообработкой, увеличение предела прочности при изгибе инструментальных сталей на 31–56 %, наряду с повышением ударной вязкости – в 1,2–

Т а б л и ц а 1. Содержание элементов в матрице стали P18

Элемент	Содержание элементов в мартенсите ± ошибка прибора, % по массе	Среднее значение
Традиционная термообработка		
W	8,1 ± 0,9; 8,9 ± 0,9; 7,7 ± 0,9; 8,9 ± 0,9; 9,0 ± 0,9; 7,7 ± 1,0; 9,0 ± 1,0; 9,2 ± 1,1; 8,2 ± 1,1; 8,6 ± 1,1; 7,0 ± 1,0; 8,7 ± 1,3; 9,3 ± 1,4; 7,9 ± 1,4; 7,3 ± 0,1	8,4 (7,0–9,2)
Cr	4,2 ± 0,2; 4,3 ± 0,2; 4,4 ± 0,2; 4,6 ± 0,2; 4,7 ± 0,2; 4,6 ± 0,2; 4,9 ± 0,2; 4,7 ± 0,2; 4,5 ± 0,2; 4,4 ± 0,2; 5,0 ± 0,2; 4,6 ± 0,2; 4,4 ± 0,2; 4,6 ± 0,3; 4,8 ± 0,2	4,6 (4,2–5,0)
V	1,0 ± 0,1; 0,9 ± 0,1; 0,9 ± 0,1; 1,2 ± 0,1; 0,9 ± 0,1; 0,9 ± 0,1; 0,9 ± 0,1; 1,1 ± 0,1; 0,9 ± 0,1; 0,7 ± 0,1; 0,8 ± 0,1; 1,1 ± 0,2; 1,0 ± 0,2; 0,9 ± 0,1; 1,0 ± 0,1	0,9 (0,7–1,2)
Оптимальный режим УТЦО (2 цикла)		
W	9,4 ± 1,1; 16,2 ± 1,2; 13,9 ± 1,2; 11,7 ± 0,7; 10,1 ± 0,7; 12,3 ± 0,7; 16,5 ± 1,4; 7,4 ± 1,0; 13,9 ± 1,2; 9,3 ± 1,0	12,1 (7,4–16,5)
Cr	4,5 ± 0,2; 4,7 ± 0,2; 4,3 ± 0,2; 4,6 ± 0,1; 4,8 ± 0,1; 4,7 ± 0,1; 4,4 ± 0,2; 4,6 ± 0,2; 4,6 ± 0,2; 4,7 ± 0,2	4,6 (4,3–4,8)
V	1,3 ± 0,1; 0,9 ± 0,1; 1,0 ± 0,1; 1,2 ± 0,1; 1,2 ± 0,1; 1,1 ± 0,1; 1,2 ± 0,2; 0,9 ± 0,1; 1,2 ± 0,1; 1,2 ± 0,1	1,1 (0,9–1,3)

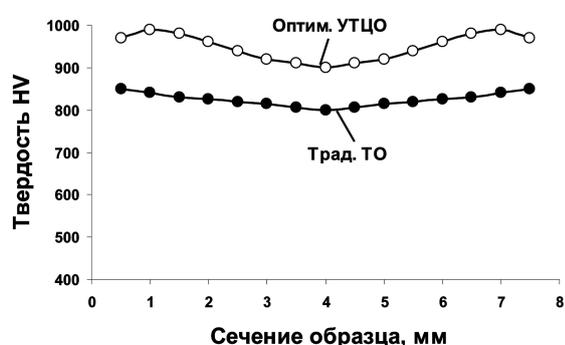
Т а б л и ц а 2. Измерения микротвердости в матрице стали У8

Микротвердость $H_{ц}$ в мартенситной матрице \pm ошибка прибора, МПа	Среднее значение $H_{ц}$, МПа
Традиционная термообработка	
6360 \pm 700; 7130 \pm 700; 6360 \pm 700; 7130 \pm 700; 7130 \pm 700; 5700 \pm 500; 7130 \pm 700; 6360 \pm 700; 7130 \pm 700; 6360 \pm 700; 7130 \pm 700; 8050 \pm 800; 7130 \pm 700; 7130 \pm 700	6870 (5700–8050)
Оптимальный режим УТЦО (4 цикла)	
3300 \pm 250; 7130 \pm 700; 4670 \pm 450; 9150 \pm 800; 8050 \pm 800; 10510 \pm 900; 6360 \pm 700; 7130 \pm 700; 8050 \pm 800; 7130 \pm 700; 8050 \pm 800; 3300 \pm 250; 5700 \pm 500; 8050 \pm 800; 1890 \pm 200; 7130 \pm 700; 6360 \pm 700; 4260 \pm 400; 7130 \pm 700; 2630 \pm 250; 9150 \pm 800; 7130 \pm 700; 9150 \pm 800; 10510 \pm 900; 7130 \pm 700; 8050 \pm 800; 7130 \pm 700; 9150 \pm 800	6910 (1890–10510)

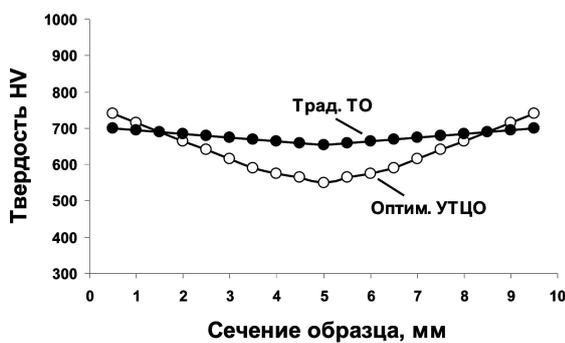
П р и м е ч а н и е. * – микротвердомер – ПМТ-3; нагрузка индентора – 0,1 Н.

13 раз при подъеме твердости сталей Р6М5, Р18 на 1–2 единицы (HRC 65-67) и сохранении прежней твердости (HRC 59-60) стали У8 [2–5].

При УТЦО реализуются структурно-энергетические механизмы упрочнения и выполняются все условия формирования композиционных структур, обеспечивающих синергизм критериев прочности и надежности [6–15]. Исследования показали, что от поверхности к сердцевине образцов из сталей Р18 и У8 их твердость HV снижается (рис. 2). Также формируется композитная структура, в которой зерна имеют значительный разброс по содержанию легирующих элементов W, V, С и др. (табл. 1) с гораздо большим диапазоном изменения микротвердости (табл. 2, рис. 3), чем при традиционной термообработке.



а



б

Рис. 2. Распределение твердости HV по сечению образцов из стали Р18 (а) и стали У8 (б), подвергнутых традиционной ТО и оптимальной УТЦО: режим традиционной ТО стали Р18: закалка от 1270 °С + отпуск 560 °С, 1 ч, 3 раза; режим УТЦО стали Р18: ТЦО 1270 °С \leftrightarrow 750 °С, 3 цикла с закалкой + отпуск 560 °С, 1 ч, 3 раза; режим традиционной ТО стали У8: закалка от 790 °С + отпуск 200 °С, 2 ч; режим УТЦО: ТЦО 780 °С \leftrightarrow 230 °С, 4 цикла, с закалкой + отпуск 200 °С, 2 ч. Условия измерения твердости: автоматический прибор «Zwick», нагрузка индентора – 10 Н

исходя из сталей Р18 и У8 их твердость HV снижается (рис. 2). Также формируется композитная структура, в которой зерна имеют значительный разброс по содержанию легирующих элементов W, V, С и др. (табл. 1) с гораздо большим диапазоном изменения микротвердости (табл. 2, рис. 3), чем при традиционной термообработке.

Таким образом, согласно классификации [1; 6; 7], при УТЦО формируются два типа композиционных структур: мозаично-дискретная структура матрицы (рис. 4, а), состоящая из оптимально чередующихся микро- и мезоэлементов (зерен и субзерен размером более 100 нм) с разным содержанием элементов и уровнем твердости; функ-

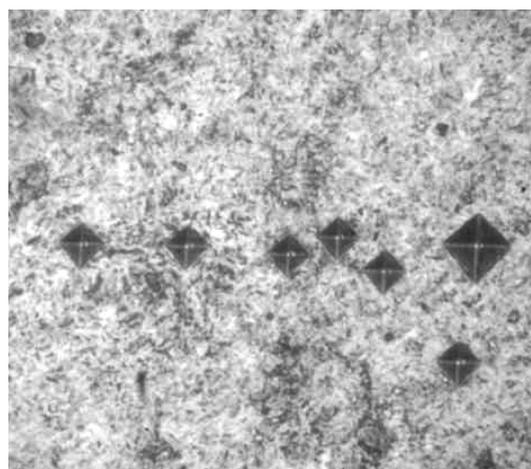


Рис. 3. Распределение средней твердости $H_{ц}$ по сечению образца (10 мм \times 10 мм) из стали У8, подвергнутой оптимальной УТЦО: режим УТЦО: ТЦО 780 °С \leftrightarrow 230 °С, 4 цикла, с закалкой + отпуск 200 °С, 2 ч. Условия измерения микротвердости: прибор ПМТ-3, нагрузка индентора – 0,1 Н

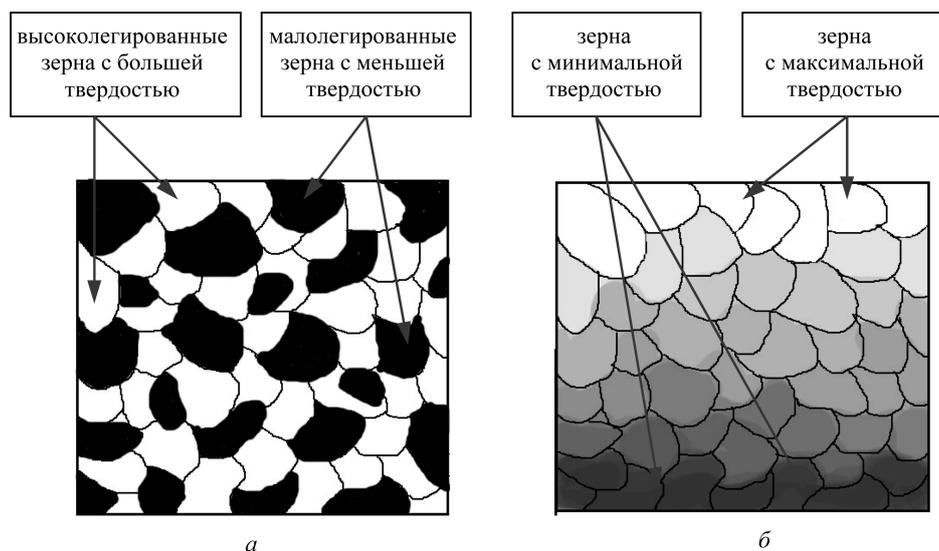


Рис. 4. Схематическое изображение композиционных структур, создаваемых при УТЦО: *а* – композиционная структура стали, состоящая из чередующихся зерен мало- и высоколегированного мартенсита; *б* – функционально-градиентная структура стали, в которой твердость и хрупкость снижаются от поверхности к сердцевине

ционально-градиентная структура (рис. 4, *б*), в которой микроэлементы (зерна) направленно меняют свои свойства, а именно, от поверхности к сердцевине снижается их твердость и хрупкость.

Экспериментально доказано, что наибольший эффект упрочнения быстрорежущих и штамповых сталей при УТЦО создается благодаря максимальному дроблению зерен и снижению содержания остаточного аустенита; образованию бесструктурного мартенсита; из-за сфероидизации и измельчения вторичных карбидных частиц; значительного увеличения доли дисперсных карбидов и их равномерного распределения в матрице; а также за счет высокого насыщения легирующими элементами дисперсных карбидов и матрицы, что увеличивает уровень структурных напряжений в их кристаллической решетке [5; 13; 14].

В результате исследований разработана технология УТЦО для упрочнения инструментальных сталей с применением стандартного термического оборудования. Производственные испытания показали, что УТЦО позволяет увеличить стойкость различных видов инструментов в 1,4–12 раз, по сравнению с традиционно термообработанными. Причем наивысшие показатели стойкости достигнуты на тонких, длинномерных и ударных инструментах, используемых для резания труднообрабатываемых сплавов. Процесс внедрен в Беларуси и России на предприятиях «БелАЗ», «КЗТШ», «АГУ», «Экран», «ВТЗ» и др.

Литература

1. Витязь П. А., Шматов А. А., Девойно О. Г. // Докл. НАН Беларуси. 2013. Т. 57, № 1. С. 113–117.
2. Шматов А. А. и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. 2009. № 8. С. 19–25.
3. Шматов А. А. и др. // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. 2009. № 4. С. 53–58.
4. Шматов А. А. и др. // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. 2009. № 6. С. 20–25.
5. Шматов А. А. // Порош. металлургия. 2007. № 30. С. 309–316.
6. Шматов А. А. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 2. С. 33–40.
7. Шматов А. А., Жавнерко Г. К., Лисовская Ю. О. // Материаловедение. 2013. № 1. С. 43–50.
8. Щерба В. Я., Лисовский А. Л. Новые композиционные материалы. Новополоцк, 2009. – 220 с.
9. Антонюк В. С., Ляшенко Б. А., Сорока Е. Б. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 3. С. 49–50.
10. Лыгденов Б. Д. Фазовые превращения в сталях с градиентными структурами, полученными химико-термической и химико-термоциклической обработкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01. Новокузнецк, 2004. – 226 с.
11. Верецака А. С., Третьяков И. П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М., 1986. – 192 с.
12. Martin J. W., Doherty R. D. Stability of microstructure in metallic systems. London; New York; Melbourne, 1978. – 280 p.
13. Федюкин В. К. Научное обоснование и разработка технологий улучшающей термоциклической обработки металлических материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01. Санкт-Петербург, 1993. – 323 с.

14. *Гурьев А. М.* Экономнолегированные стали для литых штампов горячего деформирования и их термоциклическая и химико-термическая обработка: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.01. Томск, 2001. – 484 с.

15. *Приходько В. М., Петрова Л. Г., Чудина О. В.* Металлофизические основы упрочняющих технологий. М., 2003. – 384 с.

P. A. VITIAZ, A. A. SHMATOV, O. G. DEVOINO

shmatov@cosmostv.by

**STRENGTHENING OF HIGH SPEED AND STAMP STEELS
BY THE THERMOCYCLING HEAT TREATMENT METHOD**

Summary

The composite structure, mechanisms and nature of strengthening of tool steels subjected to strengthening thermo-cycling treatment are presented (STCT). The influence of the STCT process on the structure and mechanical properties of tool steels are examined. The developed technology permits increasing the wear resistance of steel tools by a factor of 1.4–12 in comparison with traditionally heat-treated ones.

УДК 532.516;620.9

В. Д. ТЮТЮМА

**РЕШЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ В СДВИГОВОМ ПОТОКЕ
ЛОКАЛЬНО-НЕРАВНОВЕСНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ***(Представлено академиком А. А. Михалевичем)**Институт энергетики НАН Беларуси, Минск**Поступило 06.08.2014*

Введение. Существенный недостаток современной теории движения вязких сред заключается в том, что не учитываются некоторые важные физические особенности взаимовлияния различных процессов в движущемся элементарном объеме. Для исчерпывающей характеристики поведения гидродинамической системы в целом одних балансных соотношений не достаточно. К ним необходима дополнительная информация о характерных временах протекания тепловых и механических процессов, так как в зависимости от их продолжительности и скорости могут возникать принципиально разные модели течения вязкой среды [1]. В общем случае в настоящее время пока отсутствует единая феноменологическая модель, которая охватывала бы все разнообразные случаи течения. Построены лишь теоретические модели для определенного класса задач. В связи с этим рассмотрим две теоретические модели – систему уравнений движения Навье–Стокса [2–4] и предложенную в [5] систему дифференциальных уравнений локально-неравновесного течения вязкой сжимаемой среды.

Первая модель относится к локально-равновесному движению, когда скорость объемного сжатия сопоставима со скоростью подвода тепла к материальной частице. При этом в процессе сжатия к выделенной частице подводится максимально возможное количество теплоты. Такая модель, в основном, применима только к весьма медленным термоконвективным течениям в поле внешних массовых сил.

Другая модель относится к локально-неравновесному движению, когда поля давления и плотности формируются в результате прохождения и интерференции звуковых волн и влияние теплообмена на процессы сжатия пренебрежимо мало.

Очевидно, что для убедительного подтверждения теории в том или ином случае необходим эксперимент, который позволил бы наиболее ярко отразить принципиальные различия между двумя концептуальными подходами к построению физической и математической модели движения вязкой сжимаемой среды. Теоретическое обоснование постановки такого важного эксперимента и рассматривается в данной работе. В основу постановки эксперимента можно положить характерные для каждой модели особенности развития гидродинамических процессов в сдвиговом течении Куэтта между двумя плоскими параллельными стенками, из которых одна покоится, а другая движется в собственной плоскости с постоянной скоростью U с учетом тепла диссипации, выделяющегося в результате трения.

1. Решение на основе системы уравнений Навье–Стокса Течение будем считать плоским, совершающимся в плоскости xu и направленным вдоль оси OX . В качестве движущейся стенки выберем бесконечную длинную полосу конечной ширины b , расположенную параллельно плоскости xz (рис. 1). Физические характеристики жидкости примем постоянными.

Гидродинамические уравнения в этом случае имеют решение

$$u(y) = U \frac{y}{h}; \quad (1)$$

$$p = \text{const.} \quad (2)$$

Если толщина зазора h мала по сравнению с шириной полосы b , то, пренебрегая краевыми эффектами, можно принять, что решение гидродинамической задачи (1) имеет место и для полосы конечной ширины.

Распределение температуры в зазоре постоянной толщины h для полосы бесконечной ширины было рассмотрено в [4]. Решение тепловой задачи в случае полосы конечной ширины рассмотрим для теплоизолированных стенок $\left(\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=0} = 0; \frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=h} = 0\right)$, предполагая, что температура на границах полосы $z = 0$ и $z = b$ равна температуре окружающей среды T_0 . Если коэффициент динамической вязкости μ и коэффициент теплопроводности λ принять постоянными величинами, то уравнение энергии для определения температуры в зазоре с учетом тепла диссипации принимает вид

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \mu \frac{U^2}{h^2} = 0. \quad (3)$$

Интегрируя это уравнение с учетом указанных выше граничных условий, для распределения температуры получим решение

$$\frac{T(z)}{T_0} = 1 + \mu \frac{U^2 b^2}{2T_0 \lambda h^2} \frac{z}{b} \left(1 - \frac{z}{b}\right). \quad (4)$$

Воспользовавшись уравнением состояния идеального газа

$$p = \rho RT, \quad (5)$$

после подстановки соотношения (2) и (4) в (5), для распределения плотности в щелевом зазоре получим выражение

$$\frac{\rho(z)}{\rho_0} = \left[1 + \mu \frac{U^2 b^2}{2T_0 \lambda h^2} \frac{z}{b} \left(1 - \frac{z}{b}\right)\right]^{-1}. \quad (6)$$

Здесь ρ_0 – плотность окружающей среды.

Таким образом, характерной особенностью решения задачи в случае локально-равновесного течения является постоянство давления и уменьшение плотности к центру канала в соответствии с выражением (6). т. е. течение в зазоре является баротропным.

2. Решение в приближении локально-неравновесного течения вязкой среды. Уравнения локально-неравновесного течения вязкой среды [5] для сдвигового потока, описываемого полем скоростей $u = u(y)$, принимают вид

$$-c^2 \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0;$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial \rho u}{\partial x} = u \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0,$$

где c – скорость звука. Аналогично предыдущему случаю, скорость течения между двумя параллельными плоскими стенками описывается тоже формулой (1). Однако вместо соотношения (2) в результате решения записанной системы уравнений получаем зависимость

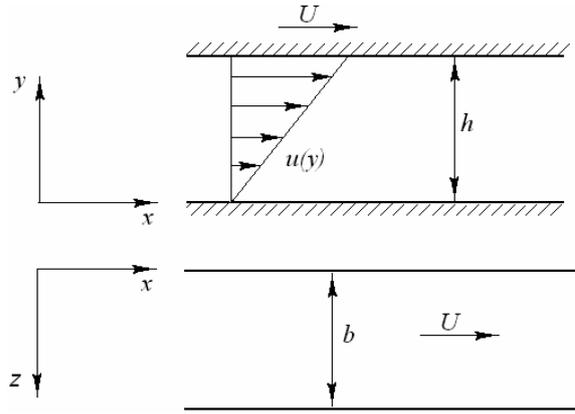


Рис. 1. Схема течения Куэтта в зазоре между двумя плоскими параллельными стенками, из которых одна покоится, а другая движется в собственной плоскости с постоянной скоростью U

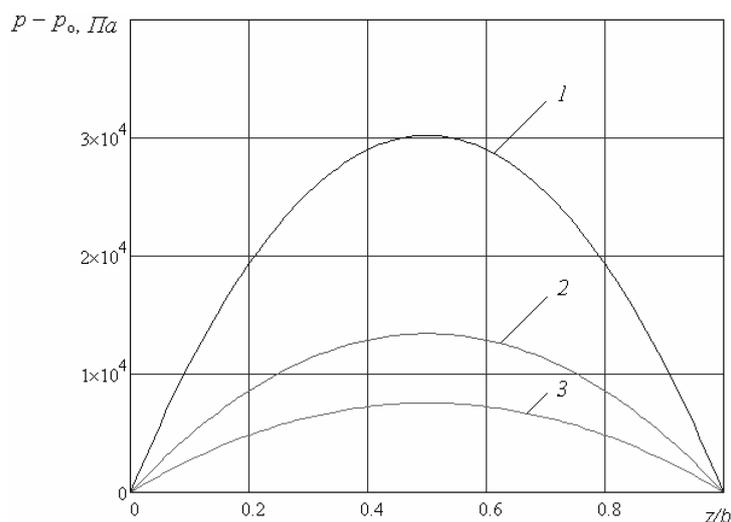


Рис. 2. Распределение избыточного давления в щелевом зазоре поперек полосы при скорости $U = 10$ м/с:
 $1 - h = 500$ мкм; $2 - 750$; $3 - 1000$

$$\rho = \rho_0 = \text{const.} \quad (7)$$

Следовательно, для локально-неравновесной модели течения в качестве постоянного значения в зазоре должно принимать не давление, а плотность.

Поле температуры при этом удовлетворяет тому же дифференциальному уравнению (3) и описывается соотношением (4).

Воспользовавшись уравнением состояния (5), с учетом (4) и (7) для распределения давления в щелевом зазоре получим выражение

$$\frac{p(z)}{p_0} = 1 + \mu \frac{U^2 b^2}{2T_0 \lambda h^2} \frac{z}{b} \left(1 - \frac{z}{b}\right),$$

где p_0 – давление в окружающей среде.

Таким образом, в случае локально-неравновесного течения в результате вязкостного трения из-за диссипации механической энергии температура и давление внутри зазора увеличиваются и превышают значения температуры и давления в окружающей среде. Причем рост давления и температуры в центре канала тем значительней, чем больше скорость движения стенки и меньше ширина зазора. На рис. 2 представлен график изменения избыточного давления поперек полосы в щелевых каналах различной толщины для скорости $U = 10$ м/с.

Как видно из представленных графиков, уже при зазоре в 500 мкм перепад давления в центральной зоне движущейся полосы по отношению к внешнему давлению составляет порядка 0,3 бар. Полученные значения дают максимальную оценку порядка величины перепада давления. Потери тепла через боковые стенки щелевого канала, очевидно, приведут к снижению этих значений измеряемых параметров. Однако если предположить, что давление в результате потери тепла снизится даже в 100 раз, то оно будет составлять все еще приемлемую для экспериментального измерения величину.

Заключение. Таким образом, полученные результаты указывают на техническую возможность осуществления экспериментальной проверки концепции развития гидродинамических и тепловых процессов в сдвиговых потоках вязкой среды. Измеряя распределения давления в зазоре между подвижной и неподвижной параллельными плоскостями, можно экспериментально проверить какой из возможных вариантов построения теории реализуется в действительности. Для локально-равновесной теории на основе системы уравнений Навье–Стокса характерной должна быть баротропность протекающих в щелевом зазоре термогидродинамических процессов, в то время как локально-неравновесная теория на основе системы уравнений [5] прогнозирует их изохорический характер. Уникальность рассматриваемой ситуации заключается в том, что

в данном эксперименте различие между двумя теориями проявляется наиболее ярко, так как разные теоретические подходы предсказывают совершенно противоположные несовместимые результаты, взаимно исключающие друг друга.

Литература

1. Тютюма В. Д. // Инженерно-физический журн. 2012. Т. 85, № 2. С. 333–335.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М., 1986. – 736 с.
3. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М., 1970. – 904 с.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., 1974. – 712 с.
5. Тютюма В. Д. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2010. № 1. С. 77–81.

V. D. TYUTYUMA

tvd@hmti.ac.by

SOLUTION OF A THERMAL PROBLEM IN A SHEAR LOCALLY NONEQUILIBRIUM VISCOUS FLUID FLOW

Summary

The organization of an experiment on the verification of the concept of viscous fluid flow theory is substantiated theoretically. The concept is based on specific features of the development of thermohydrodynamic processes in a shear flow between two parallel walls with account for heat dissipation, which are typical of two different theoretical models.

АГРАРНЫЕ НАУКИ

УДК 636.4.082.265

Н. Б. ЗАЙЦЕВА¹, О. В. ГРИШАНОВА¹, Р. И. ШЕЙКО², Е. А. ЯНОВИЧ², А. Ч. БУРНОС²**АНАЛИЗ ВОСПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ
КАЧЕСТВ СВИНОМАТОК РАЗЛИЧНЫХ ГЕНОТИПОВ***(Представлено академиком И. П. Шейко)*¹Гродненский государственный аграрный университет²Научно-практический центр НАН Беларуси по животноводству, Жодино

Поступило 25.06.2014

Производство продукции свиноводства и ее рентабельность в значительной степени определяются эффективностью использования свиноматок. Литературные данные по этому вопросу отличаются неоднородностью, что свидетельствует о неравномерности проявления гетерозиса по репродуктивным качествам при межпородном скрещивании.

Главная задача товарного свиноводства Беларуси в настоящее время – улучшение маточного состава путем скрещивания маток белорусской крупной белой породы и белорусской мясной с хряками-производителями пород ландрас и йоркшир и последующее их использование путем скрещивания с производителями мясных пород [1].

В свиноводстве репродуктивные способности животных имеют важнейшее значение не только с точки зрения воспроизводства стада, но и являются хозяйственно полезными признаками, определяющими эффективность отрасли в целом. Особенности проявления репродуктивных качеств могут быть использованы при дальнейшем совершенствовании отечественных пород и в системах скрещивания и гибридизации свиней с использованием импортного генофонда [2–4].

Экспериментальная часть. Исследования проводились в «Агрокомбинате «Скидельский» филиал «Желудокский агрокомплекс» Гродненской области в 2011–2012 гг. Для проведения опыта были сформированы 12 групп свиноматок генотипа БКБ×БМ осемененных хряками-производителями импортных пород различной селекции. Кормление и содержание подопытных животных было нормированным и организовано в соответствии с технологией, организованной в хозяйстве.

Цифровой материал обработан методом вариационной статистики по П. Ф. Рокицкому [5].

Результаты и их обсуждение. Репродуктивные качества свиноматок, осемененных хряками импортных пород ландрас, йоркшир и дюрок, представлены в табл. 1.

Установлено, что по показателям многоплодия матки сочетания (БКБ×БМ)×Л(дат.) превосходили аналогов контрольной группы на 0,4 головы, или на 3,5 %, маток других опытных групп на 0,3–0,5 головы, или на 2,6–4,5 %. По показателям молочности превосходство над контрольной группой составило 3,9 кг, или 7,7 %, над сверстницами других групп 0,9–2,6 кг, или 1,7–5,0 %, по массе гнезда при отъеме превосходство над контролем составило 2,4 кг, или 2,8 %, над другими группами соответственно 1,2–2,7 кг, или 1,5–3,3 %.

У свиноматок, осемененных хряками породы ландрас датской селекции, отмечалось и самое высокое количество поросят и масса гнезда к отъему – 10,6 головы и 83,7 кг соответственно. Превосходство показателей этих признаков над контрольной группой при этом составило соответственно 8,2 и 2,8 %, над другими опытными группами – 2,9–11,6 и 1,5–3,3 %.

У маток этого сочетания отмечалась и самая высокая сохранность поросят к отъему – 92,9 %. Сохранность поросят в контрольной группе была ниже на 2,2 п. п., в других опытных группах на 1,2–4,4 п. п.

Т а б л и ц а 1. Репродуктивные качества свиноматок в различных вариантах скрещивания

Сочетание пород, мать×отец	n	Многоплодие, голов		Молочность, кг	При отъеме		Сохранность, %
		всего	в т. ч. живых		количество поросят, гол.	масса гнезда, кг	
(БКБ×БМ)×БМ (контроль)	26	11,3 ± 0,22	10,8 ± 0,18	50,9 ± 0,55	9,8 ± 0,14	81,4 ± 0,80	90,7
(БКБ×БМ)×Л(нем.)	24	11,2 ± 0,44	10,9 ± 0,27	53,9 ± 1,40	10,0 ± 0,81	82,5 ± 0,29	91,7
(БКБ×БМ)×Л(нор.)	21	11,2 ± 0,37	10,8 ± 0,39	52,2 ± 0,90	9,5 ± 0,57	81,0 ± 0,48	87,9
(БКБ×БМ)×Л(кан.)	23	11,4 ± 0,33	11,3 ± 0,21	52,6 ± 0,32**	10,3 ± 0,20*	82,5 ± 0,23	91,1
(БКБ×БМ)×Л(дат.)	25	11,7 ± 0,41	11,4 ± 0,20*	54,8 ± 1,20**	10,6 ± 0,33*	83,7 ± 0,56*	92,9
В среднем	93	11,4 ± 0,39	11,1 ± 0,14	53,4 ± 0,53	10,1 ± 0,26	82,4 ± 0,39	91,0
(БКБ×БМ)×Й(нем.)	23	11,4 ± 0,29	11,0 ± 0,31	53,1 ± 1,44	10,1 ± 0,40	83,2 ± 0,32	91,8
(БКБ×БМ)×Й(нор.)	20	11,3 ± 0,26	10,9 ± 0,51	52,8 ± 1,30	9,7 ± 0,50	81,3 ± 0,49	88,9
(БКБ×БМ)×Й(кан.)	22	11,6 ± 0,42	11,3 ± 0,19*	54,1 ± 0,90**	10,5 ± 0,28*	83,8 ± 0,20	92,9
(БКБ×БМ)×Й(дат.)	25	11,8 ± 0,32	11,5 ± 0,23*	54,7 ± 1,03**	10,7 ± 0,36*	84,5 ± 0,14	93,0
В среднем	90	11,5 ± 0,32	11,2 ± 0,16	53,7 ± 0,59	10,3 ± 0,19	83,2 ± 0,29	92,0
(БКБ×БМ)×Д(нем.)	23	10,5 ± 0,32	9,8 ± 0,25	51,9 ± 1,75	9,5 ± 0,47	83,3 ± 0,38	96,9
(БКБ×БМ)×Д(нор.)	20	10,3 ± 0,42	9,7 ± 0,43	51,1 ± 1,8	9,3 ± 0,53	81,3 ± 0,45	95,9
(БКБ×БМ)×Д(дат.)	24	10,7 ± 0,29	10,1 ± 0,25*	52,6 ± 0,63*	9,8 ± 0,62	84,7 ± 0,15	97,0
В среднем	67	10,5 ± 0,34	9,9 ± 0,37	51,9 ± 0,83	9,5 ± 0,54	83,1 ± 0,33	95,9

Примечание: * $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$.

При сравнительном анализе показателей репродуктивных качеств подопытных свиноматок в сочетании с хряками породы йоркшир различной селекции наблюдалась схожая тенденция. Так, у породно-линейных маток белорусской крупной белой и белорусской мясной пород в сочетании с датскими хряками породы йоркшир установлены самые высокие показатели репродуктивных качеств, которые превосходили показатели многоплодия у маток других опытных групп на 0,2–0,5 головы, или 1,7–4,4 %, по молочности соответственно на 0,6–1,9 кг, или 1,1–3,6 %, количеству поросят при отъеме на 0,2–1,0 головы, или 1,9–10,3 %, массе гнезда при отъеме – на 0,7–3,2 кг, или на 0,8–3,9 %.

По данной группе маток наивысшая сохранность поросят к отъему отмечалось в сочетании с хряками датский дюрк – 97,0 %, в группе с хряками датский йоркшир – 93,0 %, у маток других опытных групп показатель этого признака составил 88,9–92,9 %.

Установлено, что среди всех сочетаний самый высокий эффект гетерозиса выявлен у маток БКБ×БМ при использовании хряков йоркшир и ландрас датской селекции, показатель которого по многоплодию составил 6,48–5,50 % ($P \leq 0,05$), по молочности 7,46–7,70 % ($P \leq 0,01$), по количеству поросят при отъеме 9,2–8,2 % ($P \leq 0,05$) и массе гнезда 2,8 % ($P \leq 0,05$).

Выявлено, что при сочетании маток БКБ×БМ с хряками пород йоркшир и ландрас канадской селекции эффект гетерозиса по многоплодию, молочности, количеству поросят при отъеме соответственно составил 4,6 % ($P \leq 0,05$), 6,3–3,3 % ($P \leq 0,01$), 7,1–5,1 % ($P \leq 0,05$). При использовании хряков немецкой и норвежской селекции эффект гетерозиса по репродуктивным признакам у маток БКБ×БМ не выявлен. Положительное влияние хряков породы дюрк на репродуктивные признаки помесных маток не установлено.

У свиноматок генотипа БКБ×БМ в сочетании с хряками породы дюрк различной селекции наилучшие показатели по многоплодию, молочности, количеству поросят и массе гнезда при отъеме были получены у маток, осемененных спермой хряков датской селекции.

Необходимо отметить, что использование для осеменения свиноматок спермы хряков пород дюрк, ландрас и йоркшир западноевропейской и североамериканской селекции оказало положительное влияние на показатели воспроизводительных качеств свиноматок, по сравнению с использованием хряков белорусской селекции, относящихся к белорусской мясной породе.

Положительное влияние объясняется тем, что воспроизводительные качества свиноматок определяются на основании показателей выращиваемых ими поросят, в формировании генети-

ческой основы которых приняли участие и хряки, использованные в качестве отцовских форм. Это тем более значимо, так как даже не прошедшие в полной мере адаптации импортные хряки дали потомство, превосходящее, хоть и незначительно, потомство хряков-производителей отечественной селекции, хорошо приспособленных к местным условиям кормления, содержания и эксплуатации.

Следует обратить внимание на то, что среди свиноматок, осемененных спермой хряков различной селекции, лучшие показатели репродуктивных качеств по многоплодию и их сохранности к отъему были свойственны животным, отцовской формой при получении потомства которых являлись производители породы йоркшир. Наибольшая молочность и масса гнезда при отъеме отмечались у свиноматок, осемененных спермой хряков породы ландрас.

Анализируя коэффициенты изменчивости следует отметить их непостоянство (табл. 2). По воспроизводительным качествам свиноматок наименьшая вариация отмечалась у животных контрольной группы – 7,6–12,6 %, в то время как при использовании хряков породы ландрас коэффициенты изменчивости репродуктивных признаков в опытных группах составили 8,8 % по количеству поросят к отъему, 20,6 % по массе гнезда при отъеме; у йоркширов – 8,3 % по количеству поросят к отъему, 19,6 % по молочности; у дюроков соответственно 8,8 % по количеству поросят к отъему, 18,3 % по массе гнезда при отъеме.

Т а б л и ц а 2. Коэффициенты изменчивости репродуктивных качеств свиноматок в различных вариантах скрещивания с хряками импортных пород, %

Сочетание пород, мать×отец	<i>n</i>	Многоплодие	Молочность	Количество поросят к отъему	Масса гнезда при отъеме
(БКБ×БМ)×БМ(контроль)	26	9,26	12,6	7,6	9,8
(БКБ×БМ)×Л(нем.)	24	11,4	14,8	8,8	12,6
(БКБ×БМ)×Л(нор.)	21	12,2	17,2	9,7	14,5
(БКБ×БМ)×Л(кан.)	23	11,8	17,8	9,4	12,9
(БКБ×БМ)×Л(дат.)	25	12,4	16,8	10,8	20,6
В среднем	93	10,2	14,6	8,3	12,2
(БКБ×БМ)×Й(нем.)	23	10,0	18,7	7,9	12,7
(БКБ×БМ)×Й(нор.)	20	11,2	17,5	8,3	14,8
(БКБ×БМ)×Й(кан.)	22	12,0	19,6	9,5	16,7
(БКБ×БМ)×Й(дат.)	25	12,6	19,8	10,2	19,4
В среднем	90	10,3	16,9	7,4	12,02
(БКБ×БМ)×Д(нем.)	23	12,4	17,6	8,8	16,12
(БКБ×БМ)×Д(нор.)	20	10,9	14,2	9,4	17,26
(БКБ×БМ)×Д(дат.)	24	12,7	18,7	10,2	18,30
В среднем	67	10,8	12,8	8,5	12,00

Более низкие коэффициенты изменчивости в контрольной группе свидетельствуют о консолидации маток этой группы по воспроизводительным качествам. Повышенные коэффициенты изменчивости воспроизводительных качеств маток опытных групп в данном случае объясняются различной степенью сочетаемости с хряками импортной селекции.

Подтверждением полученных результатов служат представленные коэффициенты корреляции между продуктивными признаками свиноматок в сочетании с хряками различных генотипов (табл. 3). Результаты свидетельствуют, что между показателями многоплодия и массой гнезда при рождении, также массой гнезда в 21 день существуют средние величины положительной взаимосвязи. В первом случае эти величины составили от 0,29 в сочетании (БКБ×БМ)×Д(дат.) до 0,39 в контрольной группе (БКБ×БМ)×БМ и в опытной группе (БКБ×БМ)×Л(нор.).

Во втором случае (между многоплодием и массой гнезда в 21 день) взаимосвязь оказалась несколько ниже – от 0,26 в сочетании (БКБ×БМ)×Д(дат.) до 0,35 в опытной группе (БКБ×БМ)×Л(нор.).

Высокие коэффициенты корреляции отмечались между показателями многоплодия и массы гнезда при отъеме – от 0,35 в сочетании (БКБ×БМ)×Д(дат.) до 0,40 в контрольной группе (БКБ×БМ)×БМ и (БКБ×БМ)×Й(нем.), а самая низкая корреляция отмечалась между показателя-

Т а б л и ц а 3. Коэффициенты корреляции между продуктивными признаками у свиноматок при скрещивании с хряками различных генотипов

Сочетание пород, мать×отец	n	Многоплодие				Количество поросят при отъеме	
		масса гнезда при рождении	масса гнезда в 21 день	количество поросят при отъеме	масса гнезда при отъеме	масса поросенка при отъеме	масса гнезда при отъеме
(БКБ×БМ)×БМ(контроль)	26	0,39	0,34	0,28	0,40	-0,12	0,68
(БКБ×БМ)×Л(нем.)	24	0,38	0,33	0,27	0,38	-0,09	0,74
(БКБ×БМ)×Л(нор.)	21	0,38	0,35	0,29	0,39	-0,08	0,72
(БКБ×БМ)×Л(кан.)	23	0,35	0,30	0,26	0,36	-0,10	0,76
(БКБ×БМ)×Л(дат.)	25	0,29	0,27	0,24	0,36	-0,10	0,58
В среднем	93	0,39	0,32	0,28	0,38	-0,10	0,75
(БКБ×БМ)×Й(нем.)	23	0,37	0,32	0,25	0,40	-0,11	0,69
(БКБ×БМ)×Й(нор.)	20	0,38	0,34	0,28	0,38	-0,14	0,74
(БКБ×БМ)×Й(кан.)	22	0,36	0,32	0,30	0,36	-0,12	0,78
(БКБ×БМ)×Й(дат.)	25	0,37	0,30	0,24	0,36	-0,14	0,68
В среднем	90	0,38	0,33	0,28	0,38	-0,12	0,75
(БКБ×БМ)×Д(нем.)	23	0,32	0,29	0,22	0,34	-0,10	0,68
(БКБ×БМ)×Д(нор.)	20	0,29	0,30	0,24	0,36	-0,12	0,72
(БКБ×БМ)×Д(дат.)	24	0,29	0,26	0,24	0,35	-0,12	0,72
В среднем	67	0,30	0,29	0,24	0,36	-0,11	0,70

ми многоплодия и количеством поросят к отъему – от 0,22 в сочетании (БКБ×БМ)×Д(нем.) до 0,29 в сочетании (БКБ×БМ)×Л(нор.).

Очень низкая отрицательная корреляция отмечалась между показателями количество поросят при отъеме и массой поросенка при отъеме от -0,09 в сочетании (БКБ×БМ)×Л(нор.) до -0,14 в сочетаниях (БКБ×БМ)×Й(нор.) и (БКБ×БМ)×Й(дат.).

Самая высокая положительная корреляция по репродуктивным качествам свиноматок установлена между показателями количество поросят при отъеме с массой гнезда при отъеме от 0,58 в группе (БКБ×БМ)×Д(дат.) до 0,78 в сочетании (БКБ×БМ)×Й(кан.). Следовательно, по этим признакам можно эффективно вести направленную селекцию на улучшение их в поколениях.

Таким образом, в условиях филиала «Желудокский агрокомплекс» Гродненской области использование для осеменения двухпородных свиноматок генотипа БКБ×БМ спермы хряков пород дюрок, ландрас и йоркшир западноевропейской и североамериканской селекции оказало положительное влияние на показатели репродуктивных качеств свиноматок, осемененных спермой хряков вышеуказанных пород, по сравнению с использованием хряков белорусской селекции, относящихся к белорусской мясной породе.

Лучшие показатели репродуктивных качеств по многоплодию, количеству мертворожденных поросят и сохранности поросят к отъему установлены в сочетаниях с хряками-производителями пород йоркшир и ландрас.

Наибольшая молочность и масса гнезда при отъеме отмечалась у свиноматок, осемененных спермой хряков породы ландрас.

Высокие коэффициенты корреляции отмечались между показателями многоплодия и массы гнезда при отъеме – от 0,35 в сочетании (БКБ×БМ)×Д(дат.) до 0,40 в контрольной группе (БКБ×БМ)×БМ и (БКБ×БМ)×Й(нем.), самая низкая вариация отмечалась между показателями многоплодия и количеством поросят к отъему -0,22 в сочетании (БКБ×БМ)×Д(нем.) до 0,29 в сочетании (БКБ×БМ)×Л(нор.).

Очень низкая отрицательная корреляция отмечалась между показателями количество поросят при отъеме и массой поросенка при отъеме от -0,09 в сочетании (БКБ×БМ)×Л(нор.) до -0,14 в сочетаниях (БКБ×БМ)×Й(нор.) и (БКБ×БМ)×Й(дат.).

Самая высокая положительная корреляция по репродуктивным качествам свиноматок установлена между показателями количество поросят при отъеме с массой гнезда при отъеме от 0,58

в группе (БКБ×БМ)×Д(дат.) до 0,78 в сочетании (БКБ×БМ)×Й(кан.). Следовательно, по этим признакам можно эффективно вести направленную селекцию на улучшение их в поколениях.

Заключение. Установлено, что среди всех сочетаний самый высокий эффект гетерозиса выявлен у маток БКБ×БМ при использовании хряков йоркшир и ландрас датской селекции, показатель которого по многоплодию составил 6,48–5,50 % ($P \leq 0,05$), по молочности 7,46–7,70 % ($P \leq 0,01$), по количеству поросят при отъеме 9,2–8,2 % ($P \leq 0,05$) и массе гнезда 2,8 % ($P \leq 0,05$).

Выявлено, что при сочетании маток БКБ×БМ с хряками пород йоркшир и ландрас канадской селекции эффект гетерозиса по многоплодию, молочности, количеству поросят при отъеме соответственно составил 4,6 % ($P \leq 0,05$), 6,3–3,3 % ($P \leq 0,01$), 7,1–5,1 % ($P \leq 0,05$). При использовании хряков немецкой и норвежской селекции эффект гетерозиса по репродуктивным признакам у маток БКБ×БМ не выявлен. Положительное влияние хряков породы дюрок на репродуктивные признаки помесных маток не установлено.

Литература

1. Республиканская программа по племенному делу в животноводстве на 2011–2015 годы: утверждена Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 1917 от 31 декабря 2010 года [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.pravo.by/webnra/text.asp?RN=C21001917>. – Дата доступа: 06.05.2013.
2. Шейко И. П., Федоренкова Л. А., Тимошенко Т. Н. // Зоотехническая наука Беларуси: сб. науч. тр. Минск, 2002. С. 102–106.
3. Федоренкова Л. А., Хомич К. А., Пристуна Н. В. // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства: сб. науч. тр. / Бел. гос. с.-х. академия. Горки, 2009. Вып. 12, ч. 2. С. 86–91.
4. Шейко Р. И., Рябцева С. В., Бальников А. А. // Зоотехническая наука Беларуси: сб. науч. тр. Жодино, 2012. Т. 47, ч. 1. С. 197–201.
5. Рокицкий П. Ф. Биологическая статистика. Изд. 3-е, испр. Минск, 1973. – 320 с.

N. B. ZAYTSEVA, O. V. GRISHANOVA, R. I. SHEYKO, E. A. YANOVICH, A. Ch. BURNOS

belniig@tut.by

ANALYSIS OF REPRODUCTIVE QUALITIES OF DIFFERENT-GENOTYPE SOWS

Summary

The high heterosis effect was revealed in BLW×BM sows using boars of Yorkshire and Landrace breeds of Danish selection. The value of multiple farrowing was 6.48–5.50 % ($P \leq 0.05$), of milkiness – 7.46–7.70 % ($P \leq 0.01$), of the number of piglets at weaning – 9.2–8.2 % ($P \leq 0.05$) and litter weight – 2.8 % ($P \leq 0.05$). When combining BLW×BM sows with Yorkshire and Landrace breeds of pigs of Canadian selection the heterosis effect on multiple pregnancy, milkiness, number of piglets at weaning made 4.6 %, ($P \leq 0.05$), 6.3–3.3 % ($P \leq 0.01$) and 7.1–5.1 % ($P \leq 0.05$), respectively.

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

УДК 316.334.3:329(476)

*И. В. КОТЛЯРОВ***ПОЛИТИЧЕСКИЕ ПАРТИИ БЕЛАРУСИ КАК СИМУЛЯКРЫ СОЦИАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА (СОЦИОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ)***(Представлено академиком Е. М. Бабосовым)**Институт социологии НАН Беларуси, Минск**Поступило 12.08.2014*

Политические партии являются одним из важных, спорных и необходимых конструктов современной политической науки. Они представляют сложные социальные модели, в которых диалектически соединены партийные лидеры и члены партии, политические идеологии и установки, идеи и программы, целенаправленная деятельность партийных структур по решению тех или иных проблем и отношение к социальным явлениям и процессам.

Политические партии – это основа представительной и партиципаторной демократии. Они являются социальными институтами, через которые граждане реализуют свои политические права и свободы. Именно политические партии формулируют и выражают политические, экономические и другие интересы различных социальных групп, представляют их в законодательных органах, содействуют политической социализации граждан, являются своеобразными механизмами саморегуляции общественной активности. Государственные институты активно используют политические партии для решения собственных проблем. Ведь деятельность политических партий всегда была важным механизмом распределения и перераспределения властных ресурсов. Во многих странах они превратились в эффективный инструмент власти, дополнительный канал влияния политической элиты на общество.

Основное функциональное предназначение современных политических партий – это организация политических процессов, выражаемая в суммировании общественных и личных интересов, принятие на их основе политических решений, формирование идеологических и политических позиций, поиск и рекрутирование кандидатов для избрания или назначения в органы государственной власти или местного самоуправления. Именно политические партии направляют неуправляемую стихийную энергию социальных протестов в русло легитимной борьбы за лучшее будущее. Когда речь идет о властных структурах или выборах различных уровней в США, Франции или Великобритании, то всегда вспоминают о политических партиях. В ближайшей исторической перспективе в Европе лидеры общеевропейских партий будут становиться все большей политической силой, да и в современной России символ «партия» становится все ближе к символу «власть». В буржуазном обществе политические партии, созданные по классовому принципу, – это единственный способ защиты прав и свобод граждан и завоевания политической власти. Конечно, партия должна представлять, выражать и отстаивать интересы конкретной социальной группы или определенного класса, а не быть собственностью того или иного политика.

Многopартийная система Беларуси начала формироваться после распада Советского Союза, в период становления независимого национального государства. Процесс партийного строительства был неразрывно связан с кардинальными изменениями в политической системе белорусского общества. Новый политический дизайн существенным образом влиял на идеалы, ценности и морально-нравственные ориентиры всех граждан страны. Люди активно включались в процес-

сы влияния на властные решения, резко увеличились возможности выражения собственного мнения и политических требований. Произошло ослабление идеологических идентификаций. Избиратели стали чаще менять свои предпочтения, электорат в целом стал более подвижным, чем раньше. Срочно требовались новые идейно-политические структуры. Ими стали политические партии как важные и своевременные продукты и объекты действий широких народных масс. Авторитет партий постепенно рос. Особенно отчетливо это проявлялось во время знаковых политических кампаний. Многопартийность начала целенаправленное движение от неупорядоченного, несистемного множества политических объединений к устойчивой многопартийной системе.

В 1991 г. были зарегистрированы первые пять белорусских политических партий – Объединенная демократическая партия Беларуси, Белорусская крестьянская партия, Белорусская социал-демократическая Громада, Национально-демократическая партия Беларуси, Белорусский христианско-демократический союз. Появлению большого количества новых политических партий способствовали невысокие требования закона «Об общественных объединениях» – наличие в партиях не менее ста членов и уплата государственной пошлины в размере десяти минимальных окладов.

Первые социологические исследования, направленные на определение популярности белорусских политических структур, были проведены группой социологов под руководством автора этой статьи в марте и ноябре 1991 г. Они показали, что партии поддерживали:

	Март 1991 г.	Ноябрь 1991 г.
БНФ	9,1 %	18,6 %
КПБ	52,1 %	5,1 %
Вновь созданные партии	3,6 %	4,2 %

Интересно отметить, что многие в Белорусской ССР, в том числе авторы этого исследования, в то время не верили, что новые партии когда-нибудь станут сильными политическими структурами и сумеют активно влиять на политическую жизнь в стране. Мы даже в социологической анкете обозначили их с недостаточным уважением, не совсем корректно – «вновь созданные партии» [1–3].

Наибольший расцвет белорусской многопартийности произошел перед и во время предвыборной кампании выборов в Верховный Совет XIII созыва – первый профессиональный парламент в независимой Беларуси. Один государственный чиновник, рассуждая о политических партиях, заявил: «Это только поза и фраза». Но какая это была поза, ее увидели. Какая фраза – ее услышали. О партиях заговорили не только на кухнях, но и в престижных тусовках национальной элиты.

Социологические исследования постоянно определяли рейтинг политических партий. «Таблица народной популярности» в мае и октябре 1995 г. имела следующий вид:

Политические партии	Показатель, %	
	Май	Октябрь
Аграрная партия	5,8	7,4
Белорусская гуманитарная партия	0,3	0,1
Белорусская крестьянская партия	2,1	1,2
Белорусская народная партия	3,9	2,7
Белорусская национальная партия	0,4	0,9
Белорусская объединенная спортивная партия	0,1	0,1
Белорусская партия «Зеленый мир»	0,7	1,3
Белорусская партия труда	2,3	2,8
Белорусская республиканская партия	0,4	0,4
Белорусская социал-демократическая Громада	1,3	1,1
Белорусская социалистическая партия	0,9	1,6
Белорусская социально-спортивная партия	0,4	0,2

Белорусская экологическая партия	1,9	2,0
Белорусский Народный Фронт	8,9	6,5
Белорусский научно-производственный конгресс	0,4	0,5
Белорусский христианско-демократический союз	0,8	0,6
Белорусская патриотическая партия	0,3	0,1
Гражданская партия	0,4	1,1
Либерально-демократическая партия	0,6	0,2
Национально-демократическая партия Беларуси	0,8	0,1
Объединенная демократическая партия Беларуси	0,5	0,8
Партия всебелорусского единства и согласия	1,3	0,8
Белорусская партия женщин «Надзея»	9,5	6,9
Партия здравого смысла	3,6	3,8
Белорусская партия Зеленых	1,0	0,9
Партия Любителей Пива	3,6	4,2
Партия коммунистов Беларуси	26,5	34,9
Партия народного согласия	2,4	1,6
Польское демократическое объединение	0,1	–
Республиканская партия	0,6	1,0
Республиканская партия труда и справедливости	2,0	0,8
«Славянский Собор «Белая Русь»	1,4	1,3
Белорусская христианско-демократическая партия	0	0,2
Народная партия «Возрождение»	–	0
Христианско-демократический выбор	–	0,5

14 и 26 мая 1995 г. состоялись выборы депутатов Верховного Совета Республики Беларусь XIII созыва. Однако они не привели к избранию полномочного парламента. Повторные выборы прошли 29 ноября–10 декабря. Число избранных депутатов достигло 198 человек, что было достаточно для правомочности нового состава Верховного Совета. В него было избрано только 18 человек из Верховного Совета XII созыва. 170 депутатов (85,9 %) стали парламентариями впервые. 105 депутатов являлись членами 12 политических партий, 93 – беспартийными [1–3].

Однако вскоре интерес к политическим партиям резко упал. Партийцы в парламенте не смогли показать себя грамотными и высокопрофессиональными политиками. Пришедшие к власти на волне откровенного популизма, они не доказали избирателям свою необходимость. Кстати, такими же полупрофессионалами, даже любителями, дилетантами в политике были многие беспартийные депутаты. Оказалось, что размахивать руками на парламентской трибуне и руководить при помощи шариковой ручки или мобильного телефона явно не достаточно для решения многочисленных проблем. Все это детерминировало крайне короткую политическую жизнь Верховного Совета Республики Беларусь XIII созыва [1–4].

В настоящее время в стране насчитывается 15 политических партий. Однако, как показывают мониторинговые социологические исследования, проводимые уже 24 года Институтом социологии НАН Беларуси, белорусская многопартийная система стремительно деградирует. Она находится в состоянии глубочайшей бифуркации, стоит на пороге системного кризиса, который проявляется в деформациях всех ее подсистем и блоков, всех уровней порядка. В стране так и не сложилось нормальное гражданское общество, с политическими партиями, имеющими внятные, отличные друг от друга программы и идеологию, ориентированную на определенные социальные слои и группы. Для современных белорусских партий характерны низкая интенсивность политической конкуренции и отсутствие значительного числа сторонников, неопределенность электоральных правил и скудность политической мысли, отсутствие связи с обществом и нежелание считаться с имевшимися в нем традициями и тенденциями, низкий уровень внутрипартийной демократии и неопределенность партийной тактики и стратегии, отсутствие знаковых фигур и т. д. Лидеры белорусских партий совершенно не понимают, что такое своевременная и адекватная реакция на внутривнутриполитические проблемы и внешнеполитические риски, что такое

«игра на опережение». Мало жителей нашей страны видят среди белорусских политических партий ту силу, которая способна защитить их интересы, понять их желания и потребности, эффективно представлять их на высшем государственном уровне. В сознании простых людей они и партии существуют в параллельных мирах, которые никогда не сойдутся. Партиям нет никакого дела до их проблем и бед. Они оторвались от реальности, как результат, граждане Беларуси не чувствуют реальной потребности в партиях, а значит, в белорусском обществе отсутствует реальный спрос на них.

Как показывают результаты социологических исследований, проведенных Институтом социологии НАН Беларуси в июне 2014 г., только 4,2 % жителей страны считают, что участие в деятельности политических партий эффективно. Сторонником какой-либо политической партии считает себя 1,4 %, скорее считает – 2,4 % респондентов. Белорусским политическим партиям в настоящее время доверяют 13,9 % населения Беларуси, не доверяют – 33,1 %. Если бы в ближайшее время в стране состоялись выборы в парламент по «партийным спискам», то 23,5 % избирателей проголосовали бы против всех политических партий. Две трети респондентов вполне вероятно вообще бы не пошли на выборы, так как они ничего не знают о партиях. Более трети (33,9 %) населения страны считает, что для Беларуси главное – сильная, эффективная политическая власть, а не многопартийность. Отношение подавляющего большинства населения страны к политическим партиям не просто недоверчивое, в лучшем случае оно безразличное, в худшем – резко негативное. Самый интересный тренд, который отслеживают социологи – продолжается падение доверия к почти всем политическим партиям, кроме тех, которым падать уже некуда.

Рейтинг политических партий Беларуси в июне 2014 г. имел следующий вид:

Коммунистическая партия Беларуси	1,5 %
Республиканская партия труда и справедливости	1,1 %
Белорусская аграрная партия	1,0 %
Белорусская партия «Зеленые»	0,9 %
Либерально-демократическая партия	0,8 %
Партия «Белорусская социал-демократическая Громада»	0,8 %
Белорусская социал-демократическая партия «Громада»	0,5 %
Белорусская патриотическая партия	0,4 %
Белорусская социально-спортивная партия	0,4 %
Консервативно-Христианская Партия – БНФ	0,4 %
Объединенная гражданская партия	0,4 %
Партия БНФ	0,4 %
Белорусская партия левых «Справедливый мир»	0,3 %
Социально-демократическая партия народного согласия	0,3 %
Республиканская партия	0,1 %

Как показывают результаты социологических исследований, современная белорусская многопартийность представляет систему ложных знаков, полностью оторванных от социальной реальности. В науке такие знаки называют *симулякрами*. Симулякры – это элементы в цепи событий, сохраняющие образ оригинала, но теряющие подобие ему, копии, не имеющие полного соответствия в действительности, знаки, оторванные от реальных объектов и событий, заменители действительности. По своей сути, мир симулякров – виртуальный мир, мир блефов и иллюзий, миражей и муляжей, мир, который живет по своим самодостаточным законам и не желает видеть, чувствовать реальную жизнь [5]. Мы очень часто смотрим на реальный мир через призму этих знаков. Типичный пример – потемкинские деревни времен Екатерины II. Французский аристократ и монархист, писатель и путешественник, известный изданием своих записок о России, маркиз Астольф Луи Леонор де Кюстин в XIX в. писал, что у русских есть лишь названия всего, но ничего нет в действительности. Россия – страна фасадов. Реальный мир и мир симулякров – это параллельные плоскости, которые никогда не пересекутся.

Партийная симулякрация в Беларуси начала формироваться в конце прошлого столетия. В стране под достижение прагматических целей и решение конкретных задач, под отдельных

личностей стали искусственно создаваться квазипартии, которые не имели четкой мировоззренческой позиции и отношения к реальным политическим процессам. Конкуренции идей в политических структурах не существовало. Не было «конкурса середнячков» и «ярмарки тщеславия». Партии появлялись с готовыми лидерами, болезнями и рецептами. У них не было детства, юности, отрочества – они уже родились со всеми признаками дряхления и увядания. Они были, как утверждал классик французской социальной философии Жан Бодрийяр, правда, по другому поводу, как мертвый велосипедист, который еще крутит педали, но сердце его уже не бьется [5].

За время новой многопартийности в стране были зарегистрированы 43 политические партии. Но многие из них оказались партиями-однодневками. Однако мифические структуры размножились по всей стране и попытались закрепиться в общественном сознании. Абсурдность этой ситуации заключалась еще в том, что становление и укрепление политических симулякров происходило за счет реальных политических партий, которые, заразившись неизлечимым недугом, перерождались в мифические структуры, заменяющие собой реальные политические субъекты, маскировали истинные цели, имитировали оппозиционность и борьбу за интересы различных социальных групп. За политическими трибунами стояли и вещали политические зомби. Как результат, сегодня практически все политические партии Беларуси переживают несколько локальных кризисов – кризис доверия и кризис лидерства, кризис теоретической мысли и кризис идеологической идентичности, кадровый кризис и идеологический кризис, кризис признания и кризис профессионализма.

Системный кризис партийного строительства в настоящее время в Беларуси имеет в своей основе семь составляющих компонентов. Это, во-первых, острый кризис легитимности самой идеи национальной многопартийности; во-вторых, полное отсутствие способности политических партий производить популярные, понятные и нужные людям идеи; в-третьих, неумение доносить их до широких народных масс; в-четвертых, явный недостаток полнокровных организационных структур, «искры, из которой разгорится пламя», в-пятых, отсутствие способности партий убедить людей в правильности, важности и необходимости идеологий и внедрения их в политическую реальность, в-шестых, не способность реализовывать даже некоторые из партийных идей, в-седьмых, явный дефицит людей, способных внедрять в жизнь первые шесть факторов. Почему?

Одной из важнейших причин такой ситуации является то, что политические партии страны постепенно стали партиями без лица. Подавляющее их количество сегодня не имеют четко выраженной политической позиции по основным вопросам современности. Например, совершенно непонятно отношение коммунистов к частной собственности на средства производства и землю, к колхозам и кооперативам, к приватизации государственной собственности и т. д. Впрочем, понятно, когда выгодно, их лидеры поддерживают частную собственность на землю, когда не выгодно – то они против. Поэтому К. Маркса и В. И. Ленина они трактуют весьма избирательно, в зависимости от политического момента. То же самое можно утверждать и о других партиях. Конечно, партии, принимая единые «правила игры», понимая, что они в определенной степени находятся в одной лодке и опираются на одни и те же ресурсы, многие политические проблемы стремятся решать (или не решать?) примерно одинаковым способом, и как результат, утрачивают социальную и идеологическую идентичность, полностью теряют свое лицо.

На подобное положение дел существенно влияет и целеполагание современных политических партий. Цель любой политической партии – это завоевание политической власти. Иначе это не партия, а религиозная секта или некое объединение типа профсоюза сантехников или общества любителей белых кошечек. Тот партийный лидер, который заявляет, что его партия не стремится к власти – самый настоящий симулякр. Дмитрий Медведев, будучи Президентом Российской Федерации, весьма оригинально заявлял, что партия – это инструмент. Современные политические партии – это способ достижения поставленных целей. Главная цель – пройти в парламент и там отстаивать определенные позиции. Задача не в том, чтобы раз и навсегда повесить значок и положить партбилет в карман, как это было в прошлые годы. Поэтому как будет называться эта партия и будет ли это действующая партия, или партия, которую создам, или

объединение нескольких партий – пока судить сложно. Кроме того, я считаю, что политический ландшафт должен меняться. Я почти уверен, что через десять лет большинство наших партий проведет ребрендинг.

Действительно, сегодня многие политические партии являются важными инструментами для решения личностных задач партийной элиты, прежде всего, ее прохождения в парламент, но никак не удовлетворения желаний и потребностей рядовых членов партии и, тем более, широких народных масс. Недаром говорят, что политические партии России сегодня больше похожи на коммерческие предприятия по продаже должностей и депутатских значков различных уровней. Социальное пространство вместо реальных политических действий заполняется различными миражами и подделками, мифами и пародиями. Публичная политика практически исчерпывается электоральной рекламой. Простые люди в этой системе координат – не более чем покупатели, которым надо сбыть партийный товар, причем не всегда лучшего качества. Именно поэтому, если возникают проблемы со сбытом, необходимо срочно проводить партийную распродажу. В перспективе это может привести к тому, что партии превратятся в машины для голосования, в политические структуры, обеспечивающие приход к власти определенных политиков. Такая парадигма превращает политические партии в «электоральные машины». Во время партийного ребрендинга как комплекса мероприятий по изменению бренда партии, лицо партии – это чисто условная дефиниция, подобная куску пластилина в умелых руках мастера, которая меняется в зависимости от ситуации. В Беларуси и до этого руки не доходят. Как результат, подавляющее число граждан полностью утратили какой бы то ни было интерес ко всем участникам партийных игр без исключения, не видя между ними принципиальной разницы. Язык понятен, а смысла и радости – нет.

Как показывают мониторинговые социологические исследования, многие современные партии страны – это чисто «виртуальные», латентные структуры, не имеющие никаких перспектив в политической деятельности, не способные стать чем-то важным и нужным в ближайшее время как для людей, так и государства в целом. Белорусские политические партии, обладая полным набором атрибутов, необходимых им по Закону «О политических партиях», полным внешним сходством с нормальными политическими структурами, – партии бутафорские, не способные и даже не предназначенные к настоящей работе в реальной ситуации, лишь иллюзии и фантомы, самый настоящий блеф. От выборов до выборов они представляют аморфную, желеобразную массу, которую не реально встряхнуть, но жалко выбросить. Даже появилась такая дефиниция – ширмочная партия. Ширма и есть ширма, за ней ничего. Типичный пример – Социал-демократическая партия народного согласия. Она уже добрый десяток лет не предпринимает никаких политических действий, в коме, но, кажется, дышит. Может быть, подобные партии еще когда-то понадобятся партийным боссам для решения собственных проблем?

Важный структурный компонент любой политической партии – ее идеология. История знает большое количество политических партий, главной отличительной чертой которых была устойчивая, популярная и оригинальная идеология. В качестве примеров можно назвать монтаньяров и якобинцев во времена Великой Французской революции, английских лейбористов или испанских анархистов времен гражданской войны. РСДРП(б) была маленькой революционной организацией с великой идеей, настоящими верой, преданностью и энтузиазмом. Ради идей члены этих партий шли на баррикады и виселицы, под бури и пули. Партийные идеологии являются идентификационными признаками партий, позволяющими отличать их друг от друга и формировать политические предпочтения и убеждения граждан. С одной стороны, идеология – это, конечно, симулякр. Это то, чего еще нет, но оно имеет виртуальную вероятность воплотиться в социальной реальности. Партии, не имеющие хорошо разработанной и популярной системы идей и ценностей, идеалов и установок, не могут быть полноценными субъектами политических процессов. Они полностью лишены политического смысла. В современной ситуации идеология белорусских партий – это симулякры в квадрате, которые никогда не станут действительностью. Идеологические платформы подавляющего большинства белорусских политических партий неясны, неточны, эклектичны, повторяют друг друга с совершенно небольшими отклонениями. Пустота и творческое бессилие стоят за ними. Это не созидатели, с ними Беларусь ждет тупик.

Как донести такие идеологии до широких народных масс, убедить людей в правильности партийных идей?

Многие белорусские партии не способны использовать благоприятную ситуацию для укрепления своих позиций. Типичный пример. Недавно Беларусь отпраздновала 70-летие освобождения страны от фашистских захватчиков. Под руководством ленинской Коммунистической партии Красная Армия наголову разбила агрессора, стремившегося к мировому господству, освободила народы Европы от черной чумы, спасла мир от фашистского рабства. В самые трудные моменты тяжелой войны звучал призыв: «Коммунисты, вперед!». И они шли и побеждали. В великий праздник многие руководители КПБ забыли об этом, о решающей роли коммунистов в Великой Отечественной войне практически не вспоминали, не смогли даже провести конференцию о роли КПСС в Великой победе.

Одним из ключевых вопросов современных политических партий является деятельность. Ее содержательная направляющая формируется через систематическое общение с людьми, электоратом и обществом, благодаря которому у широких народных масс появляются конкретные понятия об идеалах, целях и перспективах политической организации. Если политическая партия не заявляет о себе в публичной политике, не принимает активного участия в политической деятельности, не инициирует политические и информационные процессы, то ей предстоит недолгая жизнь. За время «новой многопартийности» ни одна из политических партий страны так и не сумела создать модель успешного коллективного действия, которые бы получили одобрение и поддержку большинства жителей страны. В ходе социологических интервью люди постоянно спрашивали: «Очередным ударом фашистов стала Коммунистическая партия Украины. Почему молчат белорусские коммунисты и другие «левые»? Почему активно не протестуют? Почему их не видно у американского посольства?». А, действительно, почему? Простые люди не понимают этого. Отношение некоторых белорусских партий и общественных организаций к событиям в Украине, к своим коллегам, растоптанным, растерзанным на Майдане, показывает, что подобная многопартийность не имеет перспективы.

Еще хуже, когда повседневная деятельность не соответствует целям и программным заявлениям партии. Говорят одно, а делают совершенно другое. Неспособность лидеров и активистов политических партий выполнять обещания и обязательства, данные своим сторонникам (избирателям), всем гражданам страны, которые их поддерживают, является провалом, крахом и политическим банкротством. По большому счету, как показывает жизнь, белорусские партии так и не смогли адаптироваться к новым экономическим, политическим и социальным реалиям, не стали активными субъектами национального поля политики, оказались системно не востребованными белорусским обществом.

«Сядзяць пісцы, як гною кучкі», – писал о чиновниках в знаменитой поэме «Новая зямля» Якуб Колас. Так же совсем недавно сказал о партийных руководителях известный белорусский ученый. Лидеры политических партий постоянно, причем часто необоснованно, являются объектами критики как со стороны партии и ее членов, так и политических оппонентов. И это не случайно. Партийные лидеры, как правило, являются брендом политических партий, особенно в ходе избирательных кампаний, в общении с людьми и средствами массовой информации. Они должны чувствовать пульс времени, подняться над ситуацией, привычными моделями и схемами, найти истинно новое, долгожданное, вдохновляющее, чему поверят люди и ощутят силу его воздействия. Партийные лидеры обязаны выражать интересы своих последователей, быть отражением настроений партийного электората, они проецируются на политическую партию, в некоторых случаях, полностью отождествляются с ней, растворяются в ней. Роль партийных лидеров особенно важна в современных условиях, когда партии сталкиваются с огромным количеством проблем. Во-первых, у многих людей полностью отсутствует интерес к политике как способу решения своих интересов и потребностей. Как показывают социологические исследования, проведенные Институтом социологии НАН Беларуси, только около 6 % жителей страны считают, что активное участие в политической деятельности поможет им ликвидировать существующие проблемы. Во-вторых, политические партии постепенно превращаются в институт, решающий, главным образом, электоральные задачи, причем, прежде всего, партийной элиты.

В-третьих, развитие информационных технологий заставляет партийных лидеров жить по новым, ранее совершенно не знакомым и непонятым им правилам – быть компетентными и мобильными, элегантными и эрудированными, выражать социальные ожидания и заказы людей. Практически всё, что мы слышим сегодня от партийных лидеров, причем с очень серьезным выражением на лице – это самые настоящие симулякры. Лидеры не несут никакой ответственности как перед членами партий, так и перед широкими народными массами. В условиях полного отсутствия конкуренции и ответственности на самый верх партийной пирамиды усиленно лезут, расталкивая локтями, посредственности, никогда и нигде не проявившие себя. Это требует полной смены поведенческой парадигмы, формирования принципиально нового имиджа партийных лидеров, что, к сожалению, в Беларуси не произошло и произойдет очень не скоро, а, может быть, и никогда. События в Украине подтверждают это.

Руководители многих политических партий не отвечают современным требованиям и не способны в трудные политические периоды принимать важные решения или хотя бы демонстрировать, что готовы взять на себя ответственность за положение дел в государстве. Нельзя руководить политической структурой, сидя в уютном кресле в столичном офисе, не испачкав туфли в песке или навозе, не понимая потребностей простых членов партии. Не поэтому ли партийные функционеры в моменты социальных кризисов выступают в одной и той же роли – пассивных наблюдателей или, в лучшем случае, политических комментаторов, а не политических деятелей, от которых хоть что-то зависит? Руководители многих политических партий, просто-напросто, не интересны. У них полностью отсутствуют не только харизма или шарм, но даже элементарная привлекательность. Их не реально представить на каком-то митинге или демонстрации, ведущих за собой людей. Под вопросом и моральный облик руководителей некоторых партий. Следует подчеркнуть, что, как показывают социологические исследования, подавляющее большинство партийных лидеров обделено вниманием людей, многие о них вообще никогда не слышали. Их рейтинг – 0,00 %. Но самое обидное для простых членов то, что некоторые партийные управленцы, взяв от партий все, что возможно, в случае самой небольшой опасности, как хамелеоны, меняют цвет и, зализывая царапины, тихо уползают в тень. Но даже в таких условиях практически все белорусские партии заняты, в первую очередь, борьбой за усиление позиций своих руководителей, за рост их относительного влияния в узких слоях общества или удержание на плаву, но никак не решением сложных политических проблем. Постепенно происходит формирование слоя партийных бюрократов, которые лишены серьезных мировоззренческих устоев, не связаны идеологией и ответственностью перед членами партии и народными массами. Идеология превращается в служебный атрибут партийной технологии. Причем по мере нарастания рыночных отношений, формирования партийного ребрендинга подобные подходы в стране будут только усиливаться [2].

Слабое звено – партийный аппарат, имиджмейкеры, политтехнологи, спичрайтеры, аналитики политических партий. Они малопрофессиональны и очень часто – коррумпированы. Кроме того, совершенно не поймешь, о чем они говорят и о чем пишут, но их точка зрения может поменяться несколько раз за неделю в зависимости от величины полученного гонорара. Особенно это касается тех аналитиков, которые постоянно живут за границей и оттуда объясняют то, чего не видят и чего не знают. И все же партийные «кокусы», о которых классик партологии Моисей Острогорский писал в книге «Демократия и политические партии», пытаются противопоставить себя «силам реальным и живым» [6]. Позиционируя себя таким образом, будто располагают поддержкой широких масс, «кокусы» как истинные симулякры, пытаются доказать, что они имеют вполне реальный политический вес и власти должны считаться с ними.

Серьезной проблемой практически всех политических партий страны является полное отсутствие теоретической работы. Каждая политическая партия обязана иметь программу – определенный набор идей и намерений, атрибутов и ценностей, норм и проектов желаемого будущего. Нормы, требования и цели политической партии, изложенные в программе, являются ее обязательствами перед людьми. Именно по ней, в первую очередь, граждане будут судить о перспективах и возможностях партии, о том, стоит ли голосовать за данную партию на выборах в представительные органы. Программы политических партий являются важнейшим элементом политического дискурса с широкими народными массами.

Но трудно о чем-то говорить, если не знаешь, кто такие Э. Бернштейн и Л. Бронштейн. Политические программы многих белорусских политических партий оказались не способными не только реализовать, но даже четко сформулировать стратегические приоритеты развития белорусского общества, предложить сценарий модернизации, попытаться воплотить некоторые инновации в жизнь. Ни у одной политической партии страны нет концепции построения нового социального порядка, который соответствовал бы современным требованиям. В их программах и программных заявлениях нет адекватного анализа ситуации в экономике, политике и социальной сфере. В них отсутствует будущее, нет четко очерченных временных и пространственных параметров. Характерными чертами многих партийных документов являются популизм и единообразие, декларативность и отсутствие конкретики. Наблюдается весьма запутанная интерпретация событий и процессов прошлых лет и крайне примитивное представление о настоящем. Неясность, нечеткость и небрежность стали важнейшими составляющими элементами партийных документов.

В законодательных и представительных органах страны не работают партийные группы. В Палате представителей Национального собрания Республики Беларусь депутаты не выступают как члены политической партии, не озвучивают ее требования по важнейшим политическим и экономическим вопросам, не отстаивают ее точку зрения, не представляют интересы простых ее членов. Разработка законопроектов и партийная жизнь идут параллельными курсами. Были случаи, когда депутаты парламента специально вступали в ту или иную политическую партию, так как выдвинуться кандидатом на следующие выборы от партийной структуры намного легче, чем собирать голоса избирателей. Тем более, в избирательных округах, где они себя ничем не рекомендовали. После парламентских выборов такие «партийцы» теряли к партии всякий интерес и выходили из нее.

В развитых государствах подавляющее большинство депутатов представляют ту или иную политическую партию. Об эффективности данной функции в Беларуси говорит хотя бы тот факт, что из 110 избранных депутатов Палаты представителей Национального собрания Республики Беларусь пятого созыва лишь пять были партийцами.

На глубочайший кризис современной белорусской многопартийности указывает и «эффект узнаваемости». Многие белорусские политические партии ничем не отличаются друг от друга. Электорат не способен выделить их из серой массы. Одной из наиболее узнаваемых всегда была партия БНФ, но со временем ее политические черты стали размываться. Люди хорошо знают о наличии в Беларуси Коммунистической партии, но благодаря прежним заслугам коммунистов. Современные руководители партии совершенно ничего не сделали для роста ее авторитета, полностью растеряли накопленное. Постоянная и целенаправленная работа ЛДП дает определенные результаты. Ее уже знают во многих регионах белорусского государства. Остальным политическим партиям страны похвастаться практически нечем. В данном случае можно сделать упрек средствам массовой информации, прежде всего, электронным, которые не так часто зовут на свои страницы и экраны лидеров политических партий. Но, с другой стороны, зачем туда идти, если идти-то не с чем. Они и не идут [2].

Против политических партий страны работает и менталитет белорусов. Наблюдается достаточно четко выраженное тяготение к патернализму. Большинство граждан ориентировано на то, чтобы именно государство решало социальные проблемы. У многих людей не достаточно выражена способность к политической самоидентификации. Как результат, в общественном сознании жителей современной Беларуси сформировалась низкая востребованность института политических партий.

Следует особо подчеркнуть, что белорусское законодательство не способствует усилению роли партий в политической жизни общества. Для преодоления кризиса современной белорусской многопартийности необходимо провести в стране целый ряд законодательных изменений, которые дадут возможность политическим партиям стать реальной политической силой. Среди них некоторые аналитики главной называют введение пропорциональной избирательной системы, или выборов «по партийным спискам».

Однако, во-первых, как показывают социологические исследования, только 4,5 % населения страны поддерживает идею выборов в белорусский парламент по партийным спискам. Во-

вторых, при введении пропорциональной избирательной системы и повышении реальных возможностей политических партий в них усиленно полезут карьеристы, авантюристы, проходимцы, популисты и демагоги, стремящиеся и здесь получить собственную выгоду, использовать политические структуры как трамплин для собственного карьерного роста, что, кстати, уже было.

Известный римский политик, полководец и оратор Марк Порций Катон (старший) заканчивал все свои выступления в сенате фразой: «Я полагаю, что Карфаген должен быть разрушен». Сенатор Публий Сципион Назика, наоборот, выступая по любому поводу, утверждал, что Карфаген должен существовать. Действительно, будущее является таким, каким мы его создаем. История показывает, что политические партии нужны народу, но только тогда, когда они действительно служат людям, понимают, выполняют, отражают и представляют на высшем политическом уровне их запросы и интересы, эффективно и целеустремленно сражаются за них, влияют на принятие управленческих решений. Белорусские политические партии до сих пор этого делать не научились.

Литература

1. *Котляров И. В.* Политические партии Беларуси: теория, история, современность: в 2 т. Минск, 2006.
2. *Котляров И. В.* Социология политических партий. Минск, 2011. – 388 с.
3. *Котляров И. В.* Феномен многопартийности в современном белорусском обществе. Минск, 2009. – 320 с.
4. *Котляров И. В.* Социология лидерства: теоретические, методологические и аксиологические аспекты. Минск, 2013. – 481 с.
5. *Бодрийяр Ж.* Симулякры и симуляция. Тула, 2013. – 204 с.
6. *Острогорский М.* Демократия и политические партии. М., 1997. – 640 с.

I. V. KOTLIAROV

kotlarov@socio.bas-net.by

POLITICAL PARTIES OF BELARUS AS SIMULACRA OF SOCIAL AREA (SOCIOLOGICAL DIMENSION)

Summary

In present time Belarusian multyparty system is in a global crisis. It has some constituent elements. Political parties are not able to work out popular and clear ideas, and to persuade people in accuracy, importance and necessity to put these ideas into effect, to convey to the masses, a clear shortage of people, who can provide these factors.

РЕФЕРАТЫ

УДК 517.988

Таныгина А. Н. Двухшаговый метод Ньютона–Канторовича для приближенного решения нелинейных операторных уравнений с регулярно гладкими операторами // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 5–10.

При помощи мажорант доказана сходимости и получены оценки скорости сходимости двухшагового метода Ньютона–Канторовича для приближенного решения нелинейных уравнений с операторами, удовлетворяющими модифицированному условию регулярной гладкости.

Библиогр. – 5 назв.

УДК 517.548.5+519.652

Янович Л. А., Худяков А. П. Формулы интерполяции с произвольным числом матричных узлов и произвольными входными параметрами // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 11–16.

Построены интерполяционные формулы для операторов одной, двух и многих функциональных матричных переменных, содержащие произвольные матрицы. Найдены классы матричных многочленов, для которых интерполяционные формулы точны. Предложен способ построения на основе данного интерполяционного матричного многочлена фиксированной степени других интерполяционных многочленов той же степени, но с большим числом узлов.

Библиогр. – 6 назв.

УДК 517.925

Белокурский М. С., Деменчук А. К. Решение задачи Еругина о существовании нерегулярных решений линейной системы с треугольным периодическим коэффициентом // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 17–22.

Рассматривается линейная система вида

$$\dot{x} = (AP(t) + B)x, \quad t \in R, \quad x \in R^n, \quad n \geq 2, \quad (1)$$

где A, B – постоянные $(n \times n)$ -матрицы; $P(t)$ – непрерывная треугольная ω -периодическая $(n \times n)$ -матрица. Получены необходимые и достаточные условия существования сильно нерегулярного периодического решения системы (1) как в случае вырожденного, так и в случае невырожденного коэффициента A . В случае невырожденного коэффициента A , если все диагональные элементы треугольного периодического коэффициента отличны от стационарных, то система (1) не имеет сильно нерегулярного периодического решения. Полученные результаты справедливы как в случае верхнего, так и в случае нижнего треугольного периодического коэффициента.

Библиогр. – 11 назв.

УДК 519.173

Бенедиктович В. И. Серединные собственные значения субкубического внешнепланарного графа // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 23–30.

В данной работе подтверждена гипотеза Мохара об оценке срединных собственных значений для субкубических внешнепланарных графов.

Ил. 6. Библиогр. – 7 назв.

УДК 515.127.13

Бахтин В. И., Воробей П. Н. Вычисление хаусдорфовых размерностей фракталов Морана с помощью кодирующих пространств // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 31–34.

В сообщении доказывается, что хаусдорфова размерность любого подмножества фрактала Морана совпадает с размерностью совокупности кодирующих это подмножество последовательностей при подходящем выборе метрики на кодирующем пространстве.

Библиогр. – 8 назв.

УДК 519.6

Лиходед Н. А., Толстиков А. А. Функции, задающие зависимости зернистых алгоритмов // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 35–41.

Разработан метод получения информационной структуры зернистых алгоритмов с аффинными зависимостями. Сформулированы и доказаны утверждения, позволяющие формализовать нахождение всех функций зависимостей глобального уровня.

Библиогр. – 9 назв.

УДК 621.396.6

Комаров Ф. Ф., Ксенофонтов М. А., Ткачев А. Г., Кривошеев Р. М., Островская Л. Е., Родионова В. Н., Тогамбаева А. К. **Влияние углеродных наноматериалов на структуру, электрофизические свойства полиуретана и эффективность экранировки от ЭМИ** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 42–46.

Изготовлены образцы на основе полиуретана с добавлением углеродных наноматериалов (УНМ) в различных концентрациях, исследованы их структурные, оптические и электрофизические свойства. Измерены характеристики взаимодействия электромагнитного излучения с образцами в диапазоне частот от 8,15 до 78,33 ГГц. Обнаружено заметное ослабление излучения в области частот 8,15–37,5 ГГц и сильное в области частот 37,5–78,33 ГГц образцами с добавкой таунита-МД.

Проведены исследования влияния добавления таунита в различных концентрациях на проводимость полиуретанового композита. Отмечено, что длина и удельная геометрическая поверхность УНТ добавки значительно влияют на проводимость композитного материала.

Получены спектры фотolumинесценции изготовленных образцов. Выявлено взаимодействие добавки с полимерной матрицей через функционализацию люминесцирующих групп полиуретана.

Исследования эффективности ослабления электромагнитного излучения позволили определить, что образец с добавлением таунита серии МД является наиболее перспективным для изготовления композиционных материалов на основе полиуретана для защиты от электромагнитных излучений широкого спектрального диапазона.

Табл. 1. Ил. 5. Библиогр. – 15 назв.

УДК 541.64:539(2+3):536.7

Кривогуз Ю. М., Крауклис А. В., Песецкий С. С., Жданок С. А., Борисевич К. О. **Влияние многостенных нанотрубок на прививку транс-этилен-1,2-дикарбоновой кислоты к макромолекулам полиолефинов** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 47–54.

Исследовано влияние многостенных нанотрубок (МУНТ) на протекание свободнорадикальной прививки транс-этилен-1,2-дикарбоновой кислоты к линейному полиэтилену низкой плотности (ЛПЭНП) и сополимеру этилена с пропиленом (сПП) с содержанием звеньев этилена ≈ 7 масс. %, осуществляемой методом реакционной экструзии. В качестве экструзионного реактора использовали материальный цилиндр двухшнекового экструдера TSSK-35/40 (диаметр шнеков 35 мм, L/D = 40, число независимых зон обогрева 10).

Установлено, что малые добавки МУНТ (0,01–0,3 масс. %) оказывают заметное влияние на ход прививки мономера к макромолекулам ЛПЭНП и сПП, а также структуру, механические свойства функционализированных продуктов, прочность и высокоэластичность их расплавов. Степень влияния добавок МУНТ определяется их концентрацией и природой ПО. Показана возможность повышения эффективности прививки мономера при концентрации МУНТ в реакционной системе $\approx 0,05$ масс. %.

Для сшивающегося при свободнорадикальной прививке ЛПЭНП добавки МУНТ, вводимые в количестве $\geq 0,1$ масс. %, ингибируют побочный процесс сшивания макромолекул, а для сПП, преимущественно деструктурирующего при функционализации, наблюдается каталитическое ускорение побочных реакций.

Ил. 2. Табл. 3. Библиогр. – 15 назв.

УДК 612.11+577.152

Григорьева Д. В., Горудко И. В., Соколов А. В., Шамова Е. В., Васильев В. Б., Панасенко О. М., Черенкевич С. Н. **Регуляция миелопероксидазой Ca^{2+} -сигнализации в нейтрофилах** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 55–60.

Показано, что миелопероксидаза (МПО) инициирует увеличение концентрации свободных ионов внутриклеточного кальция в нейтрофилах, обусловленное как выходом ионов кальция из внутриклеточных депо, так и входом внеклеточного Ca^{2+} через каналы плазматической мембраны. Установлено, что модифицированная гипогалоидными кислотами МПО сохраняет свою способность инициировать Ca^{2+} -сигнализацию в нейтрофилах. МПО-индуцированный вход Ca^{2+} в цитозоль нейтрофилов не связан с проявлением каталитической активности фермента, а обусловлен непосредственным связыванием МПО с α -субъединицей β_2 -интегрина нейтрофилов и активацией тирозинкиназы.

Ил. 2. Библиогр. – 15 назв.

УДК 547.514.47+547.466+547.786.1

Хлебус М. В., Рубинов Д. Б., Грибовский М. Г., Лахвич Ф. А. **Синтез производных 5-аминолевулиновой кислоты с циклогексановыми β -ди- и β -трикетонами** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 61–66.

Предложен ряд новых методов модификации карбоксильной, карбонильной и аминогруппы 5-аминолевулиновой кислоты с использованием β -ди- и β -трикарбонильных соединений циклогексанового ряда с целью повышения ее липофильных свойств. Полученные соединения перспективны для исследования в области фотодинамической диагностики и терапии раковых заболеваний.

Библиогр. – 18 назв.

УДК 577.15:581.1

Вайнер А. А., Колупаев Ю. Е., Ястреб Т. О., Хрунач В. А. **Индукция солеустойчивости 24-эпибрассинолидом проростков проса (*Panicum miliaceum*) с участием активных форм кислорода** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 67–70.

Показано, что обработка проростков проса 24-эпибрассинолидом (24-ЭБЛ) вызывала транзитное увеличение в них содержания пероксида водорода, последующую активацию антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутазы, каталазы, гваяколпероксидазы) и развитие устойчивости к солевому стрессу. Антиоксидант диметилтиомочевина и ингибитор НАДФН-оксидазы имидазол нивелировали эти процессы. Сделано заключение, что индукция солеустойчивости проса экзогенным 24-ЭБЛ опосредовано усилением генерации активных форм кислорода, связанным с повышением активности НАДФН-оксидазы.

Табл. 1. Ил. 3. Библиогр. – 15 назв.

УДК 577.15+579.22

Сапунова Л. И., Костеневич А. А., Лобанок А. Г., Тамкович И. О., Кулиш С. А., Бажанов Д. П., Яцевич К. К. **Ферментативная активность бактерий рода *Arthrobacter* и их генотипическая идентификация** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 71–77.

В результате двухступенчатого скрининга определены состав ферментных комплексов, продуцируемых бактериями рода *Arthrobacter* в средах со специфическим субстратом, и активность их отдельных компонентов, участвующих в трансформации белков, жиров и углеводов молока. Установлено, что наиболее сбалансированными по активности одновременно липаз, протеаз, β -галактозидаз и глюкозо(ксилозо)изомераз являются ферментные комплексы штаммов БИМ В-2239, БИМ В-2240, БИМ В-2241 и БИМ В-2242 *Arthrobacter* sp.

Методом анализа нуклеотидных последовательностей генов 16S рРНК указанные бактериальные культуры идентифицированы как *Arthrobacter sulfonivorans*. Последовательности их генов 16S рРНК протяженностью более 1400 п. о. депонированы в базе данных GenBank.

Детальное исследование условий эффективного гидролиза белков и жиров с участием продуцируемых штаммами БИМ В-2239, БИМ В-2240, БИМ В-2241 и БИМ В-2242 *Arthrobacter* sp. липаз и протеаз, а также трансформации лактозы молока и продуктов ее гидролиза с участием β -галактозидаз и глюкозо(ксилозо)изомераз позволит отобрать штамм-продуцент для разработки биотехнологии получения из молочного сырья гипоаллергенной биологически активной кормовой добавки пребиотического действия.

Табл. 3. Ил. 2. Библиогр. – 26 назв.

УДК 577.352

Зубрицкая Г. П., Лукьяненко Л. М., Венская Е. И., Слобожанина Е. И. **Индукцированная амилоидами модификация мембран эритроцитов человека. Влияние антиоксидантов** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 78–81.

Изучены активность ферментов антиоксидантной защиты в модифицированных амилоидами *in vitro* эритроцитах человека, а также влияние антиоксидантов на индуцированную амилоидами модификацию их мембран. Показано, что сочетанное действие амилоидных структур лизоцима и токоферола или кверцетина на эритроциты человека *in vitro* усиливает изменение микровязкости мембранных липидов, но активации процессов перекисного окисления липидов не обнаружено. Это происходит, скорее всего, за счет сохранения общей активности ферментов антиоксидантной защиты в эритроцитах человека *in vitro* под воздействием амилоидных олигомеров: снижается активность глутатионпероксидазы, но повышается активность каталазы, а активность супероксиддисмутазы остается на уровне значений, характерных для эритроцитов в контроле.

Ил. 1. Табл. 1. Библиогр. – 15 назв.

УДК 577.1+599:539.1.047

Головач В. А., Зафранская М. М., Буланова К. Я., Сяхович В. Э., Щеколова А. С., Квач С. В., Зинченко А. И., Бокуть С. Б. **Особенности связывания бис-(3',5')-циклического димерного гуанозинмонофосфата с тетрамерами гемоглобина человека** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 82–86.

Молекулярные модели комплексов бис-(3',5')-циклического димерного гуанозинмонофосфата (с-di-GMP) с гемоглобином человека в R-состоянии показали, что с-di-GMP связывается с тетрамерами гемоглобина со стороны β -входа в центральную полость гемопротеида в DPG-связующем сайте белка.

Анализ ингибирующего действия дигуанилата на связывание 1,8-ANS с тетрамерами гемопротеида, выполненный методом стационарной флуоресцентной спектроскопии, показал, что наиболее специфическим сайтом связывания с-di-GMP в олигомерах данного белка является его центральная регуляторная область (константа конкурентного ингибирования $2,91 \pm 0,54 \cdot 10^{-5}$ М). При высоких концентрациях 1,8-ANS ингибирующее действие циклического дигуанилата на связывание зонда становится неконкурентным (константа для неконкурентного ингибирования $0,79 \pm 0,11 \cdot 10^{-4}$ М), указывая на способность с-di-GMP взаимодействовать и с менее специфическими поверхностными участками оксигемоглобина человека.

Табл. 1. Ил. 2. Библиогр. – 14 назв.

УДК 502.52–027.21;631.6.02–027.2

Самсонова А. С. **Технология и эффективность применения микробного препарата Экобел** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 87–90.

Показана высокая эффективность применения микробного препарата Экобел в очистке почвы, загрязненной углеводородами в результате аварийного разлива нефти. Норма расхода препарата с микробной нагрузкой $1 \cdot 10^9$ КОЕ/мл из расчета нефть : препарат = 1 : 0,025 составила 1,25 л, содержащих 3,7 г биомассы микроорганизмов – деструкторов нефти, на 1 м^2 загрязненной почвы.

Табл. 2. Ил. 1 Библиогр. – 5 назв.

УДК 575.174.015.3: 57.088

Михайлова М. Е., Романишко Е. Л. **Оценка полиморфизма *ESR1-PvuII* гена эстрогенового рецептора у свиней с использованием метода ПЦР–ПДРФ и технологии HRM-анализа** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 91–95.

ДНК-типирование свиней по гену эстрогенового рецептора (ESR1) предлагается проводить с помощью технологии HRM-анализа (High Resolution Melting) и в дальнейшем использовать его как экспресс-метод для массового скрининга племенных животных с целью повышения плодovitости особей и усовершенствования селекционного процесса в свиноводстве. Проведена оценка полиморфизма *ESR1-PvuII* гена эстрогенового рецептора у свиней белорусской крупной белой породы ($n = 51$) с использованием HRM-анализа, который обладает высокой чувствительностью и экономически выгоден по сравнению с традиционным методом ПЦР–ПДРФ. Отработаны условия проведения ПЦР в реальном времени, подтверждена достоверность определения генотипов AA, BB, AB, а также проанализирована эффективность HRM-метода.

Ил. 4. Библиогр. – 7 назв.

УДК 504.3.054

Какарека С. В., Круковская О. Ю. **Особенности распределения диоксида азота в атмосферном воздухе улично-дорожной сети Минска** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 96–100.

Впервые изучены особенности распространения диоксида азота в атмосферном воздухе в Минске при особых условиях его рассеяния – в «уличных каньонах». Установлено, что помимо повышенных средних концентраций относительно других улиц, концентрации диоксида азота, при направлении ветра близком к перпендикулярному направлению улицы, на наветренной стороне превышают содержание на подветренной стороне в 1,2–1,4 раза. Оценена связь концентраций диоксида азота с интенсивностью движения автотранспорта с учетом структуры транспортных потоков и соответствующими уровнями выбросов.

Табл. 4. Библиогр. – 10 назв.

УДК 621.78.001, 621.793.18

Витязь П. А., Шматов А. А., Девойно О. Г. **Упрочнение быстрорежущих и штамповых сталей методом термоциклической обработки** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 101–105.

Исследованы композиционная структура, механизмы и характер упрочнения инструментальных сталей, подвергнутых термоциклической обработке (УТЦО). Изучено влияние процесса УТЦО на структуру и механические свойства инструментальных сталей. Разработанная технология повышает стойкость стальных инструментов в 1,4–12 раз, по сравнению с традиционно термообработанными.

Табл. 2. Ил. 4. Библиогр. – 15 назв.

УДК 532.516; 620.9

Гютюма В. Д. **Решение тепловой задачи в сдвиговом потоке локально-неравновесного течения вязкой жидкости** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 106–109.

Теоретически обосновывается постановка эксперимента по проверке концепции теории течения вязкой жидкости, в основу которого положены характерные для двух различных теоретических моделей особенности развития термогидродинамических процессов в сдвиговом течении между двумя плоскими параллельными стенками с учетом тепла диссипации.

Ил. 2. Библиогр. – 5 назв.

УДК 636.4.082.265

Зайцева Н. Б., Гришанова О. В., Шейко Р. И., Янович Е. А., Бурнос А. Ч. **Анализ воспроизводительных качеств свиноматок различных генотипов** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 110–114.

Высокий эффект гетерозиса выявлен у маток БКБ×БМ при использовании хряков йоркшир и ландрас датской селекции, показатель которого по многоплодию составил 6,48–5,50 % ($P \leq 0,05$), по молочности – 7,46–7,70 % ($P \leq 0,01$), по количеству поросят при отъеме – 9,2–8,2 % ($P \leq 0,05$) и массе гнезда – 2,8 % ($P \leq 0,05$). При сочетании маток БКБ×БМ с хряками пород йоркшир и ландрас канадской селекции эффект гетерозиса по многоплодию, молочности, количеству поросят при отъеме составил соответственно 4,6 % ($P \leq 0,05$), 6,3–3,3 % ($P \leq 0,01$), 7,1–5,1 % ($P \leq 0,05$).

Табл. 3. Библиогр. – 5 назв.

УДК 316.334.3:329 (476)

Котляров И. В. **Политические партии Беларуси как симулякры социального пространства (социологическое измерение)** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 4. С. 115–124.

В настоящее время белорусская многопартийность переживает глобальный кризис. Он имеет несколько составляющих компонентов. Это отсутствие у политических партий способности производить популярные, понятные людям идеи и убедить людей в правильности, важности и необходимости их внедрения в жизнь, неумение донести эти идеи до широких народных масс, явный дефицит людей, способных обеспечить реализацию этих факторов.

Библиогр. – 6 назв.