

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

Выходит шесть номеров в год

Журнал основан в июле 1957 года

МИНСК, БЕЛОРУССКАЯ НАУКА, 2014, ТОМ 58, № 6

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. Волоотовский, 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

Еровенко В. А., Гулина О. В., Мартон М. В. К теореме Гольдмана о возмущении операторов с замкнутой областью значений компактными операторами	5
Забрейко П. П., Матысик О. В. Теорема Красносельского и итерационные процедуры решения некорректных задач с самосопряженными операторами	9
Дыба Р. В. Обобщение теоремы двойственности Феффермана на случай компактных абелевых групп...	15
Урбанович Т. М. Особый случай краевой задачи Римана	18

ФИЗИКА

Комаров Ф. Ф., Константинов С. В., Стрельницкий В. Е. Радиационная стойкость наноструктурированных покрытий TiN, TiAlN, TiAlYN	22
Афанасьев А. А., Курочкин Ю. А., Рубинов А. Н. Пондеромоторная сила, действующая на диэлектрическую пластинку	28
Кудряшов В. В., Баран А. В. Спин-орбитальные взаимодействия в полупроводниковых круговых квантовых точках	33

Гончаренко А. М. Распространение вращающихся световых пучков в отрицательных селфоках	38
Толкачев Е. А. Двойная дуальность уравнений Борна–Инфельда и нелинейных лагранжиан КЭД	41
<i>ХИМИЯ</i>	
Матулис Вадим Э., Григорьев Ю. В., Суханова А. Г., Филиппова Ю. В., Крупнова И. А., Ивашкевич О. А. Квантовохимическое и экспериментальное исследование реакций нуклеофильного замещения в ряду N-алкил-3-нитро-1,2,4-триазолов	47
Насонов И. В., Лихачева М. И., Киселев П. А., Бовдей Н. И., Савчук А. Л., Жабинский В. Н., Литвиновская Р. П., Хрипач Н. Б. Наноструктурированные комплексы стероидного фитогормона: новый подход к защите от вирусной инфекции	53
Пашковский Ф. С., Донцу Ю. С., Лахвич Ф. А. Нитрилоксидный подход к синтезу производных тетрагидробензизоксазолов и тетрагидроиндазолов с дополнительным гетероциклическим фармакофорным фрагментом	57
Дихтиевская Л. В. Солюбилизация неполярных фторуглеродных и углеводородных соединений в водных растворах ионогенных фторированных и углеводородных поверхностно-активных веществ	62
Кошевар В. Д. Стабилизация водной дисперсии эпоксидного олигомера микрочастицами органической природы	68
Леонтьев В. Н., Коваленко Н. А., Супиченко Г. Н., Шутова А. Г. Энантиомеры монотерпеновых соединений в эфирных маслах растений рода <i>Thuja</i>	74
<i>БИОЛОГИЯ</i>	
Галиновский Д. В., Кожемяко Е. Н., Подвицкий Т. А., Анисимова Н. В., Хотылёва Л. В., Кильчевский А. В. ПДРФ-анализ генов целлюлозосинтаз льна (<i>Linum usitatissimum</i> L.)	77
Белый П. Н., Цуриков А. Г., Голубков В. В., Сидорович Е. А. Новые данные о лишайниках рода <i>Cetrelia</i> (Lecanorales, Ascomycota) в Беларуси	83
<i>МЕДИЦИНА</i>	
Ковалева М. В., Афонин В. Ю. Особенности физиолого-биохимических свойств крыс линии SHR в условиях генетически обусловленной артериальной гипертензии	89
Юшкевич П. Ф., Висмонт Ф. И. Противоишемический и антиаритмический эффекты дистантного ишемического пре- и посткондиционирования у крыс с сахарным диабетом	93
<i>ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ</i>	
Агабеков В. Е., Гайшун И. В., Чуйко М. М., Шнип А. И., Стрижаков Д. А. Модель процесса быстрого пиролиза мелкодисперсных фракций растительного сырья	101
Тютюма В. Д. Экспериментальное подтверждение модели локально-неравновесного течения вязкой жидкости	107
<i>СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ</i>	
Яковенко Н. В. Специфика художественного моделирования произведения средствами другого языка (на примере переводов романа И. Мележа «Минское направление») (на бел. яз.)	112
<i>АГРАРНЫЕ НАУКИ</i>	
Норейко А. Ю., Герман Ю. И. Изучение продуктивных качеств кроликов зарубежного генофонда, разводимых в Республике Беларусь	119

ДОКЛАДЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ. 2014. Т. 58, № 6
 Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
 свидетельство о регистрации № 387 от 18.05.2009.

Редактор Т. П. Петрович

Компьютерная верстка Л. И. Кудерко

Сдано в набор 10.12.2014. Выпуск в свет 30.12.2014. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Печать цифровая.
 Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 138 экз. Заказ 233.

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 6

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

Erovenko V. A., Gulina O. V., Marton M. V. To Goldman's theorem of perturbation of the operators with a closed range by compact operators.....	5
Zabreiko P. P., Matysik O. V. Krasnoselski's theorem and iteration procedures for solution of ill-posed problems with self-adjoint operators.....	9
Dyba R. V. Generalization of Fefferman's duality theorem to the case of compact Abelian groups.....	15
Urbanovich T. M. Special case of the Riemann boundary-value problem.....	18

PHYSICS

Komarov F. F., Konstantinov S. V., Strel'nitskij V. E. Radiation resistance of nanostructured TiN, TiAlN, TiAlYN coatings.....	22
Afanas'ev A. A., Kurochkin Yu. A., Rubinov A. A. Ponderomotive force acting on the dielectric plate.....	28
Kudryashov V. V., Baran A. V. Spin-orbit interactions in semiconductor circular quantum dots.....	33

Goncharenko A. M. Propagation of rotary light beams in the negative selfocs	38
Tolkachev E. A. Double duality of the Born–Infeld equations and nonlinear lagrangian of QED	41
<i>CHEMISTRY</i>	
Matulis Vadim E., Grigoriev Y. V., Sukhanova A. G., Filippova Y. V., Krupnova I. A., Ivashkevich O. A. Quantum-chemical and experimental study of nucleophilic substitution reactions of N-alkyl-3-nitro-1,2,4-triazoles	47
Nasonau I. V., Likhachova M. I., Kiselev P. A., Bovdei N. I., Sauchuk A. L., Zhabinskii V. N., Litvinovskaya R. P., Khripach N. B. Nanostructured complexes of steroid phytohormone: a new approach to an infectious virus protection	53
Pashkovsky F. S., Dontsu Yu. S., Lakhvich F. A. Nitrile oxide approach to the synthesis of tetrahydrobenzoxazole and tetrahydroindazole derivatives with additional heterocyclic pharmacophore fragment.....	57
Dikhtievskaya L. V. Solubilization of nonpolar fluorocarbon and hydrocarbon substances in aqueous solutions of fluorinated and hydrocarbon surfactants.....	62
Koshevar V. D. Stabilization of water dispersion of an epoxy oligomer by microparticles of the organic nature.....	68
Leontiev V. N., Kavalenka N. A., Supichenka H. M., Shutava H. G. Enantiomers of monoterpene compounds in the <i>Thuja</i> essential oils.....	74
<i>BIOLOGY</i>	
Galinousky D. V., Kazhamiako E. N., Padvitski Ts. A., Anisimova N. V., Khotyleva L. V., Kilchevsky A. V. RFLP-analysis of cellulose synthase genes of flax (<i>Linum usitatissimum</i> L.).....	77
Bely P. N., Tsurikov A. G., Golubkov V. V., Sidorovich E. A. New data on the lichen genus of <i>Cetrelia</i> (Lecanorales, Ascomycota) in Belarus.....	83
<i>MEDICINE</i>	
Kavaleva M. V., Afonin V. Yu. Specific features of physiological-biological properties of SHR rats in genetically determinate arterial hypertension.....	89
Jushkevich P. F., Vismont F. I. Antiischemic and antiarrhythmic effects of remote ischemic pre- and postconditioning in rats with diabetes.....	93
<i>TECHNICAL SCIENCES</i>	
Agabekov V. E., Gaishun I. V., Chuiko M. M., Shnip A. I., Strizhakov D. A. Model of the process of fast pyrolysis of pine sawdust	101
Tyutyuma V. D. Experimental confirmation of the model of locally nonequilibrium viscous fluid flow	107
<i>SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES</i>	
Yakovenko N. V. Specificity of fiction modeling during the translation of an artwork by means of another language (by the example of translations of the novel “Minsk direction” by I. Melezh).....	112
<i>AGRARIAN SCIENCES</i>	
Noreyko A. Yu., German Yu. I. Study of the productivity quality of foreign gene pool rabbits bred in the Republic of Belarus	119

МАТЕМАТИКА

УДК 517.984

В. А. ЕРОВЕНКО, О. В. ГУЛИНА, М. В. МАРТОН

К ТЕОРЕМЕ ГОЛЬДМАНА О ВОЗМУЩЕНИИ ОПЕРАТОРОВ С ЗАМКНУТОЙ ОБЛАСТЬЮ ЗНАЧЕНИЙ КОМПАКТНЫМИ ОПЕРАТОРАМИ

(Представлено академиком И. В. Гайшуном)

Белорусский государственный университет, Минск

Поступило 13.10.2014

Известно, что согласно теореме Гольдмана, нормально разрешимые операторы, вообще говоря, неустойчивы при возмущении компактными операторами. Сообщение посвящено существенно полурегулярным и существенно регулярным операторам в банаховом пространстве, которые сужают класс нормально разрешимых операторов, но для которых можно рассчитывать на сохранение замкнутости области значений при указанном возмущении.

Пусть T – ограниченный линейный оператор на бесконечномерном банаховом пространстве X над полем комплексных чисел \mathbf{C} и $\mathbf{B}(X)$ – банахово пространство ограниченных линейных операторов, действующих на X .

Рассмотрим произвольный оператор $T \in \mathbf{B}(X)$. Обозначим через $N(T) := \{x \in X : Tx = 0\}$ ядро оператора T , а через $R(T)$ – область значений оператора T . Обозначим обобщенное ядро линейного ограниченного оператора $T \in \mathbf{B}(X)$ через $N^\infty(T) := \bigcup_{k=1}^{\infty} \{N(T^k)\}$ и обобщенную область значений оператора $T \in \mathbf{B}(X)$ через $R^\infty(T) := \bigcap_{k=1}^{\infty} \{R(T^k)\}$. Для оператора $T \in \mathbf{B}(X)$ определим также следующие числовые характеристики: $\alpha(T) := \dim N(T)$ – нуль оператора T , или другими словами размерность ядра оператора T , и $\beta(T) := \text{codim } R(T) = \dim(X / R(T))$ – дефект оператора T , или размерность коядра оператора T .

О п р е д е л е н и е 1. Оператор $T \in \mathbf{B}(X)$ называется *полурегулярным*, если его область значений замкнута, $\overline{R(T)} = R(T)$ и выполняется включение $N(T) \subset R^\infty(T)$. Множество всех полурегулярных операторов обозначим через $\mathbf{D}(X)$, т. е. $\mathbf{D}(X) := \{T \in \mathbf{B}(X) : \overline{R(T)} = R(T) \text{ и } N(T) \subset R^\infty(T)\}$.

Условие вложения ядра оператора в обобщенную область значений оператора $N(T) \subset R^\infty(T)$, которое присутствует в определении полурегулярных операторов, впервые появилось в классической работе Т. Като о возмущении линейных операторов. Поэтому вложение ядра в обобщенную область значений $N(T) \subset R^\infty(T)$ можно назвать *включением Като*.

Если обе числовые характеристики $\alpha(T)$ и $\beta(T)$ ограниченного оператора T с замкнутой областью значений бесконечны, то, согласно хорошо известной классической теореме М. А. Гольдмана [1, теорема 1], можно указать такой линейный компактный оператор с бесконечномерной областью значений, даже сколь угодно малый по норме, возмущение которым нарушает свойство замкнутости области значений.

Однако если ядро оператора $N(T)$ «невелико», относительно его области значений, точнее относительно обобщенной области значений $R^\infty(T)$, т. е. речь идет о включении Като $N(T) \subset R^\infty(T)$, то для коммутирующих компактных возмущений можно рассчитывать на устойчивость свойства замкнутости области значений возмущенного оператора (см., например, [2]).

О п р е д е л е н и е 2. Оператор $T \in \mathbf{B}(X)$ называется *относительно регулярным*, если существует такой оператор $S \in \mathbf{B}(X)$, что выполняется равенство $TST = T$.

Оператор $S \in \mathbf{B}(X)$, обеспечивающий выполнение условия $TST = T$, называется *обобщенным обратным оператором* для оператора $T \in \mathbf{B}(X)$, или *псевдообратным оператором* для оператора T . Свойства псевдообратного оператора описаны в [3].

О п р е д е л е н и е 3. Относительно регулярный оператор $T \in \mathbf{B}(X)$ называется *регулярным*, если для него выполняется включение ядра оператора в обобщенную область значений, т. е. $N(T) \subset R^\infty(T)$. Множество всех регулярных операторов обозначим через $\mathbf{S}(X)$, т. е. $\mathbf{S}(X) := \{T \in \mathbf{B}(X) : T \text{ имеет обобщенный обратный и } N(T) \subset R^\infty(T)\}$.

Рассмотрим теперь условие существенного вложения ядра оператора в обобщенную область значений, т. е. условие вида $N(T) \subset_e R^\infty(T)$. Запись $M \subset_e N$ читается так – множество M *существенно содержится* в множестве N , в случае если M и N – подпространства банахова пространства X , означает, что существует конечномерное подпространство $F \subset X$ такое, что $M \subset N + F$. Условие существенного включения ядра оператора в обобщенную область значений $N(T) \subset_e R^\infty(T)$ можно записать в следующем виде: $N(T) \subset R^\infty(T) + F$, где $F \subset X$ – конечномерное подпространство банахова пространства X . Условие существенного вложения ядра оператора в обобщенную область значений $N(T) \subset_e R^\infty(T)$ назовем *существенным включением Като*.

О п р е д е л е н и е 4. Оператор $T \in \mathbf{B}(X)$ называется *существенно полурегулярным*, если его область значений замкнута $\bar{R}(T) = R(T)$ и выполняется существенное включение Като $N(T) \subset_e R^\infty(T)$. Множество всех существенно полурегулярных операторов обозначим через $\mathbf{D}_e(X)$.

О п р е д е л е н и е 5. Относительно регулярный оператор $T \in \mathbf{B}(X)$ называется *существенно регулярным*, если для него выполняется существенное включение Като $N(T) \subset_e R^\infty(T)$. Соответственно, множество всех существенно регулярных операторов обозначим через $\mathbf{S}_e(X)$.

Заметим, что в определении существенно регулярного оператора существенное включение Като $N(T) \subset_e R^\infty(T)$ можно заменить на эквивалентные существенные включения, а именно, справедливо следующее утверждение.

Т е о р е м а 1. Для оператора $T \in \mathbf{B}(X)$ следующие три условия, а именно, для ядра оператора $N(T)$ и обобщенной области значений $R^\infty(T)$, обобщенного ядра оператора $N^\infty(T)$ и области значений $R(T)$, обобщенного ядра оператора $N^\infty(T)$ и обобщенной области значений $R^\infty(T)$, эквивалентны:

$$N(T) \subset_e R^\infty(T), N^\infty(T) \subset_e R(T), N^\infty(T) \subset_e R^\infty(T).$$

Это утверждение непосредственно следует из следующей леммы.

Л е м м а 1. Для оператора $T \in \mathbf{B}(X)$ следующие два включения эквивалентны $N(T) \subset R(T^n) \Leftrightarrow N(T^n) \subset R(T)$.

Относительно регулярные операторы, действующие в банаховом пространстве, обладают важным свойством для $N(T)$ и $R(T)$, сформулированным в следующей лемме.

Л е м м а 2. Оператор T относительно регулярен тогда и только тогда, когда $N(T)$ и $R(T)$ – замкнутые дополняемые подпространства банахова пространства X .

Доказательство леммы приведено, например, в [4; 5].

Из леммы 2 следует, что для рассмотренных выше классов полурегулярных $\mathbf{D}(X)$, регулярных $\mathbf{S}(X)$, существенно полурегулярных $\mathbf{D}_e(X)$ и существенно регулярных $\mathbf{S}_e(X)$ операторов, действующих на банаховом пространстве X , справедливы включения $\mathbf{S}(X) \subset \mathbf{D}(X)$ и $\mathbf{S}_e(X) \subset \mathbf{D}_e(X)$.

Л е м м а 3. Если $T \in \mathbf{B}(X)$ – полуфредгольмов оператор, то T является существенно полурегулярным оператором.

Л е м м а 4. Если $T \in \mathbf{B}(X)$ – фредгольмовый оператор, то T является существенно регулярным оператором.

Таким образом, для существенно полурегулярных $\mathbf{D}_e(X)$, существенно регулярных $\mathbf{S}_e(X)$ и фредгольмовых $\Phi(X)$ операторов, действующих на банаховом пространстве X , справедливо следующее включение $\Phi(X) \subset \mathbf{S}_e(X) \subset \mathbf{D}_e(X)$. Заметим также, что фредгольмовы операторы, вообще говоря, не являются регулярными, хотя они являются существенно регулярными.

З а м е ч а н и е 1. Если X – гильбертово пространство, то тогда класс регулярных операторов $\mathbf{S}(X)$, или класс операторов типа Сафара, совпадает с классом полурегулярных операторов $\mathbf{D}(X)$ и, соответственно, класс существенно регулярных операторов $\mathbf{S}_e(X)$ совпадает с классом существенно полурегулярных операторов $\mathbf{D}_e(X)$.

Класс существенно полурегулярных операторов занимает промежуточное положение между нормально разрешимыми и полуфредгольмовыми операторами. Для того чтобы возмущенный

оператор $T + K$, где $K \in \mathbf{B}(X)$ – компактный оператор, обладал теми же свойствами, что и существенно полурегулярный оператор T , необходимо наложить на оператор K дополнительное ограничение. Таким ограничением явилось требование перестановочности операторов T и K , т. е. выполнение равенства $TK = KT$.

Заметим, что, пользуясь условием коммутруемости операторов, получены также другие результаты об устойчивости существенно полурегулярных операторов и результаты об инвариантности порожденными ими существенного спектра Апостола при строго сингулярных возмущениях [6; 7].

Следующая теорема является обобщением результата Грабинера о возмущении существенно полурегулярного оператора коммутирующим компактным оператором (см., например, теорему 5.9 [8]).

Т е о р е м а 2. Пусть $T \in \mathbf{B}(X)$ – существенно полурегулярный оператор и $K \in \mathbf{B}(X)$ – компактный оператор, коммутирующий с оператором T , т. е. выполняется равенство $TK = KT$, тогда возмущенный оператор $T + K$ также существенно полурегулярный оператор.

Вообще говоря, в теореме 2 нельзя заменить условие «существенно полурегулярный оператор» на условие «полурегулярный оператор», что проверяется на следующем контрпримере.

К о н т р п р и м е р 1. Пусть $T = I$ в гильбертовом пространстве H с ортонормированным базисом $\{e_i; i = 1, 2, \dots\}$, а A – ортогональный проектор на подпространство, порожденное вектором e_1 . Тогда T – полурегулярный оператор, A – оператор конечного ранга (т. е. компактный), кроме того выполняется равенство $TA = AT$, но $T - A$ не является полурегулярным оператором.

Отметим также существенность условия коммутруемости операторов T и K в теореме 2. Соответствующие операторы определены в следующем контрпримере, в котором T – полурегулярный оператор, а K – это компактный оператор с бесконечномерной областью значений.

К о н т р п р и м е р 2. Пусть H – гильбертово пространство с ортонормированным базисом $\{e_{ij}; i, j - \text{целые}, i \geq 1\}$, на котором определены ограниченные операторы T и K с помощью следующих равенств $Te_{i0} = 0$, $Ke_{i0} = (\varepsilon / i)e_{i1}$ и $Te_{ij} = e_{ij-1}$, $Ke_{ij} = 0$, для $j \neq 0$. Тогда $\|K\| = \varepsilon$, $TK \neq KT$, $N(T) = \overline{L}\{e_{i0}; i \geq 1\}$, $N(T) \subset R^\infty(T)$ и $R(T) = R(T)$, т. е. T – полурегулярный оператор, но область значений $R(T + K)$ незамкнута, поэтому оператор $T + K$ не является существенно полурегулярным.

Известно, что свойство нормальной разрешимости оператора с бесконечными числовыми характеристиками $\alpha(T)$ и $\beta(T)$, действующего в бесконечномерном банаховом пространстве, неустойчиво при компактных возмущениях. В этом можно убедиться на следующем простом примере. Нулевой оператор, обозначим его через θ , нормально разрешим, но возмущенный оператор $\theta - A$, где A – компактный оператор с $\dim R(A) = \infty$, уже не является нормально разрешимым. Заметим, что для ненулевых операторов общий результат о неустойчивости нормальной разрешимости без каких-либо ограничений на оператор, действующий в банаховом пространстве, получен в теореме М. А. Гольдмана. В то же время известно, что фредгольмовы операторы устойчивы при компактных возмущениях. Таким образом, существенно регулярные операторы занимают промежуточное положение между классами нормально разрешимых и фредгольмовых операторов, которые, в свою очередь, отличаются рядом свойств, в том числе и свойствами устойчивости при различных возмущениях этих операторов.

Относительно регулярный оператор с бесконечномерным ядром и коядром, вообще говоря, неустойчив при компактном возмущении.

Л е м м а 5. Пусть оператор $T \in \mathbf{B}(X)$ – относительно регулярный и обе его характеристики $\alpha(T)$ и $\beta(T)$ бесконечны. Тогда существует компактный оператор $K \in \mathbf{B}(X)$ такой, что область значений оператора $T - K$ незамкнута.

Д о к а з а т е л ь с т в о. Доказательство леммы вполне конструктивное. Пусть оператор $T \in \mathbf{B}(X)$ – относительно регулярный и обе его характеристики $\alpha(T)$ и $\beta(T)$ бесконечны. Представим пространство X в виде прямой суммы области значений $R(T)$ оператора T и некоторого соответствующего подпространства X_1 , т. е. $X = R(T) \oplus X_1$.

Предположим, что найдется такой линейный компактный оператор K_1 , действующий из $N(T)$ в X_1 , т. е. $K_1 : N(T) \rightarrow X_1$, ядро которого состоит из нуля, т. е. $N(K_1) = \{0\}$. Обозначим через P про-

ектор пространства X на $N(T)$ и определим компактный оператор $K = K_1 P$, для ядра и области значений которого справедливы следующие соотношения:

$$N(K) = N(P) \text{ и } R(T) \cap R(K) = \{0\}.$$

Рассмотрим возмущенный оператор $T - K$. Ядро оператора $T - K$ состоит из элементов, удовлетворяющих уравнению $(T - K)x = 0$, откуда $x \in N(T) \cap N(K)$. Таким образом, ядро оператора $T - K$ состоит из нуля, т. е. $N(T - K) = \{0\}$.

Предположим, что область значений возмущенного оператора $T - K$ замкнута. Тогда для любого $k > 0$ и для всех $x \in X$ выполняется неравенство $\|(T - K)x\| \geq k \|x\|$. В частности, при $x \in R(P)$ неравенство $\|(T - K)x\| \geq k \|x\|$ переписывается в виде $\|Kx\| \geq k \|x\|$, т. е. область значений сужения оператора K на $R(P)$ замкнута. С другой стороны, область значений сужения оператора K на $R(P)$ совпадает с областью значений оператора K .

Подходящий компактный оператор $K_1 : N(T) \rightarrow X_1$, нарушающий замкнутость области значений относительно регулярного оператора $T \in \mathbf{B}(X)$ с бесконечными числовыми характеристиками $\alpha(T)$ и $\beta(T)$, всегда существует. В общем случае банахова пространства построение искомого оператора K_1 детально изложено в работе [9]. Заметим, что в лемме 5 рассматривается относительно регулярный оператор $T \in \mathbf{B}(X)$, но не полуфредгольмовый.

Если на существенно регулярный оператор $T \in \mathbf{B}(X)$ и компактный оператор $K \in \mathbf{B}(X)$ наложить дополнительное ограничение, а именно, добавить условие коммутативности операторов T и K , т. е. $TK = KT$, то можно получить следующий результат.

Т е о р е м а 3. Пусть $T \in \mathbf{S}_e(X)$ – существенно регулярный оператор, для которого, по крайней мере, одна из числовых характеристик $\alpha(T)$ или $\beta(T)$ конечна, т. е. $\alpha(T) < \infty$ или $\beta(T) < \infty$. Пусть $K \in \mathbf{B}(X)$ – компактный оператор, коммутирующий с оператором T , т. е. справедливо $TK = KT$. Тогда возмущенный оператор $T - K$ также существенно регулярный, т. е. оператор $T - K \in \mathbf{S}_e(X)$.

Другие классы возмущений для существенно регулярных операторов, действующих в банаховом пространстве, как подмножества операторов с замкнутой областью значений рассмотрены в [10; 11].

В заключение заметим, что относительно регулярные операторы, вообще говоря, неустойчивы при компактных возмущениях, однако при дополнительных ограничениях на размерность ядра или коядра относительно регулярные операторы становятся устойчивыми при компактных возмущениях. Так, если $T \in \mathbf{B}(X)$ – относительно регулярный оператор и $K \in \mathbf{B}(X)$ – компактный оператор, то оператор $T - K$ является относительно регулярным тогда и только тогда, когда $\alpha(T) < \infty$ или $\beta(T) < \infty$ [12].

Литература

1. Гольдман М. А. // Докл. АН СССР. 1955. Т. 100, № 2. С. 201–204.
2. Еровенко В. А., Мартон М. В. // Докл. НАН Беларуси. 2004. Т. 48, № 6. С. 16–20.
3. Еровенко В. А., Гулина О. В. // Докл. НАН Беларуси. 2008. Т. 52, № 6. С. 27–32.
4. Caradus S. R. Generalized Inverses and operator theory. Kingston, 1978.
5. Schmoeger Ch. // J. Math. Anal. Appl. 1993. Vol. 175, N 1. P. 315–320.
6. Еровенко В. А., Мартон М. В. // Докл. НАН Беларуси. 2009. Т. 53, № 4. С. 18–22.
7. Еровенко В. А., Мартон М. В. // Докл. НАН Беларуси. 2010. Т. 54, № 2. С. 38–42.
8. Grabiner S. // J. Math. Soc. Japan. 1982. Vol. 34, N 2. P. 317–337.
9. Goldberg S. Unbounded linear operators. Theory and applications. N. Y., 1966.
10. Еровенко В. А., Гулина О. В. // Докл. НАН Беларуси. 2011. Т. 55, № 2. С. 27–31.
11. Еровенко В. А., Гулина О. В. // Докл. НАН Беларуси. 2012. Т. 56, № 6. С. 22–27.
12. Schmoeger Ch. // Portugalie Math. 1994. Vol. 51, N 4. P. 617–628.

V. A. EROVENKO, O. V. GULINA, M. V. MARTON

erovenko@bsu.by; gulina_o@mail.ru; marton_m@mail.ru

TO GOLDMAN'S THEOREM OF PERTURBATION OF THE OPERATORS WITH A CLOSED RANGE BY COMPACT OPERATORS

Summary

The article is devoted to the stability properties of the essentially semi-regular operators and essentially regular operators in Banach space under compact commuting perturbations.

УДК 519.6+517.983.54

П. П. ЗАБРЕЙКО¹, О. В. МАТЫСИК²

ТЕОРЕМА КРАСНОСЕЛЬСКОГО И ИТЕРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕДУРЫ РЕШЕНИЯ НЕКОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ С САМОСОПРЯЖЕННЫМИ ОПЕРАТОРАМИ

(Представлено членом-корреспондентом Л. А. Яновичем)

¹Белорусский государственный университет, Минск²Брестский государственный университет им. А. С. Пушкина

Поступило 15.09.2014

В работе [1] было показано, что известная теорема М. А. Красносельского о сходимости последовательных приближений для уравнения второго рода $x = Bx + f$ с самосопряженным оператором B в гильбертовом пространстве X в случае, если это уравнение некорректно, позволяет получить для этого уравнения типичные утверждения теории некорректных задач. В частности, установить условия сходимости приближенных решений к точному, условия сходимости к нулю невязок и поправок, выяснить поведение приближений в случае истокообразных точных решений или истокообразных правых частей f в уравнении $x = Bx + f$ и т. д.

Цель сообщения – показать, что из результатов статьи [1] вытекают основные результаты о поведении различных итераций при приближенном решении некорректных уравнений первого рода $Ax = y$ с самосопряженным оператором A в гильбертовом пространстве, описать основную общую конструкцию для перехода от уравнения $Ax = y$ к уравнению $x = Bx + f$, а затем применить результаты [1] к полученному уравнению. Установленные таким образом теоремы будут содержать ряд классических результатов об итерационных процедурах решения некорректных задач и ряд новых.

1. Пусть A – самосопряженный оператор в гильбертовом пространстве X . Рассматривается линейное уравнение

$$Ax = y, \quad (1)$$

где $y \in X$. Нас будет интересовать случай, когда 0 является точкой спектра SpA оператора A .

Пусть $\varphi(\lambda)$ – некоторая вещественная и аналитическая на спектре оператора A функция, принимающая в нулевой точке значение 1 ; тогда

$$\varphi(\lambda) = 1 - \lambda\psi(\lambda),$$

где $\psi(\lambda)$ тоже вещественная и аналитическая на SpA функция. Простейшими примерами таких функций могут служить полиномы или рациональные функции.

Для каждой функции $\varphi(\lambda)$ описанного вида определен оператор $\varphi(A)$; он также является самосопряженным. Определен также и оператор $\psi(A)$. Очевидно равенство

$$x - \varphi(A)x = \psi(A)Ax.$$

Из этого уравнения вытекает, что каждое решение x уравнения (1) является решением уравнения

$$x = \varphi(A)x + \psi(A)y. \quad (2)$$

Обратное тоже верно при дополнительном предположении, что 0 не является собственным значением оператора $\psi(A)$. Действительно, (2) можно переписать в виде

$$\psi(A)(Ax - y) = 0,$$

откуда следует, что x является и решением уравнения (2). Предположение, что 0 не является собственным значением оператора $\psi(A)$ эквивалентно тому, что 1 не является собственным значе-

нием оператора $\varphi(A)$. Последнее, очевидно, означает, что решение уравнения (2), если оно существует, единственно. Таким образом, если уравнение (1) имеет единственное решение x_* , то оно является единственным решением уравнения (2), и наоборот, если уравнение (2) имеет единственное решение, то оно будет и единственным решением уравнения (1). Отметим, что в общем случае (без предположения, что 0 не является собственным значением оператора A) в случае разрешимости уравнения (1) решение x уравнения (2) не обязательно является решением уравнения (1), однако решением уравнения (1) в этом случае обязательно является элемент $x + \varphi(A)(\xi - x)$, где ξ – произвольное решение уравнения (1).

Итак, вместо анализа свойств разрешимости уравнения (1) можно исследовать уравнение (2). Однако последнее уравнение имеет вид $x = Bx + f$ с $B = \varphi(A)$, $f = \psi(A)y$, и для его исследования естественно использовать отмеченную выше теорему М. А. Красносельского. Условия последней будут выполнены, если $\|\varphi(A)\| = 1$ и -1 не является собственным значением оператора $\varphi(A)$. Так как по теореме Данфорда [2] $Sp \varphi(A) = \varphi(SpA)$, и оператор $\varphi(A)$ является самосопряженным, то равенство $\|\varphi(A)\| = 1$ эквивалентно неравенству

$$|\varphi(\lambda)| \leq 1 \quad (\lambda \in SpA) \quad (3)$$

(напомним, что $\varphi(0) = 1$ и потому (3) означает $\|\varphi(A)\| = 1$). Второе условие означает, что никакой корень уравнения $\varphi(\lambda) + 1 = 0$ не является собственным значением оператора A . Итак, верна

Т е о р е м а 1. Пусть A – самосопряженный оператор в гильбертовом пространстве X и его область значений не является замкнутой. Пусть $\varphi(\lambda)$ – аналитическая в окрестности SpA функция, для которой

а) $\varphi(\lambda) = 1 - \lambda\psi(\lambda)$;

б) $|\varphi(\lambda)| \leq 1 \quad (\lambda \in SpA)$;

в) нули функции $\varphi(\lambda) + 1$ не являются собственными значениями оператора A .

Тогда, если уравнение (1) разрешимо, то последовательные приближения

$$x_{n+1} = \varphi(A)x_n + \psi(A)y \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (4)$$

сходятся к одному из решений уравнения (1).

Выбирая различные, удовлетворяющие условиям а), б), в) теоремы 1, функции $\varphi(\lambda)$ и $\psi(\lambda)$, получим разнообразные итерационные схемы приближенного построения решений уравнения (1). В частности, (см. [3]) выбрав $\varphi(\lambda) = (1 - \alpha\lambda)^k$ (k – натуральное число), получим $\psi(\lambda) = \frac{1 - (1 - \alpha\lambda)^k}{\lambda}$ и, далее, если $SpA \subseteq \left[0, \frac{2}{\alpha}\right]$ и $\lambda = \frac{2}{\alpha}$ – не собственное значение оператора A , приходим к явному методу итераций $x_{n+1} = (E - \alpha A)^k x_n + A^{-1}[E - (E - \alpha A)^k]y$. Аналогично, выбрав $\varphi(\lambda) = \frac{1 - \alpha\lambda^k}{1 + \alpha\lambda^k}$ (k – снова натуральное число), получим $\psi(\lambda) = \frac{2\alpha\lambda^{k-1}}{1 + \alpha\lambda^k}$. Итерационный метод (4) при этом совпадает с неявным методом итераций, определяемым равенствами $(E + \alpha A^k)x_{n+1} = (E - \alpha A^k)x_n + 2\alpha A^{k-1}y$. При $\alpha > 0$ и нечетном k получаем, что условия теоремы 1 выполнены, если $SpA \subset [0, \infty)$; при $\alpha > 0$ и четном k получаем, что условия теоремы 1 выполнены всегда. В случае $\alpha < 0$ ситуация иная; при k нечетном условия теоремы 1 выполнены, если $SpA \subset (-\infty, 0]$, а в случае когда k – четное, условия теоремы 1 выполнены, если $SpA = \{0\}$.

Естественно возникает вопрос о скорости сходимости приближений (4). Приведем здесь вычисления из [1], модифицированные непосредственно для уравнения (2). Из (4), очевидно, вытекает

$$x_n = \varphi^n(A)x_0 + (E + \varphi(A) + \varphi^2(A) + \dots + \varphi^{n-1}(A))\psi(A)y \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (5)$$

а из (2) –

$$x_* = \varphi^n(A)x_* + (E + \varphi(A) + \varphi^2(A) + \dots + \varphi^{n-1}(A))\psi(A)y \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (6)$$

Вычитая (6) из (5), получим

$$x_n - x_* = \varphi^n(A)(x_0 - x_*) \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

и далее

$$\|x_n - x_*\|^2 = \int_{SpA} |\varphi(\lambda)|^{2n} (dE_\lambda(x_0 - x_*), x_0 - x_*). \quad (7)$$

Отметим, что из формулы (7) вытекает сходимость приближений x_n к x_* в силу теоремы Лебега о предельном переходе под знаком интеграла для сходящейся почти всегда к нулю последовательности. Из этой формулы следует, что эта сходимость тем быстрее, чем «меньше» функция на спектре оператора A . При этом эта скорость существенно зависит от свойств «гладкости» начальной ошибки $x_0 - x_*$, а эти последние – от свойств «гладкости» правой части y и свойств «некорректности» оператора A .

2. Рассмотрим теперь вопрос о поведении невязок $Ax_n - y$ и поправок $x_{n+1} - x_n = \varphi(A)x_n + \psi(A)y - x_n$ для приближений (4).

Из (5) следует

$$\begin{aligned} Ax_n &= \varphi^n(A)Ax_0 + (E + \varphi(A) + \varphi^2(A) + \dots + \varphi^{n-1}(A))A\psi(A)y = \\ &= \varphi^n(A)Ax_0 + (E + \varphi(A) + \varphi^2(A) + \dots + \varphi^{n-1}(A))(E - \varphi(A))y = \\ &= \varphi^n(A)Ax_0 + (E - \varphi^n(A))y, \end{aligned}$$

и значит,

$$Ax_n - y = \varphi^n(A)(Ax_0 - y).$$

Из этого равенства вытекает, что

$$\|Ax_n - y\|^2 = \int_{SpA} |\varphi(\lambda)|^{2n} (dE_\lambda(Ax_0 - y), Ax_0 - y). \quad (8)$$

Аналогично, из (5) для поправок $x_{n+1} - x_n$ имеем

$$x_{n+1} - x_n = \varphi^n(A)(\varphi(A) - E)x_0 + \varphi^n(A)\psi(A)y = \varphi^n(A)(\varphi(A)x_0 + \psi(A)y - x_0)$$

или

$$x_{n+1} - x_n = \varphi^n(A)(x_1 - x_0).$$

Отсюда

$$\|x_{n+1} - x_n\|^2 = \int_{SpA} |\varphi(\lambda)|^{2n} (dE_\lambda(x_1 - x_0), x_1 - x_0). \quad (9)$$

В результате из (8) и (9) получаем следующее утверждение.

Т е о р е м а 2. Пусть выполнены условия теоремы 1. Пусть $Py = 0$, где P – ортопроектор на множество собственных векторов оператора $\varphi(A)$, отвечающих собственному значению 1. Тогда невязки $Ax_n - y$ и поправки $x_{n+1} - x_n$ для последовательных приближений (4) при любом начальном условии $x_0 \in X$ сходятся к нулю.

Как показывают равенства (7), (8), (9) скорость сходимости последовательных приближений к точному решению, невязок и поправок к нулю существенно зависит от правой части y уравнения (1). Оценить эти скорости сходимости можно более точно для функций y из некоторых (обычно незамкнутых!) подпространств \tilde{X} пространства X . Среди таких подпространств наиболее простыми являются подпространства истокообразно представимых функций. Эти подпространства определяются при помощи некоторой определенной на SpA функции $\theta(\lambda)$ равенством $X(\theta) = \theta(A)X$ элементов вида $\xi = \int_{SpA} \theta(\lambda)dE_\lambda h$ ($h \in X$). Тогда

$$\|x_n - x_*\|^2 = \int_{SpA} |\varphi(\lambda)|^{2n} |\theta(\lambda)|^2 (dE_\lambda h, h).$$

Отсюда

$$\|x_n - x_*\| \leq \gamma_n \|h\| (x_0 - x_* = \theta(A)h, h \in X), \quad (10)$$

где $\gamma_n = \max_{\lambda \in SpA} |\varphi(\lambda)|^n |\theta(\lambda)|$.

Если $\gamma_n \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$, то (10) дает квалифицированную оценку скорости сходимости приближений (4) к решению уравнения (1) сразу для всех функций x_0 и y , для которых $x_0 - x_* \in X(\theta)$ или $x_1 - x_0 \in X(\theta)$. Первое из этих условий $x_0 - x_* \in X(\theta)$ трудно проверяемо, так как x_* неизвестно. Однако оно выполняется, если $Ax_0 - y \in X(\tilde{\theta})$, где функции θ и $\tilde{\theta}$ связаны равенством $\theta(\lambda) = \lambda\tilde{\theta}(\lambda)$. В результате вместо (10) мы имеем оценку

$$\|x_n - x_*\| \leq \tilde{\gamma}_n \|h\| \quad (Ax_0 - y \in X(\tilde{\theta})), \quad (11)$$

где $\tilde{\gamma}_n = \max_{\lambda \in SpA} |\varphi(\lambda)|^n |\tilde{\theta}(\lambda)|$.

Формулы (8) и (9), в свою очередь, приводят к оценкам

$$\|Ax_n - y\| \leq \gamma_n \|h\| \quad (Ax_0 - y \in X(\theta)), \quad (12)$$

$$\|x_{n+1} - x_n\| \leq \gamma_n \|h\| \quad (x_1 - x_0 \in X(\theta)), \quad (13)$$

где последовательность γ_n снова определяется равенством (10).

Тем самым, доказана

Т е о р е м а 3. Пусть выполнены условия теоремы 1. Тогда:

а) если θ – определенная на спектре SpA функция, для которой из $|\varphi(\lambda)| = 1$ вытекает $\theta(\lambda) = 0$, то $\gamma_n \rightarrow 0$ и, следовательно, при $x_0 - x_* \in X(\theta)$ скорость сходимости приближений (4) к соответствующему решению x_* уравнения (1) оценивается неравенством (10);

б) если θ – определенная на спектре SpA функция, для которой из $|\varphi(\lambda)| = 1$ вытекает $\tilde{\theta}(\lambda) = 0$, где $\tilde{\theta}(\lambda) = \lambda^{-1}\theta(\lambda)$, то $\tilde{\gamma}_n \rightarrow 0$ и, следовательно, при $Ax_0 - y \in X(\tilde{\theta})$ скорость сходимости приближений (4) к соответствующему решению x_* уравнения (1) оценивается неравенством (11);

в) если θ – определенная на спектре SpA функция, для которой из $|\varphi(\lambda)| = 1$ вытекает $\theta(\lambda) = 0$, то $\gamma_n \rightarrow 0$ и, следовательно, при $Ax_0 - y \in X(\theta)$ скорость сходимости невязок для приближений (4) к нулю оценивается неравенством (12), и при $x_1 - x_0 \in X(\theta)$ скорость сходимости поправок для приближений (4) к нулю оценивается неравенством (13).

3. Пусть теперь снова для самосопряженного оператора A выполнены условия теоремы 1, причем $\|\varphi(A)\| = 1$ и, следовательно, $\rho(\varphi(A)) = 1$. Пусть уравнение (1) разрешимо. В этом случае последовательные приближения (4) сходятся к одному из решений x_* уравнения (1). Рассмотрим теперь вместо точных приближений (4) приближения для случая, когда правая часть уравнения (1) задана приближенно или когда при вычислениях этих приближений на каждом шаге делается ошибка. В этих случаях новые приближения \tilde{x}_n записываются в виде

$$\tilde{x}_{n+1} = \varphi(A)\tilde{x}_n + \psi(A)y_\delta \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (14)$$

с приближенной правой частью y_δ , $\|y_\delta - y\| \leq \delta$, где δ – некоторое малое положительное число. Очевидно, $\|\psi(A)y_\delta - \psi(A)y\| \leq c\delta$ ($c = \max_{\lambda \in SpA} |\psi(\lambda)|$). Отсюда, аналогично [1] получаем

$$\|\tilde{x}_n - x_*\| \leq \|\tilde{x}_n - x_n\| + \|x_n - x_*\|,$$

где x_* – точное решение уравнения (1), x_n ($n = 0, 1, 2, \dots$) – приближения (4). Так как

$$\tilde{x}_n - x_n = (E + \varphi(A) + \varphi^2(A) + \dots + \varphi^{n-1}(A))\psi(A)(y_\delta - y),$$

то справедливо неравенство

$$\|\tilde{x}_n - x_*\| \leq \|x_n - x_*\| + nc\delta.$$

Пусть задано $\varepsilon > 0$. Опишем те n , при которых $\|\tilde{x}_n - x_*\| < \varepsilon$. Из теоремы 1 следует $\lim_{n \rightarrow \infty} \|x_n - x_*\| = 0$. Пусть $\lambda \in (0, 1)$. Тогда при некотором $n(\lambda\varepsilon)$ из неравенства $n > n(\lambda\varepsilon)$ следует неравенство $\|x_n - x_*\| < \lambda\varepsilon$. С другой стороны, при $n < \frac{(1-\lambda)\varepsilon}{c\delta}$ справедливо неравенство $nc\delta < (1-\lambda)\varepsilon$. В результате, если справедливы неравенства

$$n(\lambda\varepsilon) < n < \frac{(1-\lambda)\varepsilon}{c\delta}, \quad (15)$$

то справедливо и неравенство $\|\tilde{x}_n - x_*\| < \varepsilon$.

Неравенства (15) совместны при условии $\frac{(1-\lambda)\varepsilon}{c\delta} > n(\lambda\varepsilon) + 1$ или, что тоже самое, $\delta < \frac{(1-\lambda)\varepsilon}{c(n(\lambda\varepsilon) + 1)}$. Правая часть последнего неравенства определяет возможную величину погрешности δ . Естественно выбрать число $\lambda \in (0,1)$ так, чтобы эта правая часть была наибольшей из возможных. Положим

$$\delta(\varepsilon) = \sup_{\lambda \in (0,1)} \frac{(1-\lambda)\varepsilon}{c(n(\lambda\varepsilon) + 1)}.$$

Из проведенных рассуждений вытекает при $\delta < \delta(\varepsilon)$, что неравенства (15) совместны и при n , удовлетворяющих этим неравенствам, $\|\tilde{x}_n - x_*\| < \varepsilon$.

Таким образом, справедлива

Т е о р е м а 4. Пусть выполнены условия теоремы 1 и пусть либо правая часть уравнения (1) задана с ошибкой $\delta > 0$, либо приближения (4) вычисляются с ошибками, не превышающими $\delta > 0$. Тогда приближения (14) сходятся к соответствующему решению x_* уравнения (1) (т. е. $\lim_{n \rightarrow \infty, n\delta \rightarrow 0} \|\tilde{x}_n - x_*\| = 0$).

4. Вернемся к анализу последовательных приближений $x_{n+1} = Bx_n + f$ для линейного операторного уравнения $x = Bx + f$ с действующим в гильбертовом пространстве X самосопряженным оператором B в случае, когда $\|B\| = 1$. В ряде задач при исследовании последовательных приближений достаточно установить их сходимость в норме, более слабой, чем исходная норма гильбертова пространства X . Примером таких норм может служить норма

$$\|x\|_0 = \|Tx\|, \quad (16)$$

где T – некоторый оператор с $\text{Ker}T = 0$. При этом наиболее простым оказывается случай, когда оператор T перестановочен с оператором B ($TB = BT$). Среди таких операторов наиболее простыми являются операторы вида

$$T = \pi(B), \quad (17)$$

где π – некоторая функция положительная на SpB . В этом случае (16) является нормой, так как из $Tx = 0$ очевидным образом следует, что $x = 0$.

Напомним [1], что справедливы равенства

$$\begin{aligned} x_n &= B^n x_0 + (E + B + \dots + B^{n-1})f, \\ x_* &= B^n x_* + (E + B + \dots + B^{n-1})f. \end{aligned}$$

Откуда

$$x_n - x_* = B^n(x_0 - x_*), \quad (18)$$

здесь x_n – последовательные приближения $x_{n+1} = Bx_n + f$ с $x_0 \in X$, x_* – точное решение уравнения $x = Bx + f$.

Из равенства (18) для нормы (16) (с T , определенным равенством (17)) имеем равенство

$$\|x_n - x_*\|_0 = \|\pi(B)B^n(x_0 - x_*) + \alpha B^n P_0(x_0 - x_*)\|,$$

и, далее,

$$\|x_n - x_*\|_0^2 = \int_{SpB} |\pi(\lambda)|^2 |\lambda|^{2n} (dE_\lambda(x_0 - x_*), x_0 - x_*),$$

откуда,

$$\|x_n - x_*\|_0 \leq \gamma_n \|x_0 - x_*\|,$$

где $\gamma_n = \max_{\lambda \in SpB} |\pi(\lambda)| |\lambda|^n$.

Повторяя рассуждения из [1], приходим к следующему утверждению, дополняющему теореме М. А. Красносельского.

Т е о р е м а 5. Пусть B – самосопряженный оператор с $\|B\|=1$ в гильбертовом пространстве X , не имеющем -1 собственным значением. Пусть $\pi(1) = \pi(-1) = 0$ и уравнение $x = Bx + f$ разрешимо. Тогда последовательные приближения $x_{n+1} = Bx_n + f$ при любом начальном условии $x_0 \in X$ сходятся в норме (16) к решению x_* уравнения $x = Bx + f$, для которого $P_0 x_* = P_0 x_0$, где P_0 – ортопроектор на множество собственных векторов оператора B , отвечающих собственному значению 1. При этом эта сходимость равномерна относительно $x_0 - x_* \in X$ на каждом ограниченном шаре.

Достаточно показать, что $\gamma_n \rightarrow 0$. Действительно, если задано $\varepsilon > 0$, то можно выбрать $\delta > 0$ такое, что $|\pi(\lambda)| < \varepsilon$ при $1 - \delta \leq |\lambda| \leq 1$. Тогда при этих λ верно неравенство $|\pi(\lambda)| < \varepsilon$ и, значит, $|\pi(\lambda)||\lambda|^n < \varepsilon$. При остальных λ верно неравенство $|\lambda| \leq 1 - \delta$ и, значит, $|\pi(\lambda)||\lambda|^n \leq M(1 - \delta)^n$, $M = \max_{\lambda \in Sp B} |\pi(\lambda)|$. Поэтому при таких λ из $n > \frac{\ln \varepsilon - \ln M}{\ln(1 - \delta)}$ вытекает, что также $|\pi(\lambda)||\lambda|^n < \varepsilon$. Таким образом, при больших n для всех $\lambda \in [-1, 1]$ верно неравенство $|\pi(\lambda)||\lambda|^n < \varepsilon$ и, значит, $\gamma_n \rightarrow 0$.

Подчеркнем, что в условиях теоремы 5 отсутствует требование об истокообразной представимости точного решения или правой части уравнения (1).

Теорема 5 позволяет сформулировать аналоги теорем 2–4 о сходимости к нулю ошибок, невязок и поправок в нормах $X(\theta)$ при соответствующем выборе функций θ для уравнений первого рода (1).

Литература

1. Забрейко П. П., Матысик О. В. // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 5. С. 12–17.
2. Данфорд Н., Шварц Д. Линейные операторы. Спектральная теория. М., 1966.
3. Матысик О. В. Явные и неявные итерационные процедуры решения некорректно поставленных задач. Брест, 2014.
4. Вайникко Г. М., Веретенников А. Ю. Итерационные процедуры в некорректных задачах. М., 1986.

P. P. ZABREIKO, O. V. MATYSIK

zabreiko@mail.ru, matysikoleg@mail.ru

KRASNOSELSKI'S THEOREM AND ITERATION PROCEDURES FOR SOLUTION OF ILL-POSED PROBLEMS WITH SELF-ADJOINT OPERATORS

Summary

In this article, the main results on the behavior of various iterations for approximate solution of ill-posed equations with self-adjoint operators in a Hilbert space are presented: sufficient conditions for iteration convergence are obtained, the behavior of residuals and corrections is studied on subspaces of sourcewise representable functions, the convergence of the approximations in the Hilbert space norm weaker than the original one is established.

УДК 517.982.3:517.986.62

Р. В. ДЫБА

ОБОБЩЕНИЕ ТЕОРЕМЫ ДВОЙСТВЕННОСТИ ФЕФФЕРМАНА НА СЛУЧАЙ КОМПАКТНЫХ АБЕЛЕВЫХ ГРУПП

(Представлено членом-корреспондентом Я. В. Радыно)

Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины

Поступило 05.11.2014

Введение. Ставшая уже классической теорема двойственности Ч. Феффермана [1] устанавливает топологический изоморфизм между пространством функций ограниченной средней осцилляции на группе \mathbf{R}^n и сопряженным к пространству Харди H^1 на этой группе. Аналогичный результат (также называемый теоремой двойственности Ч. Феффермана) справедлив и для группы вращений окружности (см., напр., [2, с. 269]). В данной работе приводится обобщение этой теоремы на случай компактной абелевой группы с линейно упорядоченной группой характеров. Рассмотрения основаны на результатах работ [3] и [4].

Обозначения и вспомогательные сведения. Всюду ниже G есть нетривиальная связная компактная абелева группа с нормированной мерой Хаара m и линейно упорядоченной группой характеров X , X_+ – положительный конус в X . Тоже можно выразить, сказав, что в группе X выделена подполугруппа X_+ , содержащая единичный характер $\mathbf{1}$ и такая, что $X_+ \cap X_+^{-1} = \{\mathbf{1}\}$ и $X_+ \cup X_+^{-1} = X$. При этом полугруппа X_+ индуцирует в X линейный порядок, согласованный со структурой группы, по правилу $\xi \leq \chi$, если $\chi\xi^{-1} \in X_+$. Далее мы положим $X_- = X_+^{-1} \setminus \{\mathbf{1}\}$ ($= X \setminus X_+$). В приложениях в роли X часто выступают подгруппы аддитивной группы \mathbf{R}^n , наделенные дискретной топологией, так что G является боровской компактификацией группы X . В частности, в качестве X можно взять группу \mathbf{Z}^n , наделенную лексикографическим порядком. В этом случае $G = \mathbf{T}^n$ – n -мерный тор. Другие примеры см. в [5].

Через $\hat{\phi}$ мы будем обозначать преобразование Фурье функции ϕ из $L^1(G)$, т. е.

$$\hat{\phi}(\xi) = \int_G \phi \bar{\xi} dm, \quad \xi \in X_+.$$

О п р е д е л е н и е 1. Пространство Харди $H^p(G)$ ($1 \leq p \leq \infty$) над G определяется следующим образом (см., напр., [6]):

$$H^p(G) = \{f \in L^p(G) : \hat{f}(\chi) = 0 \forall \chi \in X_-\}.$$

При этом X является ортонормированным базисом пространства $L^2(G)$, X_+ – ортонормированным базисом пространства $H^2(G)$. Через P_+ мы будем обозначать ортопроектор из $L^2(G)$ на $H^2(G)$. Положим также

$$H_0^\infty(G) = \{f \in H^\infty(G) : \int_G f dm = 0\}.$$

Далее нам потребуется преобразование Гильберта на группе G . Для случая линейного порядка на X соответствующая теория принадлежит С. Бохнеру и Г. Хелсону (см., напр., [6, глава 8]), более общий подход изложен в [7, глава 6] и [8]. Как показано в этих работах, для любой функции u из $L^2(G, \mathbf{R})$ существует единственная функция \tilde{u} из $L^2(G, \mathbf{R})$, такая, что $u + i\tilde{u} \in H^2(G)$ и $\tilde{u}(\mathbf{1}) = 0$. Функция \tilde{u} называется гармонически сопряженной с u . Линейное отображение, получаемое в результате продолжения отображения $u \mapsto \tilde{u}$ на (комплексное) $L^2(G)$ по линейности, называется преобразованием Гильберта на группе G . Этот оператор ограничен в $L^2(G)$.

О п р е д е л е н и е 2 [4]. Определим пространства $BMO(G)$ функций ограниченной средней осцилляции и $BMOA(G)$ функций ограниченной средней осцилляции аналитического типа на группе G следующим образом:

$$\begin{aligned} BMO(G) &:= \{f + \tilde{g} : f, g \in L^\infty(G)\}, \\ BMOA(G) &:= BMO(G) \cap H^1(G), \\ \|\varphi\|_{BMO} &:= \inf\{\|f\|_\infty + \|g\|_\infty : \varphi = f + \tilde{g}, f, g \in L^\infty(G)\} \quad (\varphi \in BMO(G)). \end{aligned}$$

Норма пространства $BMOA(G)$ индуцирована нормой $\|\cdot\|_{BMO}$.

Л е м м а 1 [3, Предложение 3]. Справедливо равенство векторных пространств $BMOA(G) = P_+L^\infty(G)$, причем норма

$$\|\varphi\|_{*BMOA} := \inf\{\|g_1\|_\infty : \varphi = P_+g_1, g_1 \in L^\infty(G)\}$$

в пространстве $BMOA(G)$ эквивалентна норме $\|\cdot\|_{BMO}$.

Следующая теорема является основным утверждением данного сообщения и, как уже отмечалось, представляет собой обобщение теоремы двойственности Ч. Фейффермана на случай компактных связных абелевых групп.

Т е о р е м а 1. Справедливо следующее равенство пространств:

$$(H^1(G))^* = BMOA(G)$$

(с эквивалентностью норм).

Д о к а з а т е л ь с т в о. Поскольку подпространство $H^1(G)$ замкнуто в $L^1(G)$, то, как известно,

$$(H^1(G))^* = (L^1(G))^* / (H^1(G))^\perp \quad (1)$$

(с равенством норм), где $(H^1(G))^\perp$ – аннулятор подпространства $H^1(G)$. Отождествляя сопряженное пространство $(L^1(G))^*$ с $L^\infty(G)$ посредством полуторалинейной формы $\langle f, g \rangle := \int_G f \bar{g} dm$, имеем

$$(H^1(G))^\perp = \{g \in L^\infty(G) : \langle f, g \rangle = 0 \forall f \in H^1(G)\}.$$

Покажем что $(H^1(G))^\perp = H_0^\infty(G)$. В самом деле, включение $(H^1(G))^\perp \subset H_0^\infty(G)$ следует из того, что $\hat{g}(\chi) = \langle \chi, g \rangle$. Если же предположить, что $g \in H_0^\infty(G)$, то $\langle f, g \rangle = 0$ для всех характеров $f \in X_+$, а значит и для всех аналитических полиномов (линейных комбинаций характеров из X_+). Поскольку аналитические полиномы плотны в $H^1(G)$ [5, лемма 1], то последнее равенство верно и для всех f из $H^1(G)$, а потому $g \in (H^1(G))^\perp$.

Итак, равенство (1) может быть записано в виде

$$(H^1(G))^* = L^\infty(G) / H_0^\infty(G)$$

(с равенством норм).

Положим далее $[f] := f + H_0^\infty(G)$ и зададим отображение

$$j : L^\infty(G) / H_0^\infty(G) \rightarrow P_+L^\infty(G) : [f] \mapsto P_+\bar{f}.$$

Корректность этого определения легко проверяется. Докажем, что отображение j инъективно. Пусть f и g – такие функции из $L^\infty(G)$, что $[f] \neq [g]$, т. е. $f - g \notin H_0^\infty(G)$. Тогда найдется такой характер $\xi \in X_+^{-1}$, что $\hat{f}(\xi) - \hat{g}(\xi) \neq 0$. Используя разложения по базису в $L^2(G)$

$$f = \sum_{\chi \in X} \hat{f}(\chi)\chi, \quad g = \sum_{\chi \in X} \hat{g}(\chi)\chi,$$

выводим отсюда, что $P_+\bar{f} \neq P_+\bar{g}$, т. е. j инъективно. Сюръективность и линейность этого отображения очевидна. Докажем его изометричность. Для функции $f \in L^\infty(G)$ имеем

$$\|[f]\| = \inf\{\|h\|_\infty : h \in [f]\} \quad \text{и} \quad \|P_+\bar{f}\|_{*BMOA} := \inf\{\|g\|_\infty : P_+\bar{f} = P_+\bar{g}\}.$$

Поэтому из легко проверяемого равенства

$$[f] = \{g \in L^\infty(G) : P_+\bar{f} = P_+\bar{g}\}$$

вытекает, что $\| [f] \| = \| P_+ \bar{f} \|_{*BMOA}$. Таким образом, мы получили (с точностью до изоморфизма) равенство пространств

$$(H^1(G))^* = P_+ L^\infty(G)$$

с равенством норм ($P_+ L^\infty(G)$ считается наделенным нормой $\| \cdot \|_{*BMOA}$). Равенство пространств $P_+ L^\infty(G)$ и $BMOA(G)$ с эквивалентностью норм следует из леммы 1. Теорема доказана.

Благодарю профессора А. Р. Миротина за внимание к данной работе и стимулирующие обсуждения.

Литература

1. Fefferman C. // Bull. Amer. Math. Soc. 1971. Vol. 77. P. 587–588.
2. Гарнетт Дж. Ограниченные аналитические функции. М., 1984.
3. Дыба Р. В., Миротин А. Р. // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. 2014. Т. 20, № 2. С. 135–144.
4. Дыба Р. В., Миротин А. Р. // XI Белорусская математическая конф.: Тез. докл. Междунар. науч. конф. Минск, 2012. Ч. 1. С. 37–38.
5. Миротин А. Р. // Матем. сб. 2011. Т. 202, № 5. С. 101–116.
6. Rudin W. Fourier analysis on groups. New York; London: Interscience Publishers, 1962.
7. Миротин А. Р. Гармонический анализ на абелевых полугруппах. Гомель, 2008.
8. Mirotin A. R. // Int. J. Pure Appl. Math. 2009. Vol. 51, N 4. P. 463–474.

R. V. DYBA

rdybabox@yandex.ru

GENERALIZATION OF FEFFERMAN'S DUALITY THEOREM TO THE CASE OF COMPACT ABELIAN GROUPS

Summary

It is proved that the dual of Hardy space $H^1(G)$ over compact and connected Abelian groups G with totally dual is topologically isomorphic to the space $BMOA(G)$ of functions of bounded mean oscillation of analytic type on G .

УДК 517.544

Т. М. УРБАНОВИЧ

ОСОБЫЙ СЛУЧАЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ РИМАНА

(Представлено академиком В. И. Корзюком)

Полоцкий государственный университет, Новополоцк

Поступило 08.10.2014

Обозначим $H(E)$ класс всех функций $\varphi(z)$, заданный на ограниченном множестве $E \subset \mathbb{C}$ и удовлетворяющих условию Гельдера, т. е. оценке

$$|\varphi(z_1) - \varphi(z_2)| \leq C|z_1 - z_2|^\mu, \quad z_1, z_2 \in E,$$

с некоторыми положительными постоянными C и $\mu \leq 1$.

Пусть Γ – простой гладкий замкнутый контур, делящий плоскость комплексного переменного на внутреннюю область D^+ и внешнюю D^- ; F – конечное множество точек контура Γ ; $\lambda = (\lambda_\tau, \tau \in F)$ – заданное семейство комплексных чисел.

По определению функция φ принадлежит классу $H_\lambda(\Gamma, F)$, если $\varphi \in H(\Gamma_0)$, где $\Gamma_0 \subseteq \Gamma \setminus F$, и на каждой дуге Γ_τ с концом τ , не содержащей других точек из F , представима в виде

$$\varphi(t) = |t - \tau|^{\lambda_\tau} \varphi_1(t),$$

где $\varphi_1(t) \in H(\Gamma_\tau)$.

Будем говорить, что функция $\varphi \in H_\lambda(\Gamma, F)$ обратима, если $\varphi(t) \neq 0$, $t \in \Gamma \setminus F$, и $1/\varphi(t) \in H_{-\lambda}(\Gamma, F)$.

По определению функция $\varphi(z)$ принадлежит классу $H_\lambda(\bar{D}^\pm, F)$, если в каждой замкнутой области $\bar{D}_0 \subseteq \bar{D}^\pm \setminus F$ она принадлежит классу $H(\bar{D}_0)$, а в каждой области $D_\tau^\pm \subseteq D^\pm$, для которой $\bar{D}_\tau^\pm \cap F = \{\tau\}$ представима в виде

$$\Phi(z) = (z - \tau)^{\lambda_\tau} \Phi_1(z),$$

где $\Phi_1(z) \in H(\bar{D}_\tau^\pm)$, причем в определении класса $\Phi \in H_\lambda(\bar{D}^\pm, F)$ входит условие конечности функции $\Phi(z)$ на бесконечности. А именно, порядок функции Φ на бесконечности не превосходит целого n , если в некоторой окрестности бесконечно удаленной точки выполняется оценка $|\Phi(z)| \leq C|z|^n$.

Будем говорить, что функция $\Phi \in H_\lambda(\bar{D}^\pm, F)$ обратима, если $\Phi(z) \neq 0$, $z \in D^\pm$, и $1/\Phi(z) \in H_{-\lambda}(\bar{D}^\pm, F)$.

Постановка задачи. Пусть $\alpha = (\alpha_\tau, \tau \in F)$ – семейство комплексных чисел и задана функция

$$A(z) = \prod_{\tau \in F} (z - \tau)^{\alpha_\tau}, \quad z \in \bar{D}^+.$$

Пусть также заданы семейства комплексных чисел $\lambda^+ = (\lambda_\tau^+, \tau \in F)$, $\lambda^- = (\lambda_\tau^-, \tau \in F)$, и выполняется равенство

$$\lambda^+ - \lambda^- = \alpha. \tag{1}$$

Найти аналитическую вне Γ функцию $\Phi(z) \in H_{\lambda^\pm}(\bar{D}^\pm, F)$, исчезающую на бесконечности, по краевому условию

$$\Phi^+(t) - A(t)G_0(t)\Phi^-(t) = g(t), \tag{2}$$

где правая часть $g(t) \in H_{\lambda^+}(\Gamma, F)$, функция $G_0(t) \in H_0(\Gamma, F)$ и обратима, причем

$$\operatorname{Re}(\lambda_\tau^+ - \alpha_\tau) \neq \frac{1}{2\pi} [(\arg G_0)(\tau - 0) - (\arg G_0)(\tau + 0)] \pmod{\mathbb{Z}}. \quad (3)$$

Задача (2) в случае целых α_τ рассматривалась многими авторами. Она носит название задачи Римана в исключительном случае. Полное описание решения при $\alpha_\tau \in \mathbb{Z}$ дано, например, в [1, с. 130–137].

В [2, с. 59–64] исследована задача (2) в двух случаях: наличие одного нуля нецелого порядка на контуре или наличие одной полярной особенности нецелого порядка на контуре. Решение получено в классе функций, интегрируемых на контуре (см. также [3]).

В [4] исследована задача (2) при любых $\alpha_\tau \in \mathbb{R}_+$, допуская конечное число нулей и/или полярных особенностей на контуре. Все исследования выполнены в весовых классах Гельдера с вещественным весом $-1 < \lambda < 0$. Найдена явная формула решения и условия разрешимости. Методом сведения к задаче (2) в [4] исследовано характеристическое сингулярное интегральное уравнение с ядром Коши в исключительном случае.

В данной работе исследована задача (2) при любых $\alpha_\tau \in \mathbb{C}$, допуская конечное число нулей и/или полярных особенностей на контуре. Эта работа является обобщением работы автора [4]. Здесь все исследования выполнены в весовых классах Гельдера с любым комплексным весом λ , имеющим лишь ограничение (3). Найдена явная формула решения и условия разрешимости.

Заметим, что $A(z) \in H_\alpha(\bar{D}^+, F)$ и обратима.

Запишем (2) в виде

$$\frac{\Phi^+(t)}{A(t)} - G_0(t)\Phi^-(t) = f(t), \quad (4)$$

где $f(t) = g(t) / A(t)$, $f(t) \in H_{\lambda^+ - \alpha}(\Gamma, F)$.

Положим

$$\Psi(z) = \begin{cases} \Phi(z) / A(z), & z \in D^+, \\ \Phi(z), & z \in D^-, \end{cases}$$

и задачу (4) сведем к задаче о скачке

$$\Psi^+(t) - G_0(t)\Psi^-(t) = f(t). \quad (5)$$

Заметим, что $\Psi(z) \in H_{\lambda^+ - \alpha}(\bar{D}^+, F)$ и $\Psi(z) \in H_{\lambda^-}(\bar{D}^-, F)$. Согласно (1), $\Psi(z) \in H_{\lambda^+ - \alpha}(\bar{D}^\pm, F)$.

Построим каноническую функцию $X(z)$ задачи (5). Для этого выберем произвольную непрерывную на $\Gamma \setminus F$ ветвь функции $\ln G_0(t)$, которая принадлежит $H_0(\Gamma, F)$, и положим

$$X_0(z) = e^{\Omega(z)},$$

где

$$\Omega(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{(\ln G_0)(t) dt}{t - z}.$$

Для $q \in H(\Gamma, F)$ обозначим $q(\tau \pm 0)$ однозначные предельные значения в точке τ в соответствии с принятой ориентацией контура. В частности, определены значения $(\ln G_0)(\tau \pm 0)$.

Рассмотрим семейство чисел

$$\delta_\tau = \frac{1}{2\pi i} ((\ln G_0)(\tau - 0) - (\ln G_0)(\tau + 0)), \quad \tau \in F.$$

Согласно [5, с. 92], в секторах \bar{D}_τ^\pm функцию $\Omega(z)$ можно представить в виде

$$\Omega(z) = \delta_\tau \ln(z - \tau) + h_\tau(z),$$

где $h_\tau(z) \in H(\bar{D}_\tau^\pm)$.

Отсюда следует, что в секторах D_τ^\pm функцию $X_0(z)$ можно представить в виде

$$X_0(z) = (z - \tau)^{\delta_\tau} X_\tau^\pm(z),$$

где функции $X_\tau^\pm(z)$ принадлежат классам $H(\bar{D}_\tau^\pm)$ и обратимы в них.

Выберем целые числа n_τ по условию

$$-1 < \operatorname{Re}(\lambda_\tau^+ - \alpha_\tau - \delta_\tau) + n_\tau < 0$$

(дополнительным условием на λ^+ является то, что $\operatorname{Re}(\lambda_\tau^+ - \alpha_\tau - \delta_\tau)$ не принадлежат множеству целых чисел).

В терминах целой части числа

$$n_\tau = [\operatorname{Re}(\delta_\tau + \alpha_\tau - \lambda_\tau^+)].$$

Положим

$$X(z) = X_0(z) \prod_{\tau \in F} (z - \tau)^{-n_\tau}. \quad (6)$$

Так как $\lim_{z \rightarrow \infty} \Omega(z) = 0$, то $\lim_{z \rightarrow \infty} X_0(z) = 1$. Следовательно, с учетом (6),

$$\lim_{z \rightarrow \infty} z^{\mathfrak{a}} X(z) = 1,$$

где

$$\mathfrak{a} = \sum_{\tau \in F} n_\tau.$$

Таким образом, порядок функции $X(z)$ на бесконечности равен $-\mathfrak{a}$.

Т е о р е м а. Пусть $X(z)$ – каноническая функция задачи (2), определяемая равенством (6),

$$\mathfrak{a} = \sum_{\tau \in F} n_\tau, \quad n_\tau = [\operatorname{Re}(\delta_\tau + \alpha_\tau - \lambda_\tau^+)].$$

Тогда при $\mathfrak{a} \geq 0$ общее решение задачи (2), исчезающее на бесконечности, в классе $H_{\lambda^\pm}(\bar{D}^\pm, F)$, с правой частью $g(t) \in H_{\lambda^+}(\Gamma, F)$ дается формулой

$$\Phi(z) = \begin{cases} A(z)\Psi(z), & z \in D^+, \\ \Psi(z), & z \in D^-, \end{cases} \quad (7)$$

где функция $\Psi(z)$ имеет вид

$$\Psi(z) = X(z) \left(\frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma} \frac{g(t)dt}{A(t)X^+(t)(t-z)} + P(z) \right),$$

степень произвольного многочлена $P(z)$ не выше $\mathfrak{a} - 1$ (при $\mathfrak{a} = 0$ положим $P(z) = 0$).

При $\mathfrak{a} < 0$ решение задачи (2) единственно и дается формулой (7) при выполнении условий ортогональности

$$\int_{\Gamma} \frac{g(t)}{A(t)X^+(t)} t^j dt = 0, \quad j = 0, 1, \dots, -\mathfrak{a} - 1.$$

Доказательство теоремы основано на свойствах интеграла типа Коши с весом и на свойствах весовых классов Гельдера. В доказательстве устанавливается принадлежность полученного решения требуемому классу.

Замечание 1. Методом сведения к задаче (2) можно исследовать соответствующее характеристическое сингулярное интегральное уравнение с ядром Коши в исключительном случае. Полученное решение в свою очередь может быть использовано при исследовании полного сингулярного интегрального уравнения и краевых задач уравнений смешанного типа.

Замечание 2. В данной работе исследована задача (2) со степенной особенностью коэффициента. Однако изложенный подход может быть использован при решении задачи с логарифмической особенностью коэффициента.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф14Каз-034).

Литература

1. Гахов Ф. Д. Краевые задачи. М.: Наука, 1977. – 640 с.
2. Усманов Н. Сингулярные граничные задачи сопряжения: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Душанбе, 2004. – 312 с.
3. Михайлов Л. Г., Усманов Н. // Докл. АН. 2002. Т. 387, № 3. С. 309–313.
4. Урбанович Т. М. // Математические заметки Якутского гос. ун-та. 2012. Т. 19, вып. 2. С. 155–161.
5. Мухелишвили Н. И. Сингулярные интегральные уравнения. М.: Наука, 1968. – 512 с.

T. M. URBANOVICH

UrbanovichTM@gmail.com

SPECIAL CASE OF THE RIEMANN BOUNDARY-VALUE PROBLEM

Summary

The Riemann boundary-value problem (linear conjugation problem) is studied in the case when the coefficient of the problem admits a finite number of zeros and/or polar singularities on the contour. The solvability conditions and the explicit formula of the solution are obtained. All studies are performed in the weighted Hölder classes with complex weight.

ФИЗИКА

УДК 621.039+539.21

Член-корреспондент Ф. Ф. КОМАРОВ¹, С. В. КОНСТАНТИНОВ¹,
В. Е. СТРЕЛЬНИЦКИЙ²

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
ПОКРЫТИЙ TiN, TiAlN, TiAlYN¹Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ, Минск²Харьковский физико-технический институт, Украина

Поступило 17.11.2014

Введение. Технический прогресс человечества и техногенное развитие общества вызывают непрерывное увеличение энергопотребления. Эффективным энергоисточником являются атомные электростанции (АЭС). Однако непрерывная работа АЭС связана с определенной технологической опасностью, и вопрос обеспечения ее надежной работы является актуальной проблемой. Важную роль в обеспечении безопасности АЭС играют конструкционные материалы ядерного реактора и рабочих устройств станции. Особенно актуален вопрос обеспечения стабильности структуры тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) на весь период их эксплуатации. Оболочки ТВЭЛов подвергаются ряду экстремальных воздействий в ядерном реакторе, включая высокотемпературное воздействие от ядерного топлива (400–500 °С), от теплоносителя (300–350 °С), коррозионное воздействие от продуктов распада ядерного топлива и от теплоносителя (как правило, вода или эвтектика Na–K), но самым губительным воздействием для материала является облучение нейтронами, осколками деления ядер урана, γ -излучением. Облучение нейтронами вызывает трансмутационные реакции в материале с образованием атомов инертных газов (He, Ne, Ar, Kr, Xe). Накопление атомов инертных газов ведет к набуханию материала, повышенной ползучести, охрупчиванию, а также блистерингу и флекингу [1]. Традиционно применяемыми материалами в данной области являются аустенитные нержавеющие стали и циркалои. Однако возможности этих материалов уже находятся на пределе и дальнейшее развитие ядерной энергетики требует разработки новых радиационностойких материалов для оболочек ТВЭЛов [2].

В ряде работ по этой тематике было показано, что перспективными материалами для ядерных реакторов являются керамики, в частности, нитридные керамики на основе переходных металлов IV, V групп таблицы Д. И. Менделеева [3–5]. Нитриды данных металлов представляют собой фазы внедрения, состоящие из двух ГЦК подрешеток. Атомы металла занимают места в узлах решетки, а атомы азота занимают октаэдрические поры. Это позволяет структуре эффективно сопротивляться накоплению инертного газа в порах решетки, с последующим образованием пузырей газа. Также важным путем повышения радиационной стойкости материалов является создание большого числа стоков для точечных дефектов структуры, индуцируемых облучением. Такими стоками могут быть дислокации либо границы зерен материала. Наноструктурированный материал, обладающий большой интегральной протяженностью границ зерен, будет обладать повышенной стойкостью к облучению [6].

Материалы и методы исследования. Исследования проводились на образцах покрытий TiN, TiAlN, TiAlYN, нанесенных методом сепарируемого вакуумно-дугового распыления на подложки из нержавеющей стали 12X18H10T. Толщина покрытий – 5–7 мкм. Для изучения стойкости материала к радиационному облучению была разработана уникальная методика. Покрытия облучались на ускорителе легких ионов AN 2500 фирмы High Voltage Engineering Europe B. V.

ионами гелия с энергией 500 кэВ, флюенсами от $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² до $3 \cdot 10^{17}$ ион/см². Далее проводился отжиг облученных покрытий в атмосфере аргона при температуре 500 °С в течение 15 мин с целью смоделировать длительную эксплуатацию в ядерном реакторе. Такие условия создают количество смещений на атом в материале, значительно превышающее то, которое накапливается в материалах ядерного реактора за 40 лет эксплуатации. Данная методика отлично зарекомендовала себя в ходе предыдущих исследований по данной тематике [7].

С целью исследования элементного состава был применен метод обратного резерфордовского рассеяния ионов гелия (ROP), энергия ионов 1,3 МэВ, разрешение детектора 15 кэВ. Для анализа структуры покрытий до и после облучения был применен метод рентгеноструктурного фазового анализа с использованием прибора ДРОН-3. Исследования механических свойств покрытий и влияния на них облучения проводились методом измерения микротвердости на приборе DuraScan 20. Для анализа морфологии и характера влияния облучения на структуру покрытий была использована оптическая микроскопия.

Результаты и их обсуждения. На рис. 1 представлены спектры ROP ионов гелия от исследуемых покрытий. В таблице указаны концентрации элементов в покрытиях.

Установлено, что концентрации титана, алюминия, иттрия и азота равномерны по толщине покрытий. Наличие кислорода в покрытиях не установлено, что свидетельствует о высоком качестве полученных структур и об отсутствии крайне вредных для эксплуатационных свойств наноструктурированных тонкопленочных покрытий оксидов. По результатам ROP можно предположить, что титан и алюминий находятся в фазе нитрида и не образуют выделенных фаз. Иттрий также находится в фазе нитрида и не образует отдельной фазы. Концентрация Y равна 0,3 ат. %, равномерна по всей толщине покрытия, что обеспечивает однородность свойств и заметное повышение твердости. По отношению концентраций металла к азоту можно утверждать, что формируется стехиометрический нитрид $Ti_{50-55}N_{45-50}$ с гранцентрированной кубической решеткой типа NaCl, в котором около 90 % октаэдрических пор занято атомами азота.

На рис. 2 приведены рентгеновские дифрактограммы от покрытий TiN (а), TiAlN (б), TiAlYN (в). Обнаружены пики от γ -железа, что свидетельствует о проникновении рентгеновских лучей до подложки нержавеющей стали 12X18H10T, что естественно при толщине покрытий 5–7 мкм.

Обнаружены также пики нитрида титана в случае покрытия TiN (рис. 2, а). Установлено, что покрытие имеет сильную текстурированность типа (110). В случае покрытий TiAlN и TiAlYN обнаружены пики, соответствующие нитриду титана, однако смещенные в область больших углов в случае покрытия TiAlN (рис. 2, б) и менее смещенные в область больших углов в случае покрытия TiAlYN (рис. 2, в). Других фаз в покрытиях не обнаружено. Следовательно, алюминий и иттрий находятся в фазе твердого раствора. Данный факт подтверждается рассчитанными значениями параметров кристаллической решетки покрытий: 4,271 Å для TiN, 4,226 Å для TiAlN, 4,231 Å для TiAlYN. Добавка атомов Al, имеющих атомный радиус, меньший чем для атомов

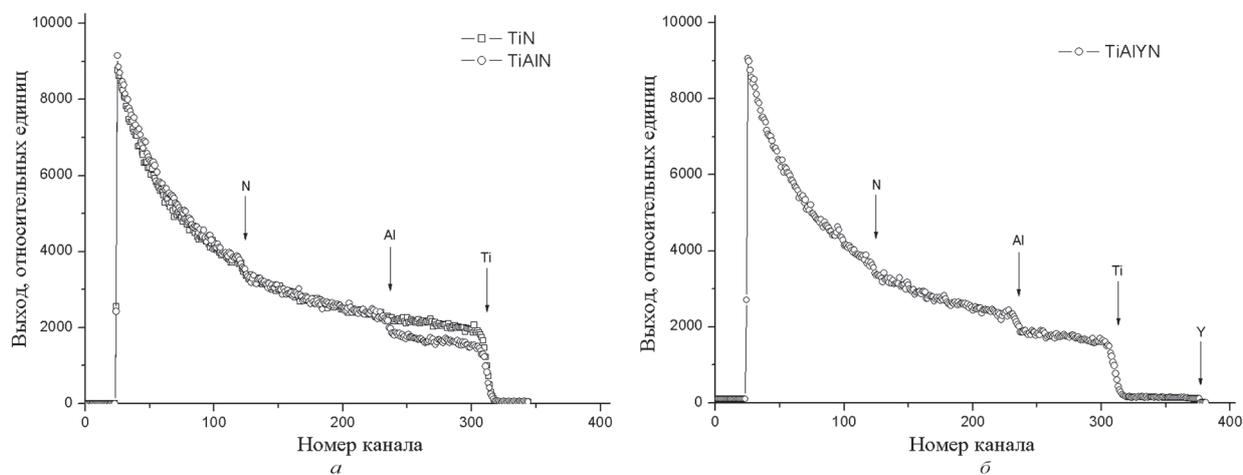


Рис. 1. Спектры ROP ионов гелия от покрытий TiN, TiAlN (а); TiAlYN (б)

Ti ($r_{aTi} = 1,47 \text{ \AA}$, $r_{aAl} = 1,43 \text{ \AA}$ [8]), вызывает уменьшение периода кристаллической решетки. Добавка иттрия, имеющего значительно больший атомный радиус ($r_{aY} = 1,78 \text{ \AA}$ [8]), вызывает увеличение параметра решетки, и, как следствие, упрочнение покрытия. При добавлении Al или Al и Y формируются комплексные нитриды (Ti, Al)N и (Ti, Al, Y)N с параметром кристаллической решетки, меньшим TiN. По формуле Селякова–Шеррера [9] был рассчитан средний размер кристаллитов покрытий. Он составил величину 45–50 нм для TiN, 9,5–12,5 нм для TiAlN и 9–10 нм для TiAlYN. Добавки Al и Y способствуют измельчению кристаллитов покрытия TiN, что сказывается на механических свойствах повышением его твердости, пределов прочности и текучести, а также вязкости разрушения [10–12].

Концентрации элементов в покрытиях (ат. %)

Элемент	Покрытие, ат. %			
	Ti	Al	Y	N
TiN	58			42
TiAlN	29	26		45
TiAlYN	31	24	0,3	44,7

Как видно из рентгеновских дифрактограмм, после облучения ионами гелия не происходит заметных изменений в кристаллической структуре покрытий, кроме эффекта измельчения зерна: 30–35 нм для TiN, 10,5–11,5 нм для TiAlN, 6,5–8,5 нм для TiAlYN. Во всех случаях покрытия сохраняют ГЦК решетку, параметр ее изменяется на уровне ошибки измерения, аморфная фаза отсутствует.

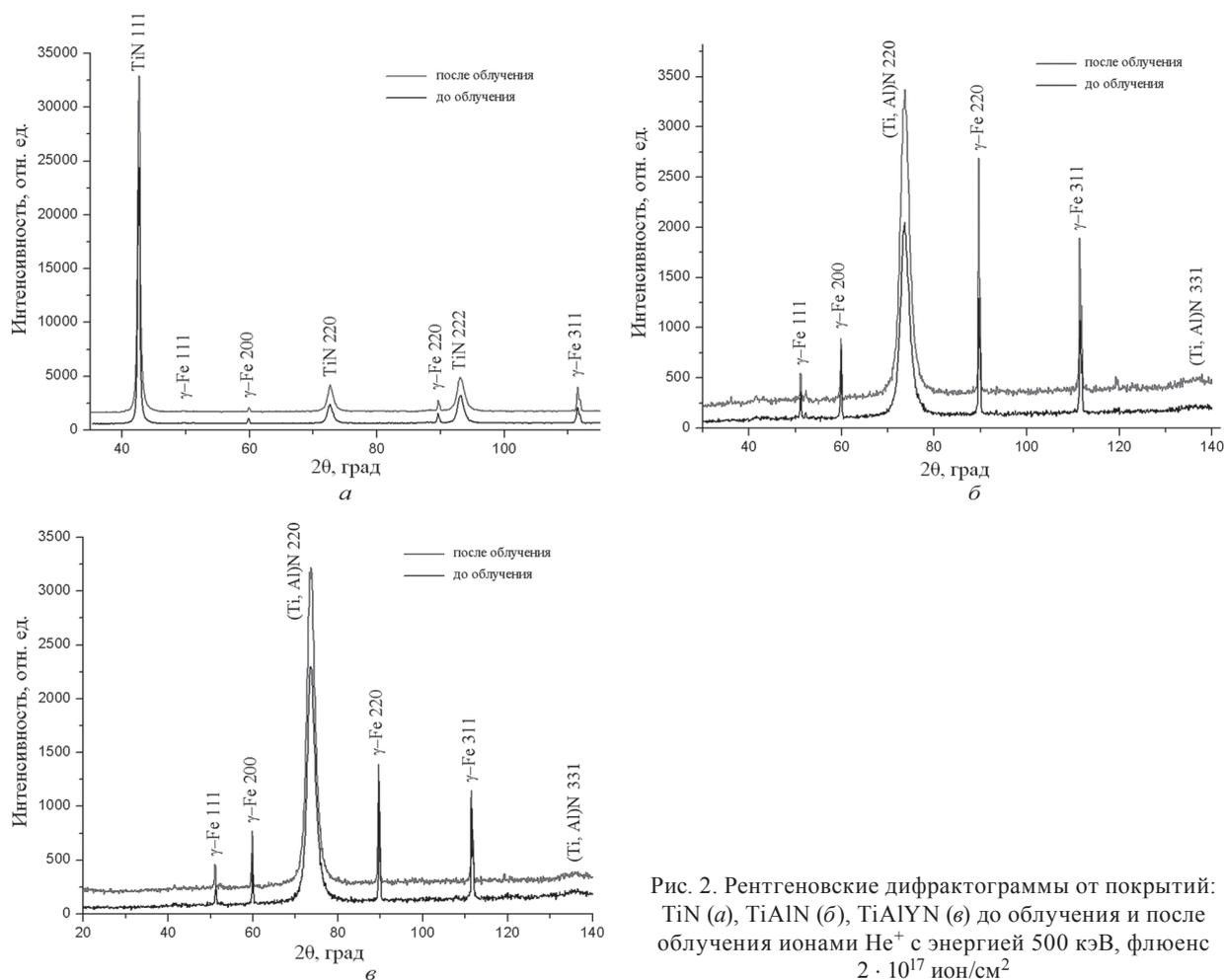


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы от покрытий: TiN (а), TiAlN (б), TiAlYN (в) до облучения и после облучения ионами He⁺ с энергией 500 кэВ, флюенс $2 \cdot 10^{17}$ ион/см²

На рис. 3 приведена зависимость величины микротвердости от флюенса облучения ионами гелия с энергией 500 кэВ для изучаемых покрытий.

Как видно из графиков, влияние облучения нелинейно сказывается на микротвердости покрытий. Но тенденция такова, что облучение вызывает упрочнение материала до некоторого критического флюенса. Далее, при увеличении флюенса, микротвердость снижается.

Добавка Al повышает твердость покрытия по сравнению с TiN на 30–60 %, как это видно из графика и показано в предыдущих работах по этой тематике [10; 11]. По результатам рентгеноструктурного фазового анализа не было обнаружено иных фаз кроме (Ti, Al)N, следовательно Y находится в твердом растворе. Добавка Y в составе покрытия сильно искажает элементарную ячейку при замещении иттрием атомов титана либо при внедрении иттрия в ячейку, так как атомный радиус иттрия отличается от этой величины для титана более чем на 24,4 % (1,43 Å и 1,78 Å соответственно [8]). Также «микролегирование» иттрием приводит к уменьшению размера кристаллитов покрытия на 10–25 %. Все эти факторы приводят к упрочнению покрытия TiAlYN по сравнению с TiAlN на 10–20 % и на 40–90 % по сравнению с TiN. Установленные закономерности подтверждаются литературными данными, где также было установлено увеличение твердости покрытий при добавке иттрия и других редкоземельных элементов [12].

Как видно на рис. 3, при всех исследованных флюенсах облучения покрытие TiAlN сохраняет большую твердость по сравнению с покрытием TiN. Твердость покрытия TiAlYN повышается примерно на 25 % в области флюенсов облучения от $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² до $1,5 \cdot 10^{17}$ ион/см². Далее происходит спад твердости на 10–15 % и затем рост ее до флюенса $3 \cdot 10^{16}$ ион/см². Критическим флюенсом, при котором наблюдается максимум твердости для TiN является $5 \cdot 10^{16}$ ион/см², для TiAlN – $2 \cdot 10^{17}$ ион/см², для TiAlYN – $5 \cdot 10^{16}$ ион/см². К наибольшему упрочнению под воздействием облучения способно покрытие TiAlYN, на котором наблюдается повышение твердости на 20–25 % по сравнению с исходной. К меньшему упрочнению способно покрытие TiN, с увеличением твердости на 15–17 %. Наименее восприимчиво к радиационному облучению покрытие TiAlN, на котором наблюдается увеличение твердости не более чем на 9 % и спад твердости на 10–15 % по сравнению с первоначальной при наибольшем флюенсе облучения. Наибольшее разупрочнение под воздействием облучения наблюдалось на покрытии TiN – падение величины твердости на 20–23 %. Все эти факты свидетельствуют о наибольшей стойкости покрытия TiAlN к действию облучения, о сопоставимой стойкости покрытия TiAlYN к облучению и способности его к существенному упрочнению при облучении.

Причина такого нелинейного и весьма необычного поведения твердости покрытия TiAlYN под воздействием облучения ионами гелия кроется в изменениях в кристаллической структуре материала. После облучения отсутствуют выделения новых фаз, не происходит существенного изменения параметра решетки, как было установлено методом рентгеноструктурного фазового анализа, но изменения твердости происходят. Определенный вклад в увеличение твердости при умеренных флюенсах облучения ионами He⁺ вносит обнаруженное нами измельчение зерен в покрытиях. Можно также предположить, что атомы гелия накапливаются в порах решетки, которые создаются деформированием при внедрении атомов иттрия, и, таким образом, происходит уплотнение кристаллической структуры материала с эффектом повышения твердости. Да-

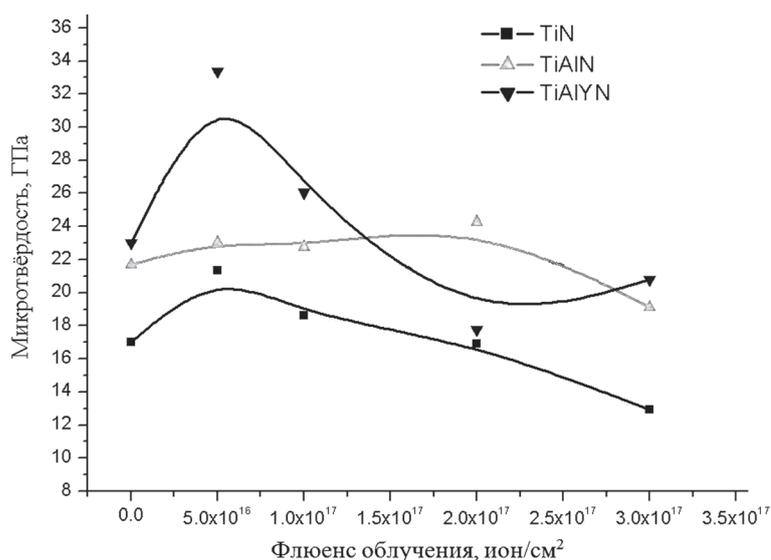


Рис. 3. График зависимости микротвердости покрытий TiN, TiAlN, TiAlYN от флюенса облучения ионами гелия с энергией 500 кэВ

лее при повышении флюенса облучения уже не находится вакантных пор для внедрения атомов гелия, в результате чего происходит накопление пузырей газа наноразмерного масштаба в межкристаллитных областях, что проявляется в уменьшении твердости. О возможности протекания подобных процессов при облучении сообщалось в литературе [13], где был установлен методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения факт накопления инертного газа в пузырьках размером до 5 нм.

На рис. 4 представлены фотографии микроструктуры покрытий после облучения ионами гелия с энергией 500 кэВ, полученные с помощью оптического микроскопа.

На фотографиях видны трещины скола части покрытий после облучения. Пороговой дозой частичного разрушения для покрытий TiN и TiAlYN является $2 \cdot 10^{17}$ ион/см², для покрытия TiAlN – $3 \cdot 10^{17}$ ион/см². Однако установлено, что в области частичного разрушения покрытия твердость равна примерно половине твердости исходного покрытия (13–17 ГПа) и значительно превосходит твердость мягкой подложки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Следовательно, покрытие разрушается не до подложки, а до глубины залегания максимума радиационно-индуцированных дефектов. Для нитрида титана эта глубина при данных условиях облучения составила величину 1–1,2 мкм [14]. Наиболее интенсивное отшелушивание происходит на покрытии TiN. Однако образования блистеров не наблюдалось ни на одном из покрытий ни при какой дозе облучения. В случае массивных материалов происходит накопление инертного газа в пузырьки с последующим их ростом (блистеринг) и растрескиванием или отшелушиванием областей материала (флекинг) [1; 6; 7; 15].

Механизм влияния радиационного облучения на тонкопленочные покрытия существенно отличается от механизма влияния облучения на массивные материалы. При облучении в них неизбежно также происходит накопление точечных дефектов кристаллического строения (вакансий, дивакансий, пар Френкеля, смещенных из узлов атомов, включений инородных атомов и др.), многовакансионных комплексов, атомов инертных газов как продуктов трансмутационных реакций и как бомбардирующих ионов [16]. Но это накопление в начальной стадии происходит на атомном и наноуровнях. А дальнейшей коалесценции этих дефектов и включений в макроблистеры препятствуют сжимающие напряжения пленки покрытия. Происходит лишь нано- и субмикрокоалесценция дефектов, которые не наблюдаются при использованном методе исследования структуры покрытия, в то время как при меньших флюенсах облучения блистеры

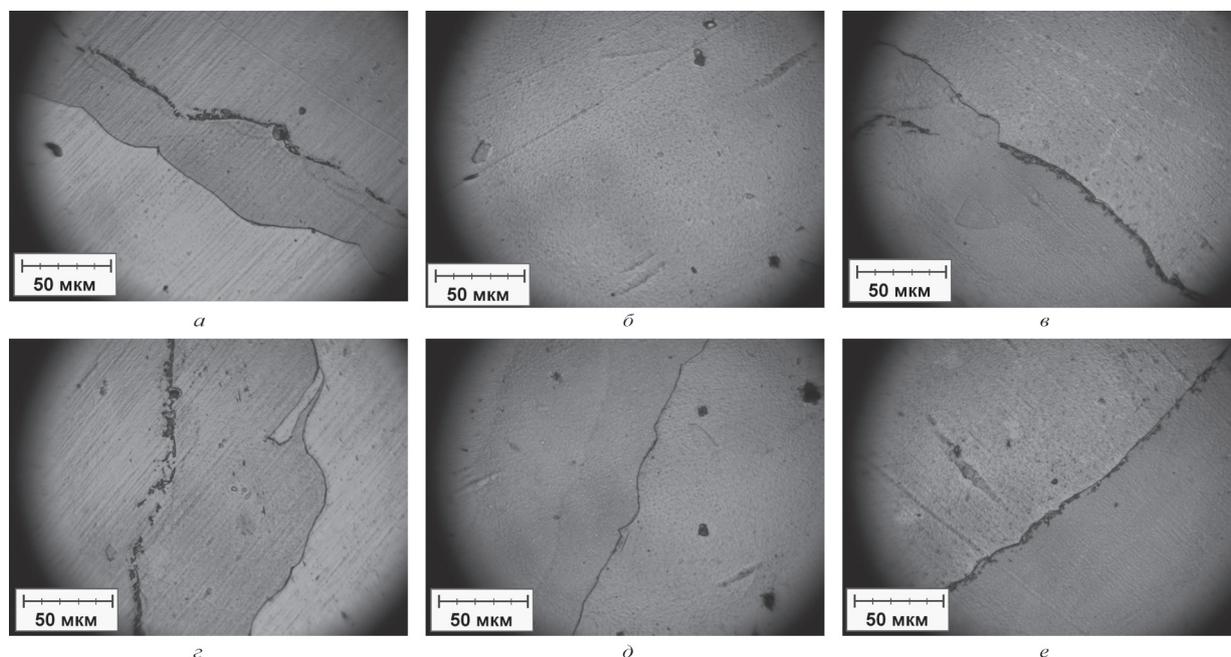


Рис. 4. Фотографии микроструктуры покрытий TiN (а, г), TiAlN (б, д), TiAlYN (в, е) после облучения ионами гелия с флюенсами $2 \cdot 10^{17}$ ион/см² (а, б, в), $3 \cdot 10^{17}$ ион/см² (г, д, е)

наблюдались даже в оптическом микроскопе при облучении массивных образцов сталей марок Ст3, 12Х18Н9Т и сплава Д16 [7].

Заключение. На основании проведенных исследований установлено, что облучение наноструктурированных покрытий TiN, TiAlN, TiAlYN ионами He⁺ с энергией 500 кэВ в диапазоне флюенсов $5 \cdot 10^{16} \dots 3 \cdot 10^{17}$ ион/см² не приводит к существенным структурным изменениям и не вызывает катастрофического разрушения (блистеринг, радиационное распухание). Радиационное облучение вызывает нелинейные изменения величины твердости покрытий. Так, до флюенсов $5 \cdot 10^{16} \dots 2 \cdot 10^{17}$ ион/см² наблюдается упрочнение на 15–20 %, при дальнейшем увеличении флюенса наблюдается спад твердости на 5–10 %. Установлено отсутствие блистеринга покрытий при всех исследованных флюенсах облучения. Данный факт может быть обусловлен эффективными механизмами рекомбинации точечных радиационно-индуцированных дефектов в наноструктурных покрытиях, в первую очередь на границах кристаллитов. Данные покрытия TiN, TiAlN, TiAlYN являются перспективными в качестве радиационно-стойких на оболочках ТВЭЛов ядерных реакторов.

Литература

1. Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И., Пирайнен В. Ю. Специальные материалы в машиностроении СПб.: ХИМИЗДАТ, 2004. – 640 с.
2. Yang Y., Dickerson C. A., Allen T. R. // J. of Nuclear Materials. 2009. Vol. 392. P. 200–205.
3. Kim I., Jiao L., Khatkhatay F. et al. // J. of Nuclear Materials. 2013. Vol. 441. P. 47–53.
4. Janse van Vuuren A., Skuratov V. A., Uglov V. V. et al. // J. of Nuclear Materials. 2013. Vol. 442. P. 507–511.
5. Popovic M., Stojanovic M., Perusko D. et al. // Nucl. Inst. Meth. B. 2008. Vol. 266. P. 2507–2510.
6. Андриевский Р. А. // Нанообзоры. 2011. Т. 6, № 5–6. С. 34–42.
7. Комаров Ф. Ф., Комаров А. Ф., Пилько Вл. В., Пилько В. В. // Инженерно-физический журн. 2013. Т. 86, № 6. С. 1393–1396.
8. Самсонов Г. В., Виницкий И. М. Тугоплавкие соединения: справ. 2-е изд. М.: Металлургия, 1976. – 560 с.
9. Русаков А. А. Рентгенография металлов. М.: Атомиздат, 1977. – 480 с.
10. Komarov F. F., Konstantinov S. V., Pogrebnjak A. D. et al. // Acta Physica Polonica A. 2014. Vol. 20. P. 109–113.
11. Komarov F. F., Konstantinov S. V., Pilko V. V. // J. of Friction and Wear. 2014. Vol. 35, N 3. P. 215–223.
12. Nanostructured Coating / eds. A. Gavaleiro, J. T. de Hosson. Berlin: Springer-Verlag, 2006. – 648 p.
13. Hong M., Ren F., Zhang H. et al. // Applied Physics Letters. 2012. Vol. 101. P. 153117–153117-5.
14. Буренков А. Ф., Комаров Ф. Ф., Кумахов М. А. Пространственные распределения энергии, выделенной в каскаде атомных столкновений в твердых телах. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 214 с.
15. Неклюдов И. М., Воеводин В. Н. // Материалы 10-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом». Минск, 2013. С. 127–130.
16. Комаров Ф. Ф. Ионная имплантация в металлы. М.: Металлургия, 1990. – 216 с.

F. F. KOMAROV, S. V. KONSTANTINOV, V. E. STREL'NITSKIY

mymail3000@tut.by; komarovF@bsu.by

RADIATION RESISTANCE OF NANOSTRUCTURED TIN, TIALN, TIALYN COATINGS

Summary

The radiation resistance of the nanostructured TiN, TiAlN, TiAlYN coatings irradiated with He⁺ ions with an energy of 500 keV over the range of fluences from $5 \cdot 10^{16}$ ions/sm² up to $3 \cdot 10^{17}$ ions/cm² was studied. Changes of phase composition, structure, lattice parameters, morphology, and mechanical properties of coatings under helium ion irradiation were investigated. Any blistering was not detected and a nonlinear influence of irradiation fluence on the properties of thin film coatings was revealed. It is found that the nanostructured TiN, TiAlN, TiAlYN coatings are radiation-resistant and are not susceptible to the degradation under high-fluence ion irradiation.

УДК 535.51

Член-корреспондент А. А. АФАНАСЬЕВ, Ю. А. КУРОЧКИН,
академик А. Н. РУБИНОВ

**ПОНДЕРОМОТОРНАЯ СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ
НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПЛАСТИНКУ**

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск

Поступило 01.12.2014

Введение. Проблема взаимодействия лазерного излучения с диэлектрическими частицами размеров, лежащих в диапазоне от нескольких десятых долей до нескольких десятков длин волн излучения, вызывает в последние десятилетия большой интерес [1–4]. Данная задача особенно актуальна с точки зрения возможных применений лазерного излучения в биологии. При этом во многих задачах такого рода достаточно использовать классическую электромагнитную теорию. Более того, классический подход обладает рядом преимуществ. Он применим там, где неприменима квантовая теория. Например, когда частицы представляют собой среду с потерями.

Ниже будет рассмотрена задача о балансе импульса электромагнитного поля в простейшем случае нормального падения плоской электромагнитной волны на диэлектрическую плоскую пластинку. При этом будут исследованы возникающие здесь силы, действующие на пластинку. Достоинством рассматриваемой задачи является то, что она является точно решаемой. Очевидно, такая задача может быть сведена к одномерной, если падающая волна поляризована линейно. В этом случае она может рассматриваться как задача взаимодействия одномерного диэлектрического объекта конечных размеров со скалярной волной.

Как известно, точно решаемые задачи играют важную роль в физике как эталонные. Они служат основой многих качественных соображений в том случае, когда точный расчет характеристик не может быть реализован.

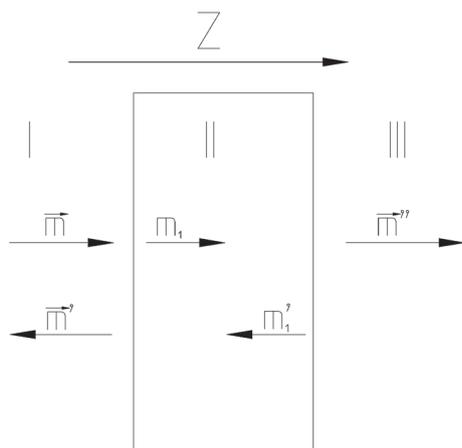


Рис. 1. Геометрия падения, отражения и прохождения плоской волны через плоскопараллельную диэлектрическую пластинку. Векторы рефракции $\vec{m}, \vec{m}', \vec{m}_1, \vec{m}_1', \vec{m}''$ соответствуют падающей, отраженной, прошедшей, прошедшей отраженной и прошедшей через пластинку волнам

Поле в пластинке и вне ее. Основные обозначения.

Для расчета баланса импульса электромагнитного поля плоской волны, когда в него помещена плоскопараллельная диэлектрическая пластинка, расположенная так, что ее грани перпендикулярны направлению распространения волны будем использовать результаты решения граничной задачи и обозначения работы [5]. Уравнение грани пластинки, на которую падает волна (\mathbf{qr}) = $z = 0$, параллельной ей грани (\mathbf{qr}) = $z = d$, \mathbf{q} – внутренняя нормаль к первой грани пластинки, \mathbf{r} – радиус-вектор точек на верхней и нижней гранях пластинки соответственно, d – толщина пластинки (рис. 1). Вследствие помещения в трехмерное евклидово пространство пластинки пространство разбивается на три области: I – над пластинкой, II – внутри пластинки и III – под пластинкой. Показатель преломления пластинки (область II) – n , показатель преломления областей I и III – $n_0 = 1$, т. е. пространство вне пластинки представляет собой вакуум.

Следуя обозначениям, принятым в [5], результирующая волна в области I является суперпозицией

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{(I)} = & C_1 \mathbf{h}_1 \exp(-ik_0 \mathbf{m}' \mathbf{r}) + C_1' \mathbf{h}_1 \exp(-ik_0 \mathbf{m} \mathbf{r}) = \\ & C_1 \mathbf{h}_1 \exp(-ik_0 \mathbf{m} \mathbf{r}) + C_1' \mathbf{h}_1 \exp(ik_0 \mathbf{m} \mathbf{r}), \end{aligned} \quad (1)$$

где учтено, что $\mathbf{m} = -\mathbf{m}'$.

Согласно уравнениям Максвелла, с учетом гармонической зависимости решений от времени магнитная напряженность поля в полупространстве I определяется выражением

$$\begin{aligned} \mathbf{H}^{(I)} = \frac{i}{k_0} \text{rot} \mathbf{E}^{(I)} = & -\frac{i}{k_0} \mathbf{h}_1 \mathbf{m}^x \left[(C_1 (-ik_0) \exp(-k_0 \mathbf{m} \mathbf{r}) + C_1' (ik_0) \exp(ik_0 \mathbf{m} \mathbf{r})) \right] = \\ & [\mathbf{m} \mathbf{h}_1] (C_1 \exp(-ik_0 \mathbf{m} \mathbf{r}) - C_1' \exp(ik_0 \mathbf{m} \mathbf{r})). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь учтено, что оператор \mathbf{m}^x определяется как $\mathbf{m}^x \mathbf{h}_1 = [\mathbf{m} \mathbf{h}_1]$, а квадратные скобки обозначают векторное произведение векторов \mathbf{m} и \mathbf{h} . Нам понадобится также выражение для комплексно сопряженного вектора магнитной напряженности, который очевидно равен

$$\mathbf{H}^{(I)*} = [\mathbf{m} \mathbf{h}_1] (C_1^* \exp(ik_0 \mathbf{m} \mathbf{r}) - C_1'^* \exp(-ik_0 \mathbf{m} \mathbf{r})), \quad (3)$$

Электрическая и магнитная напряженности в пластинке определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{(II)} = & A_1 \mathbf{h}_1 \exp(-ik_0 \mathbf{m} \mathbf{r}) + A_1' \mathbf{h}_1 \exp(-ik_0 \mathbf{m}' \mathbf{r}) = \\ & A_1 \mathbf{h}_1 \exp(-ik_0 \mathbf{m}_1 \mathbf{r}) + A_1' \mathbf{h}_1 \exp(ik_0 \mathbf{m}_1 \mathbf{r}), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\mathbf{H}^{(II)} = [\mathbf{m} \mathbf{h}_1] (A_1 \mathbf{h}_1 \exp(-ik_0 \mathbf{m}_1 \mathbf{r}) - A_1' \mathbf{h}_1 \exp(ik_0 \mathbf{m}_1 \mathbf{r})), \quad (5)$$

при этом

$$\mathbf{H}^{(II)*} = [\mathbf{m} \mathbf{h}_1] (A_1^* \mathbf{h}_1 \exp(ik_0 \mathbf{m}_1 \mathbf{r}) - A_1'^* \mathbf{h}_1 \exp(-ik_0 \mathbf{m}_1 \mathbf{r})). \quad (6)$$

Волна, вышедшая из пластинки, имеет следующие выражения для электрической и магнитной напряженностей:

$$\mathbf{E}^{(III)} = C_1'' \mathbf{h}_1 \exp(-ik_0 \mathbf{m}'' \mathbf{r}) = C_1'' \mathbf{h}_1 \exp(-ik_0 \mathbf{m} \mathbf{r}), \quad (7)$$

$$\mathbf{H}^{(III)} = C_1'' [\mathbf{m} \mathbf{h}_1] \exp(-ik_0 \mathbf{m} \mathbf{r}). \quad (8)$$

В формулах (1)–(5) \mathbf{m} , \mathbf{m}' , \mathbf{m}_1 , \mathbf{m}_1' , \mathbf{m}'' – векторы рефракции падающей, отраженной, прошедшей в пластинку, отраженной от нижней грани пластинки и прошедшей волн соответственно.

Зависимость всех волн от времени гармоническая, т. е. определяется множителем $\exp(i\omega t)$, $k_0 = \frac{\omega}{c}$, где c – скорость света. Для векторов рефракции в данной задаче выполняются следующие определения и соотношения $\mathbf{m} = -\mathbf{m}' = n_0 \mathbf{q}$, $\mathbf{m}_1 = -\mathbf{m}_1' = n \mathbf{q}$, $\mathbf{m}'' = n_0 \mathbf{q}$. Амплитуды C' , C_1'' , A_1 , A_1' в формулах (1)–(8) следующим образом выражаются через амплитуду падающей волны [4]:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{2} [(1+n)C_1 + (1-n)C_1'], \\ A_1' &= \frac{1}{2} [(1-n)C_1 + (1+n)C_1'], \\ C_1' &= \frac{[(1-n^2) \exp(-i\delta) + (1-n^2) \exp(i\delta)] C_1}{(1+n)^2 \exp(i\delta) + (1-n)^2 \exp(-i\delta)}, \\ C_1'' &= \frac{4nC_1}{(1+n)^2 \exp(i\delta) + (1-n)^2 \exp(-i\delta)}, \end{aligned}$$

где $\delta = k_0 n d$. Области I и III являются вакуумом и, следовательно, их показатель преломления равен единице.

Выражение для плотности импульса поля в трех областях (I – над пластинкой, II – в пластинке, III – за пластинкой). Определим усредненное за период колебаний волны выражение вектора Умова–Пойнтинга – плотности импульса поля согласно формуле

$$\mathbf{U} = -\frac{c}{8\pi} \operatorname{Re}[\mathbf{E}\mathbf{H}^*].$$

Тогда в области I с учетом того, что

$$\operatorname{Re}[\mathbf{E}^{(I)}\mathbf{H}^{(I)*}] = \mathbf{m}(C_1 C_1^* - C_1' C_1'^*) = \mathbf{m}(|C_1|^2 - |C_1'|^2),$$

для плотности импульса поля в единицу времени получим

$$\mathbf{U}^{(I)} = \mathbf{m} \frac{c}{8\pi} (|C_1|^2 - |C_1'|^2). \quad (9)$$

В пластинке (область II)

$$\operatorname{Re}[\mathbf{E}^{(II)}\mathbf{H}^{(II)*}] = \mathbf{m}(|A_1|^2 - |A_1'|^2) = 2n^2 \mathbf{q} (|C_1|^2 - |C_1'|^2),$$

$$\mathbf{U}^{(II)} = 2n^2 \mathbf{q} \frac{c}{8\pi} (|C_1|^2 - |C_1'|^2). \quad (10)$$

В области вышедшей волны (область III)

$$\mathbf{U}^{(III)} = \frac{c}{8\pi} \operatorname{Re}[\mathbf{E}^{(III)}\mathbf{H}^{(III)*}] = \mathbf{m} \frac{c}{8\pi} |C_2''|^2 = \mathbf{q} \frac{c}{8\pi} |C_2''|^2.$$

Выраженные через амплитуду C_1 исходной падающей волны векторы $U^{(I)}$ и $U^{(III)}$, определенные формулами (9), (10), совпадают и примут вид

$$\mathbf{U}^{(I)} = \mathbf{q} \frac{c}{8\pi} (|C_1|^2 - |C_1'|^2) = \mathbf{q} \frac{c}{8\pi} \frac{16n^2 |C_1|^2}{16n^2 + 4(n+1)^2 (n-1)^2 \sin^2 2\delta}.$$

Для $U^{(II)}$ справедливо выражение аналогичное выражению $U^{(I)}$ (9), отличающееся от последнего только множителем n^2 .

Нормировка решений. Импульс поля в пластинке и вне ее. Нормировку решений осуществим так, чтобы в результате энергия и импульс исходной плоской волны имели конечное значение. Заключим исходную падающую плоскую волну в прямоугольный параллелепипед объема $V = SL$, где S – площадь основания этого параллелепипеда, параллельного сторонам пластинки (L – длина параллелепипеда в направлении распространения волны, рис. 2). Сделаем замену

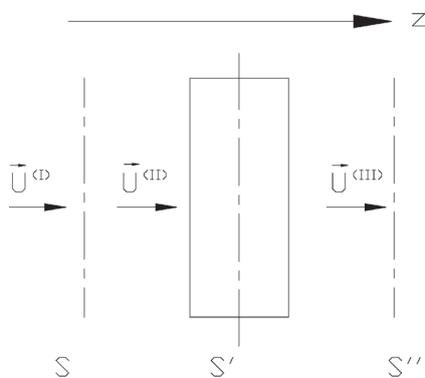


Рис. 2. Поток вектора Умова–Пойнтинга в направлении, нормальном к грани пластинки

$$C_1 \rightarrow \frac{C_1}{\sqrt{V}} = \frac{C_1}{\sqrt{SL}}.$$

Тогда импульс плоской волны во всем пространстве

$$\int d^3 r \mathbf{m} \frac{C_1 C_1^*}{SL} = \mathbf{m} |C_1|^2.$$

Импульс поля в области I:

$$\mathbf{P}^{(I)} = \int \mathbf{U}^{(I)} d^3 r = \mathbf{q} \frac{c}{8\pi} \frac{16n^2 |C_1|^2}{[16n^2 + 4(n+1)^2 (n-1)^2 \sin^2 2\delta] 2L} = \frac{c\mathbf{q}}{16\pi L} \frac{16n^2 |C_1|^2}{[16n^2 + 4(n+1)^2 (n-1)^2 \sin^2 2\delta]}. \quad (11)$$

Импульс поля в пластинке (область II):

$$\mathbf{P}^{(II)} = \mathbf{q} \frac{cn^2 d}{L8\pi} \frac{16n^2 |C_1|^2}{[16n^2 + 4(n+1)^2(n-1)^2 \sin^2 2\delta]}. \quad (12)$$

Импульс поля в области III:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^{(III)} &= \mathbf{q} \frac{c}{8\pi} \frac{L/2-d}{L} \frac{16n^2 |C_1|^2}{[16n^2 + 4(n+1)^2(n-1)^2 \sin^2 2\delta]} = \\ &= \mathbf{q} \frac{c}{8\pi} \frac{L/2-d}{L} \frac{16n^2 |C_1|^2}{[16n^2 + 4(n+1)^2(n-1)^2 \sin^2 2\delta]}. \end{aligned} \quad (13)$$

Из выражений (11)–(13) видно, что импульс поля в области (II, III) с пластинкой на величину

$$\Delta \mathbf{P} = \frac{c\mathbf{q}(n^2-1)d}{8L\pi} \frac{16n^2 |C_1|^2}{[16n^2 + 4(n+1)^2(n-1)^2 \sin^2 2\delta]}, \quad (14)$$

(где $n > 1$) больше импульса в полупространстве I падающей волны. Таким образом, только приписав пластинке импульс, равный $\Delta \mathbf{P}$ с противоположным знаком, можно добиться выполнения закона сохранения импульса системы поле–пластинка. Используя дифференциальное уравнение, выражающее закон сохранения энергии–импульса – теорему Умова–Пойнтинга, можно установить связь передачи импульса (14) с силой, действующей на пластинку. Действительно,

$$\frac{1}{c} \frac{\partial w}{\partial t} = \text{div}(\mathbf{U} / c), \quad (15)$$

где w – плотность энергии поля. Перейдем к интегральным выражениям. Проинтегрируем выражение (15) по объему, тогда левая его часть равна

$$\int \frac{1}{c} \frac{\partial w}{\partial t} d^3 r = \frac{d}{dt} \int (w / c) d^3 r = \frac{d}{dt} (W / c), \quad (16)$$

где W – полная энергия поля, а W / c – модуль импульса поля в вакууме.

Проинтегрируем правую часть уравнения (15) и воспользуемся теоремой Гаусса, тогда

$$\int d^3 r \text{div}(\mathbf{U} / c) = \frac{1}{c} \int U_q d\sigma = \frac{S}{c} (U^{(I)} - U^{(II)}). \quad (17)$$

При расчете интеграла (17) учтено, что поток через боковые грани параллелепипеда (рис. 2) равен нулю. Из сравнения выражений (16), (17) видно, что поток вектора Умова–Пойнтинга, разделенный на скорость электромагнитной волны U_q / c через поверхность, охватывающую поле, равен силе, определяемой выражением (17) (см. также [6])

$$|F| = - \int U_q / cd \sigma = \frac{(\mathbf{q} \Delta \mathbf{P})}{cd},$$

где $d\sigma$ – элемент площади плоскости (x, y) , перпендикулярной направлению импульса, или с учетом вышесказанного

$$\mathbf{F} = \frac{\mathbf{q}(n^2-1)}{8\pi} \frac{16n^2 |C_1|^2}{L[16n^2 + 4(n+1)^2(n-1)^2 \sin^2 2\delta]}. \quad (18)$$

Выражение (18) определяет общую силу, действующую со стороны поля на пластинку. Определим предельные выражения силы (18). Прежде всего, когда $\delta = l\pi$, где l – целое число (толщина пластинки кратна половине длины волны) сила будет максимальна и равна

$$\mathbf{F} = \frac{\mathbf{q}(n^2 - 1)|C_1|^2}{8\pi L}. \quad (19)$$

Для случая, когда показатель преломления пластинки незначительно отличается от единицы и может быть представлен как $n = 1 + \Delta n$, где $\Delta n \ll 1$, ограничиваясь первыми степенями по Δn , получим

$$\mathbf{F} = \frac{\mathbf{q}\Delta n|C_1|^2}{4\pi L}.$$

Таким образом, при показателях преломления пластинки мало отличных от единицы, сила, действующая на пластинку со стороны нормально падающей плоской волны, не зависит от толщины пластинки, а только от разницы показателей преломления пластинки и среды, в которой она находится и от интенсивности падающей волны.

Теперь рассмотрим случай, когда показатель преломления пластинки много больше единицы (или показателя преломления окружающей пластинку среды). В этом случае следует различать две возможности. Когда $\delta = n\pi$, выражение для силы совпадет с выражением (19), в котором можно пренебречь единицей по сравнению с квадратом показателя преломления пластинки, т. е. в этом случае сила, действующая на пластинку со стороны нормально падающей плоской волны, прямо пропорциональна квадрату показателя преломления пластинки и интенсивности падающей волны.

При толщине пластинки, не кратной половине длины волны падающего на нее излучения ($\delta \neq n\pi$, пренебрегая всюду единицей по сравнению с n^2), получим

$$\mathbf{F} = \frac{\mathbf{q}n^2}{8\pi} \frac{4|C_1|^2}{L[4 + n^2 \sin 2\delta]} = \frac{\mathbf{q}|C_1|^2}{2\pi L \sin 2\delta}.$$

Заключение. В заключение сделаем несколько замечаний:

1. Суммарная сила, действующая со стороны электромагнитного поля плоской волны на диэлектрическую пластинку в него помещенную, определяется изменением усредненного за период потока вектора Умова–Пойнтинга через плоскость, параллельную плоскости, ограничивающей пластинку и находящейся в вакууме, и плоскость, ей параллельную, находящуюся внутри пластинки.

2. Метод, основанный на определении силы через изменение импульса электромагнитного поля, универсален и применим для тел, состоящих из поглощающей среды.

Авторы благодарят В. М. Редькова за полезные замечания.

Литература

1. Афанасьев А. А., Рубинов А. Н., Курочкин Ю. А. и др. // Квантовая электроника. 2003. Т. 33, № 3. С. 250.
2. Gordon J. P. // Phys. Rev A. 1973. Vol. 8, N 5. P. 14.
3. Rohrbach A., Steizer E. K. // JOSA A. 2001. Vol. 18, N 4.
4. Сайфер В. А., Котляр В. В., Ханина С. Н. // ЭЧАЯ. 2004. Т. 35, вып. 6. С. 1368–1431.
5. Федоров Ф. И. Теория гиротропии. Минск: Наука и техника, 1978. – 456 с.
6. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1989. – 504 с.

A. A. AFANAS'EV, Yu. A. KUROCHKIN, A. A. RUBINOV

y.kurochkin@dragon.bas-net.by

PONDEROMOTIV FORCE ACTING ON THE DIELECTRIC PLATE

Summary

In the present article, the momentum transfer from the field of a plane electromagnetic wave to the plate, which is normal incident on the parallel dielectric plate, and the total force caused by this momentum transfer are calculated.

УДК 530.145; 538.915; 538.958

В. В. КУДРЯШОВ, А. В. БАРАН

СПИН-ОРБИТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРУГОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ

(Представлено членом-корреспондентом Л. М. Томильчиком)

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск

Поступило 29.10.2014

Известно [1; 2], что движение электрона во внутреннем слое полупроводниковой гетероструктуры можно рассматривать как двумерное в плоскости (x, y) благодаря наличию запирающей квантовой ямы по оси z , направленной перпендикулярно плоскости (x, y) . В связи с развитием нанотехнологий возрастающее значение приобретают исследования квантовых точек в гетероструктурах. Удерживающий потенциал обычно предполагается аксиально-симметричным $V_c(x, y) = V_c(\rho)$, где $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$. Существуют два типа удерживающих потенциалов, которые широко используются в этой области. Во-первых, это – прямоугольный потенциал с непроницаемыми стенками [3; 4], во-вторых – параболический потенциал [5; 6]. Однако эти модели нефизичны, так как они в принципе не допускают наличия несвязанных состояний. В [7; 8] предложен простой, но достаточно адекватный моделируемой системе потенциал конечной глубины V для двумерных круговых квантовых точек. Этот потенциал имеет вид

$$V_c(\rho) = \begin{cases} 0, & 0 < \rho < \rho_0, \\ V, & \rho_0 < \rho < \infty. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь ρ_0 – радиус квантовой точки.

Исследования влияния спин-орбитальных взаимодействий Рашбы [9] и Дрессельхауса [10] на состояния электрона в плоских гетероструктурах в последние годы получили широкое распространение. Операторы взаимодействия Рашбы V_R и Дрессельхауса V_D задаются формулами

$$V_R = \alpha_R (\sigma_x p_y - \sigma_y p_x) / \hbar, \quad V_D = \alpha_D (\sigma_x p_x - \sigma_y p_y) / \hbar,$$

где σ_x и σ_y – стандартные матрицы Паули. Интенсивности этих взаимодействий зависят от используемых материалов. Вклад каждого из взаимодействий может быть измерен с применением различных экспериментальных методов [2; 11].

Полный гамильтониан рассматриваемой задачи можно записать следующим образом:

$$H = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2M_{\text{eff}}} + V_c(\rho) + V_R + V_D, \quad (2)$$

где M_{eff} – эффективная масса электрона и $V_c(\rho)$ – потенциал вида (1). В общем случае произвольных значений интенсивностей α_R и α_D , точные решения уравнения Шредингера с гамильтонианом (2) неизвестны. В частном случае взаимодействия Рашбы ($\alpha_D = 0$) точные решения были получены в [7; 8]. Отметим также, что легко найти подобные точные решения в альтернативном частном случае ($\alpha_R = 0$).

В то же время значительное внимание уделяется и тому частному случаю [2; 12; 13], когда спин-орбитальные взаимодействия Рашбы и Дрессельхауса имеют равную интенсивность $\alpha_R = \alpha_D$. Это может быть экспериментально достигнуто благодаря тому, что интенсивностью взаимодействия Рашбы можно управлять внешним электрическим полем, а интенсивность вза-

имодействия Дрессельхауса можно менять, варьируя ширину квантовой ямы по оси z [1; 2]. В данном частном случае точные решения были найдены в [14]. В настоящей работе рассмотрен случай, когда разность интенсивностей $\alpha_R - \alpha_D$ мала по сравнению с их суммой $\alpha_R + \alpha_D$. Приближенное решение уравнения Шредингера ищется с помощью теории возмущений, когда возмущение пропорционально малому параметру

$$\gamma = \frac{\alpha_R - \alpha_D}{\alpha_R + \alpha_D}.$$

В рассматриваемом случае гамильтониан можно представить в виде суммы

$$H = H_0 + H'$$

невозмущенного гамильтониана

$$H_0 = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2M_{\text{eff}}} + \left(\frac{\alpha_R + \alpha_D}{2\hbar} \right) (\sigma_x - \sigma_y)(p_x + p_y) + V_c(\rho) \quad (3)$$

и возмущения вида

$$H' = \left(\frac{\alpha_R - \alpha_D}{2\hbar} \right) (\sigma_x + \sigma_y)(p_y - p_x) = \gamma \left(\frac{\alpha_R + \alpha_D}{2\hbar} \right) (\sigma_x + \sigma_y)(p_y - p_x).$$

Будем решать полное уравнение Шредингера $H\Psi = E\Psi$ в два этапа. Сначала получим точное решение невозмущенного уравнения Шредингера

$$H_0\Psi_0 = E_0\Psi_0, \quad (4)$$

а потом учтем влияние добавки H' в рамках теории возмущений.

Легко убедиться в том, что в случае невозмущенного уравнения (4) с гамильтонианом (3), наряду с очевидным интегралом движения

$$\sigma = (\sigma_x - \sigma_y) / \sqrt{2}$$

имеется и нетривиальный интеграл движения

$$L = L_z + \frac{(\alpha_R + \alpha_D)M_{\text{eff}}}{2\hbar} (x - y)(\sigma_x - \sigma_y),$$

где L_z – оператор углового момента. Будем искать такие решения уравнения (4), которые являются собственными функциями операторов σ и L . Тогда искомые решения допускают факторизацию вида

$$\Psi_0^\pm(x, y) = \mathbf{n}^\pm \exp \left[\mp i \frac{(\alpha_R + \alpha_D)M_{\text{eff}}}{\sqrt{2}\hbar^2} (x + y) \right] e^{im\phi} u(\rho), \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (5)$$

где m – квантовое число углового момента; \mathbf{n}^\pm – ортонормированные собственные векторы оператора σ :

$$\sigma \mathbf{n}^\pm = \pm \mathbf{n}^\pm, \quad \mathbf{n}^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \pm e^{-i\pi/4} \end{pmatrix}.$$

Здесь использованы полярные координаты ρ, ϕ ($x = \rho \cos \phi$, $y = \rho \sin \phi$). Полученные волновые функции удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\sigma \Psi_0^\pm(x, y) = \pm \Psi_0^\pm(x, y), \quad L \Psi_0^\pm(x, y) = m\hbar \Psi_0^\pm(x, y).$$

Перейдя к безразмерным величинам

$$r = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad e_0 = \frac{2M_{\text{eff}}\rho_0^2}{\hbar^2} E_0, \quad v = \frac{2M_{\text{eff}}\rho_0^2}{\hbar^2} V, \quad a_R = \frac{2M_{\text{eff}}\rho_0}{\hbar^2} \alpha_R, \quad a_D = \frac{2M_{\text{eff}}\rho_0}{\hbar^2} \alpha_D,$$

запишем радиальное уравнение

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} + \left(e_0 + a^2 - v_c(r) - \frac{m^2}{r^2} \right) u = 0, \quad (6)$$

где

$$a = (a_R + a_D) / 2, \\ v_c(r) = \begin{cases} 0, & 0 < r < 1, \\ v, & 1 < r < \infty. \end{cases}$$

Уравнение (6) является уравнением Бесселя. Частные решения выбираются таким образом, чтобы радиальная волновая функция $u(r)$ была регулярной в начале координат $r \rightarrow 0$ и стремилась к нулю на бесконечности $r \rightarrow \infty$.

Потребуем выполнения условия непрерывности для радиальной волновой функции $u(r)$ и ее первой производной в граничной точке $r = 1$. В результате получаем явную формулу

$$u(r) = c \begin{cases} K_m(\sqrt{v - e_0 - a^2}) J_m(\sqrt{e_0 + a^2} r), & 0 < r < 1, \\ J_m(\sqrt{e_0 + a^2}) K_m(\sqrt{v - e_0 - a^2} r), & 1 < r < \infty, \end{cases}$$

где $J_m(z)$ – функция Бесселя и $K_m(z)$ – модифицированная функция Бесселя [15]. Точное уравнение для определения невозмущенной энергии $e_0(m, v, a)$ имеет вид

$$K_m(\sqrt{v - e_0 - a^2}) J'_m(\sqrt{e_0 + a^2}) = J_m(\sqrt{e_0 + a^2}) K'_m(\sqrt{v - e_0 - a^2}).$$

Здесь введены обозначения

$$J'_m(\sqrt{e_0 + a^2}) = \left. \frac{dJ_m(\sqrt{e_0 + a^2} r)}{dr} \right|_{r=1}, \quad K'_m(\sqrt{v - e_0 - a^2}) = \left. \frac{dK_m(\sqrt{v - e_0 - a^2} r)}{dr} \right|_{r=1}.$$

Значение c находится из условия нормировки $\langle \Psi_0^\pm | \Psi_0^\pm \rangle = 1$. Отметим, что функции $\Psi_0^\pm(x, y)$ ортогональны ($\langle \Psi_0^\pm | \Psi_0^\mp \rangle = 0$).

Наряду с безразмерными величинами e_0 и v рассмотрим возмущение в безразмерной форме

$$h' = \frac{2M_{\text{eff}} \rho_0^2}{\hbar^2} H'. \quad (7)$$

Так как каждый уровень энергии невозмущенной системы является двукратно вырожденным с двумя собственными функциями (5), будем учитывать вклад возмущения (7) по теории возмущений при наличии вырождения. Вследствие того, что $(\sigma_x + \sigma_y) \mathbf{n}^\pm = \mp i\sqrt{2} \mathbf{n}^\mp$, имеем следующие равенства:

$$\langle \Psi_0^\pm | h' | \Psi_0^\pm \rangle = 0$$

для диагональных матричных элементов в базисе собственных векторов $|\Psi_0^+\rangle$ и $|\Psi_0^-\rangle$. Недиagonальные матричные элементы имеют вид

$$\langle \Psi_0^+ | h' | \Psi_0^- \rangle = \langle \Psi_0^- | h' | \Psi_0^+ \rangle = -\gamma \delta(m, v, a),$$

где

$$\delta(m, v, a) = 2ma \frac{\int_0^\infty J_1(2ar) u^2(r) dr}{\int_0^\infty u^2(r) r dr}.$$

Тогда для расщепления невозмущенных уровней энергии получаем

$$e^\pm(m, v, a, \gamma) = e_0(m, v, a) \mp \gamma \delta(m, v, a).$$

Нормированные собственные функции нулевого приближения, которые принадлежат собственным значениям e^\pm , описываются формулами

$$\Psi^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}}(\Psi_0^+ \pm \Psi_0^-).$$

В дополнение к аналитическим результатам представим некоторые графические иллюстрации. Выбираем эффективную массу электрона $M_{\text{eff}} = 0,067M_e$, характеризующую движение в арсениде галлия GaAs, где M_e – масса электрона в вакууме [4]. При выборе $\rho_o = 30$ нм имеют место следующие соответствия между безразмерными и размерными величинами: $a = 1 \rightarrow 18,9579$ мэВ нм, $e = 1 \rightarrow E = 0,631933$ мэВ.

На рис. 1–4 в безразмерном виде представлена зависимость невозмущенной энергии e_0 и относительной поправки δ/e_0 от суммарной интенсивности спин-орбитальных взаимодействий a при двух значениях глубины потенциальной ямы $v = 50, 400$. Сплошные линии соответствуют первым уровням энергии, а штриховые – вторым уровням для трех значений углового момента ($m = 0, 1, 2$).

Очевидно, что полная поправка $\gamma\delta$ действительно мала по сравнению с невозмущенной энергией e_0 , когда параметр γ достаточно мал. Отличительной особенностью использованного приближения является равенство нулю поправки при $m = 0$.

Таким образом, в рамках теории возмущений дано описание электронных состояний в полупроводниковых круговых квантовых точках в присутствии спин-орбитальных взаимодействий Рашбы и Дрессельхауза с реалистичным аксиально-симметричным удерживающим прямоугольным потенциалом конечной глубины.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф13К-079).

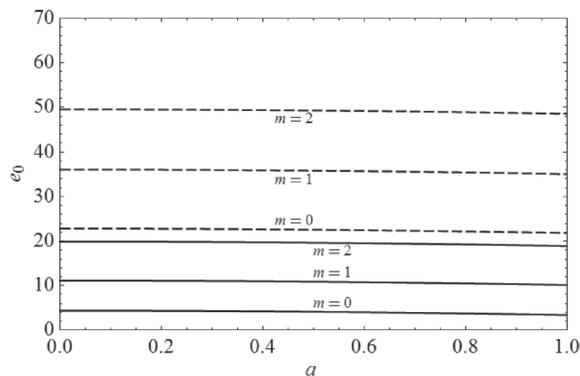


Рис. 1. Зависимость e_0 от a при $v = 50$

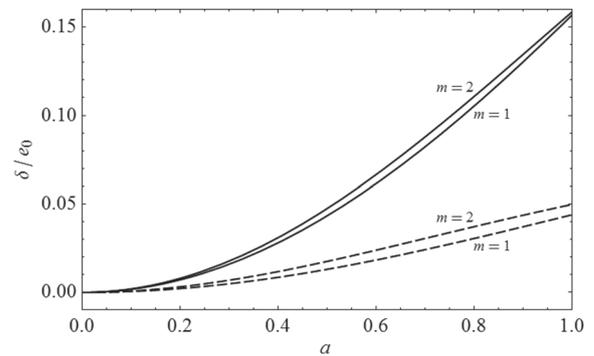


Рис. 2. Зависимость δ/e_0 от a при $v = 50$

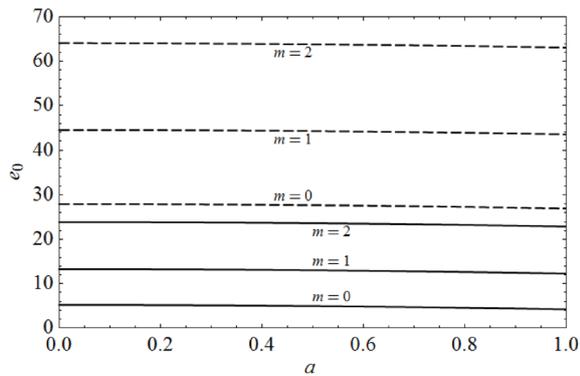


Рис. 3. Зависимость e_0 от a при $v = 400$

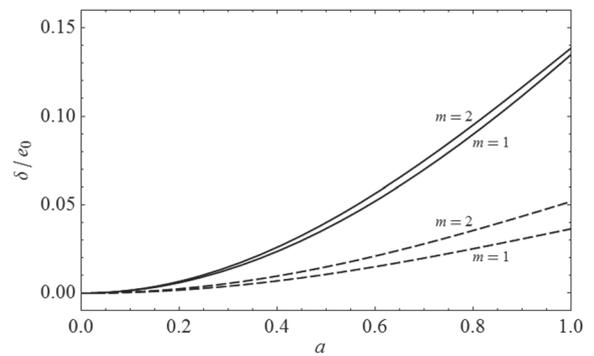


Рис. 4. Зависимость δ/e_0 от a при $v = 400$

Литература

1. *Valín-Rodríguez M., Puente A., Serra L.* // Eur. Phys. J. B. 2004. Vol. 39. P. 87–92.
2. *Li J., Chang K.* // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 82. 033304.
3. *Bulgakov E. N., Sadreev A. F.* // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 73. С. 573–577.
4. *Tsitsishvili E., Lozano G. S., Gogolin A. O.* // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 70. 115316.
5. *de Sousa R., Das Sarma S.* // Phys. Rev. B. 2003. Vol. 68. 153330.
6. *Kuan W. H., Tang S. C., Xu W.* // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 95. P. 6368–6373.
7. *Kudryashov V. V.* // Foundations and Advances in Nonlinear Science. Proceedings of the 13th International Conference and School. Minsk, 2006. P. 125–130; Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2009. Vol. 12. P. 199–203.
8. *Chaplik A. V., Magarill L. I.* // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 96. 126402.
9. *Рауба Э. И.* // ФТТ. 1960. Т. 2. С. 1224–1238.
10. *Dresselhaus G.* // Phys. Rev. 1955. Vol. 100. P. 580–586.
11. *Meier L.* et al. // Nature Physics. 2007. Vol. 3. P. 650–654.
12. *Schliemann J., Egues J. C., Loss D.* // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 90. 146801.
13. *Bernevig B. A., Orenstein J., Zhang S. C.* // Phys. Rev. Lett. 2006. Vol. 97. 236601.
14. *Кудряшов В. В., Баран А. В.* // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 2011. № 4. С. 67–70.
15. *Абрамовиц М., Стиган И.* Справочник по специальным функциям. М., 1979.

V. V. KUDRYASHOV, A. V. BARAN

kudryash@dragon.bas-net.by, a.baran@dragon.bas-net.by

SPIN-ORBIT INTERACTIONS IN SEMICONDUCTOR CIRCULAR QUANTUM DOTS

Summary

Within the framework of perturbation theory the energy levels and wave functions are found for an electron in two-dimensional semiconductor circular quantum dots in the presence of the Rashba and Dresselhaus spin-orbit interactions with realistic axially symmetric confining square potential of finite depth.

УДК 530.1

Академик А. М. ГОНЧАРЕНКО

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ
В ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ СЕЛФОКАХ**

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск

Поступило 05.11.2014

Свойства световых пучков как обычных, так и вращающихся сейчас достаточно подробно исследованы (см., напр., [1–15]). В последние годы активно изучаются так называемые отрицательные среды [16; 17]. В данном сообщении рассмотрены особенности распространения вращающихся световых пучков в отрицательных селфоках.

Постоянная распространения для таких сред может быть представлена в виде

$$k = -\sigma + \alpha(x^2 + y^2),$$

где $k < 0, \sigma, \alpha > 0$. Параболическое уравнение, определяющее распространение световых пучков вида $u = \psi(x, y, z) \exp(i\omega t + i\sigma z)$, есть

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + 2i\sigma \frac{\partial \psi}{\partial z} - 2\sigma\alpha_0(x^2 + y^2)\psi = 0.$$

В системе координат $x' = x\sqrt{2\sigma}, y' = y\sqrt{2\sigma}$ получаем (штрихи далее опускаем)

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y'^2} + i \frac{\partial \psi}{\partial z} - \alpha_0(x'^2 + y'^2)\psi = 0. \tag{1}$$

Здесь $\alpha_0 = \alpha / 2\sigma$. Ищем решение этого уравнения в виде следующего вращающегося гауссова пучка

$$\psi = \exp\left(i\gamma_1 - \gamma_2 - \frac{x^2}{x_0^2 f} + i \frac{x^2}{x_0^2 g} - \frac{y^2}{y_0^2 h} + i \frac{y^2}{y_0^2 l} - \frac{ixy}{x_0 y_0} + i \frac{vxy}{x_0 y_0} \right). \tag{2}$$

Здесь $\gamma_1, \gamma_2, f, g, h, l, u, v$ – функции продольной координаты z .

Подставляя (2) в уравнение (1) и предполагая медленное вращение светового пучка, при котором можем пренебречь функциями u^2, v^2, uv , получаем следующую систему:

$$\frac{2}{x_0^2 f} + \frac{2}{y_0^2 h} + \gamma'_1 = 0, \quad \frac{2}{x_0^2 g} + \frac{2}{y_0^2 l} - \gamma'_2 = 0; \tag{3}$$

$$\frac{4}{x_0^4 f^2} - \frac{4}{x_0^4 g^2} + \frac{g'}{x_0^2 g^2} - \alpha_0 = 0, \quad \frac{f'}{f} = \frac{8}{x_0^2 g}; \tag{4}$$

$$\frac{4}{y_0^4 h^2} - \frac{4}{y_0^4 l^2} + \frac{l'}{y_0^2 l^2} - \alpha_0 = 0, \quad \frac{h'}{h} = \frac{8}{y_0^2 l};$$

$$Du - Cv = v', \quad Cu + Dv = -u'. \tag{5}$$

Здесь штрих означает производную по z и введены обозначения

$$D = \frac{4}{x_0^2 f} + \frac{4}{y_0^2 h}, \quad C = \frac{4}{x_0^2 g} + \frac{4}{y_0^2 l}.$$

Определим решение уравнений (4). Из них следует уравнение

$$2f''f = f'^2 - \delta_1^2 f^2 + \delta_{21}^2, \quad (6)$$

где $\delta_1^2 = 16\alpha_0$, $\delta_{21}^2 = 64/x_0^4$. Решение уравнения (6) есть функция [18]

$$f = a + b \cos(\delta_1 z). \quad (7)$$

При этом $f(0) = f_0 = a + b$, а коэффициенты a, b равны соответственно

$$a, b = \frac{1}{2} f_0 \pm \frac{\delta_{21}^2}{2f_0 \delta_1^2}.$$

Функция $g(z)$ определяется равенством

$$\frac{1}{g} = -\frac{x_0^2 b \delta_1}{8f} \frac{\sin(\delta_1 z)}{a + b \cos(\delta_1 z)}. \quad (8)$$

Для функций $h(z)$ и $l(z)$ получаем выражения, аналогичные (7) и (8).

Из уравнений (3) приближенно находим

$$\gamma_1 = -\frac{1}{2} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{1}{2} \frac{\delta_{21}}{f_0} z \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{2} \frac{\delta_{22}}{h_0} z \right) \right],$$

$$\gamma_2 = 1/4 \ln \{ [a + b \cos(\delta_1 z)] [A + B \cos(\delta_1 z)] \}.$$

Наконец из уравнений (5) следует дифференциальное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами

$$u'' - \varphi_1 u' + \varphi_2 u = 0, \quad (9)$$

где $\varphi_1(z) = \frac{D^1}{D} - 2C$, $\varphi_2(z) = D^2 + C^2 + \frac{C'D - D'C}{D}$.

Предполагая небольшие колебания поперечных размеров светового пучка, функции φ_1, φ_2 приближенно можно полагать постоянными. В таком случае детерминант уравнения (9) $\varphi_1^2 - 4\varphi_2 < 0$ и его решение может быть представлено в виде [19]

$$u = u_0 \exp(-Cz) \left(\cos Dz - \frac{C}{D} \sin Dz \right).$$

При этом

$$v = u_0 \exp(-Cz) \left(\sin Dz - \frac{C}{D} \cos Dz \right).$$

Таким образом, нами найдены все функции, определяющие особенности свойств вращающихся световых пучков в отрицательных неоднородных средах типа селфоков. Из них следует, что пространственная форма пучка определяется функциями γ_2, f, h, u , которые аналогичны соответствующим функциям обычных сред [20]. Фазовая же поверхность светового пучка определяется уравнением

$$\omega t + \sigma z + \frac{x^2}{x_0^2 g} + \frac{y^2}{y_0^2 l} + \gamma_1 + \frac{vxy}{x_0 y_0} = \text{const}$$

и распространяется в направлении $(-z)$, обратном направлению распространения энергии со скоростью $v_z = \frac{dz}{dt} = -\frac{\omega}{\sigma}$. При этом осциллирующая форма пучка и его фазовая поверхность враща-

ются, направление вращения которых определяется функциями u, v . При $z = 0$ форма светового пучка и его ориентация представляется эллипсом

$$\frac{x^2}{x_0^2 f_0} + \frac{y^2}{y_0^2 h_0} - \frac{u_0 xy}{x_0 y_0} = \text{const},$$

а фазовая поверхность имеет главную ориентацию ($v = 0$).

Литература

1. Гончаренко А. М. Гауссовы пучки света. М., 2005.
2. Маркузе Д. Оптические волноводы. М., 1974.
3. Kogelnic H., Li T. // Proc. IEEE. 1966. Vol. 54. P. 1312–1329.
4. Garter W. H. // JOSA. 1972. Vol. 62. P. 1195–1201.
5. Гончаренко А. М. // Весці АН БССР, сер. фіз.-мат. навук. 1974. № 4. С. 82–86.
6. Гончаренко А. М., Белоусова Л. А. // ЖПС. 1976. Т. 24. С. 981–985.
7. Arnaud J. A. // Appl. Opt. 1972. Vol. 11. P. 2514–2521.
8. Arnaud J. A., Kogelnic H. // Appl. Opt. 1964. Vol. 8. P. 1687–1683.
9. Гончаренко А. М. // Докл. АН Беларуси. 1974. Т. 18. С. 122–123.
10. Гончаренко А. М., Гончаренко Л. К. // Весці АН БССР, сер. фіз.-мат. навук. 1975. Т. 6. С. 53–55.
11. Гончаренко А. М. // Докл. АН Беларуси. 1975. Т. 19, № 12. С. 1067–1070.
12. Белоусова Л. А., Борисов В. И., Гончаренко А. М. // ЖПС. 1978. Т. 29, № 2. С. 350–352.
13. Гончаренко А. М., Белоусова Л. А., Борисов В. И. // ЖПС. 1982. Т. 36, № 6. С. 1021–1022.
14. Гончаренко А. М., Шаповалов П. С. // Докл. АН Беларуси. 1988. Т. 39, № 12. С. 1073–1076.
15. Гончаренко А. М. // ЖПС. 2013. Т. 80, № 6. С. 255–258.
16. Веселаго В. Г. // УФН. 1967. Т. 92, № 3. С. 517–526.
17. Шевченко В. В. // УФН. 2011. Т. 181, № 11. С. 1171–1182.
18. Гончаренко А. М. // Весці НАН Беларусі, сер. фіз.-мат. навук. 2008. № 4. С. 120.
19. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М., 1970.
20. Гончаренко А. М. // Весці НАН Беларусі, сер. фіз.-мат. навук. 2012. № 2. С. 127–129.

A. M. GONCHARENKO

a.goncharenko@ifanbel.bas-net.by

PROPAGATION OF ROTARY LIGHT BEAMS IN NEGATIVE SELFOCS

Summary

The properties of rotary light beams in the negative selffocs are considered.

УДК 530.12

Е. А. ТОЛКАЧЕВ

**ДВОЙНАЯ ДУАЛЬНОСТЬ УРАВНЕНИЙ БОРНА–ИНФЕЛЬДА
И НЕЛИНЕЙНЫЙ ЛАГРАНЖИАН КЭД**

(Представлено членом-корреспондентом Л. М. Томильчиком)

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск

Поступило 24.11.2014

Введение. Как известно, уравнения нелинейной электродинамики Борна–Инфельда (Б–И) [1] инвариантны относительно дуальных преобразований из группы $U(1) \sim SO(2)$, смешивающих напряженности и эффективные индукции электрических и магнитных полей. В [2] без обращения к лагранжеву формализму было показано, что не существует других однопараметрических дуально и лоренц-ковариантных обобщений свободных уравнений Максвелла в предположении дуальной инвариантности параметра, обезразмеривающего поля. По-видимому, ученики Гейзенберга – Эйлер и Кокель были первыми, кто заметил, что лагранжиан Б–И при малых значениях свободного параметра качественно воспроизводит структуру эффективного лагранжиана, описывающего рассеяние света на свете в рамках полуфеноменологической квантовой электродинамики (КЭД). Историю этого вопроса и соответствующие ссылки можно найти в [3]. С. И. Кругловым было показано [4], что точное воспроизведение нелинейного лагранжиана в пределе слабых внешних полей достигается в рамках двухпараметрического обобщения теории Б–И, которое, однако, дуально неинвариантно. В то же время вакуумные корреляционные функции КЭД в пространстве Минковского, как и соответствующий тензор энергии-импульса, дуально инвариантны (см., напр., [5]), что коррелирует с ранним доказательством дуальной инвариантности КЭД [6]. Кроме того, еще в прошлом веке было продемонстрировано, что упомянутый выше эффективный КЭД-лагранжиан легко переписывается в явно дуально инвариантном виде [7].

В настоящей работе будет показано, что произвольные нелинейные лоренц-ковариантные обобщения электродинамики Максвелла дуально инвариантны в каноническом смысле [8], когда наряду с полями преобразуются параметры моделей, в КЭД – они пропорциональны заряду электрона. Будут найдены в явном виде трансформационные свойства лагранжианов типа Б–И относительно двух видов дуальных преобразований.

Теоретическая часть. При описании дуальной симметрии удобно использовать алгебру комплексных кватернионов – бикватернионов [9] с законом умножения в векторной форме

$$qp = q_0 p_0 - (\underline{q} \underline{p}) + q_0 \underline{p} + p_0 \underline{q} + [\underline{q} \underline{p}], \tag{1}$$

где q и p – бикватернионы, любой из которых представим в виде

$$q = q_0 + \underline{q} = q_s + q_v,$$

$(\underline{q} \underline{p}) = \delta_{ab} q_a p_b$, $[\underline{q} \underline{p}]$ – векторный бикватернион с компонентами $\varepsilon_{abc} q_b p_c$, $a, b, c = 1, 2, 3$. Для бикватернионов определены операции комплексного $q^* = q_0^* - \underline{q}^*$ и кватернионного сопряжений $\bar{q} = q_0 - \underline{q}$, используя которые всегда можно выделить реальные и мнимые, скалярные и векторные части произвольного бикватерниона. Первое из сопряжений – автоморфизм, второе – анти-автоморфизм алгебры бикватернионов $pq = \bar{q} \bar{p}$.

Уравнения Максвелла в бикватернионах записываются в виде

$$\nabla \underline{F}(A) = Q_n J^n = \text{sign}(Q_n) |Q_n| J^n, \tag{2}$$

где умножение осуществляется согласно (1), по повторяющимся индексам $n = 1, 2, \dots$ проводится суммирование; $\nabla = -i \frac{\partial}{\partial t} + \underline{\nabla}$ – дифференциальный оператор; $\underline{F} = \underline{B} - i\underline{E} = -(\underline{\nabla} \underline{A})_V$ – векторный бикватернион напряженностей, выраженных через потенциал $A = -\bar{A}^* = iA_0 + \underline{A}$; Q_n – действительные электрические заряды; $\text{sign} Q_n = e^{i0} (Q_n > 0)$; $e^{i\pi} (Q_n < 0)$, $J^n = -\bar{J}^{n*}$ – плотность тока.

Дуальные преобразования уравнений электродинамики Максвелла можно рассматривать как обобщение стандартной операции классической C -инверсии – умножения левой и правой части (2) на $e^{i\pi}$, осуществляемое путем замены $e^{i\pi} \rightarrow e^{i\theta}$. Это коррелирует с известной необходимостью переопределения операций отражений пространственных координат $P \rightarrow e^{i\theta} P e^{-i\theta}$ и времени $T \rightarrow e^{i\theta} T e^{-i\theta}$ при описании уравнений Максвелла–Лоренца в терминах двух зарядов [8; 9]. Отметим, что в этом контексте принцип дуальной инвариантности наблюдаемых [8] выглядит как обобщение C -симметрии уравнений электродинамики.

Дуальные преобразования трактуются как замена действительных электрических зарядов комплексными – $Q_n \rightarrow Q_n e^{i\theta} \equiv \mathbf{q}_n = \mathbf{e}_n + i\mathbf{g}_n$, сопровождаемая соответствующим переопределением полей и потенциалов $\underline{F} e^{i\theta}$, $A e^{i\theta} = A + iB$, $-\bar{A}^* = A$, $-\bar{B}^* = B$, не затрагивающим их координатной зависимости. Дуально инвариантный лагранжиан в терминах двух зарядов и потенциалов удастся построить только в случае постоянства отношения $\mathbf{g}_n / \mathbf{e}_n \equiv \mathbf{g}_0 / \mathbf{e}_0$, т. е. при $\mathbf{e}_n \mathbf{g}_m - \mathbf{e}_m \mathbf{g}_n = 0$, где фундаментальный электрический заряд $Q_0 (\text{sign} Q_0 > 0) \rightarrow \mathbf{q}_0 = \mathbf{e}_0 + i\mathbf{g}_0$ [8; 9]. При этом основной идеей [10] является представление лагранжиана в терминах дуально инвариантных полей и потенциалов

$$\mathbf{L} = \text{Re} \left[\frac{1}{8\pi} \underline{\mathbf{F}}^2 + \text{sign} Q_n |\mathbf{q}_n| (J^n \bar{\mathbf{A}})_S \right], \quad (3)$$

где

$$\underline{\mathbf{F}} = \underline{\mathbf{B}} - i\underline{\mathbf{E}} \equiv \frac{\mathbf{q}_0^*}{|\mathbf{q}_0|} \underline{F}, \quad \mathbf{A} \equiv \frac{\mathbf{q}_0^*}{|\mathbf{q}_0|} (A + iB), \quad \underline{\mathbf{F}} = -(\underline{\nabla} \bar{\mathbf{A}})_V,$$

и выполняется условие $\mathbf{A} = -\bar{\mathbf{A}}^*$, что эквивалентно $\mathbf{g}_0 A - \mathbf{e}_0 B = 0$ [9]. Дуальную инвариантность начальной фазы зарядов – $\text{sign} Q_n$ демонстрирует следующая цепочка рассуждений

$$Q_n = \text{sign} Q_n |Q_n| = Q_n^* = |Q_n| \frac{Q_n^*}{|Q_n|} \rightarrow \left[\frac{\mathbf{q}_n^*}{|\mathbf{q}_n|} \frac{\mathbf{q}_0}{|\mathbf{q}_0|} = \text{dual inv} = \text{sign} Q_n \right] |\mathbf{q}_n| \frac{\mathbf{q}_0^*}{|\mathbf{q}_0|}.$$

В традиционных обозначениях лагранжиан (3) имеет вид

$$\mathbf{L} = \frac{1}{8\pi} \{ (\underline{E}^2 - \underline{B}^2) \cos 2\vartheta_0 + 2(\underline{B}\underline{E}) \sin 2\vartheta_0 + \text{sign} Q_n \sqrt{\mathbf{e}_n^2 + \mathbf{g}_n^2} J_\mu^n (A_\mu \cos \vartheta_0 + B_\mu \sin \vartheta_0) \}, \quad (4)$$

где $\cos \vartheta_0 = \frac{\mathbf{e}_0}{\sqrt{\mathbf{e}_0^2 + \mathbf{g}_0^2}}$, $\sin \vartheta_0 = \frac{\mathbf{g}_0}{\sqrt{\mathbf{e}_0^2 + \mathbf{g}_0^2}}$, $\frac{\mathbf{e}_0^2 - \mathbf{g}_0^2}{\mathbf{e}_0^2 + \mathbf{g}_0^2} = \cos 2\vartheta_0$, $\frac{2\mathbf{e}_0 \mathbf{g}_0}{\mathbf{e}_0^2 + \mathbf{g}_0^2} = \sin 2\vartheta_0$, а средний член,

пропорциональный $F_{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu}$, не является дивергенцией, поскольку полевой тензор выражается через два потенциала $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu + \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \partial_\rho B_\sigma$. Для дальнейшего существенно, что даже в линейном случае полевая часть дуально инвариантного лагранжиана зависит от компенсирующего параметра.

Покажем теперь, что совершенно аналогичным образом строится дуально инвариантное выражение для лагранжиана электродинамики типа Б–И [4], который запишем в форме [11], удобной для сравнения с (3), (4) и нелинейным лагранжианом однозарядовой КЭД во внешнем поле [12]

$$\mathbf{L}_{B-IK} = \frac{E_c^2}{4\pi\lambda_1^2} \left[1 - \sqrt{1 - \lambda_1^2 \frac{\underline{E}^2 - \underline{B}^2}{E_c^2} - \lambda_1^2 \lambda_2^2 \frac{(\underline{B}\underline{E})^2}{E_c^4}} \right], \quad (5)$$

где $E_c = B_c = \frac{m^2 c^3}{e_0 \hbar}$ – критические величины электрического и магнитного полей; $\lambda_{1,2}$ – действительные безразмерные параметры [4]. Предположим теперь, что все величины в (5) – дуальные

инварианты. Очевидно, это влечет за собой комплексификацию свободных параметров. По аналогии с линейным случаем можно произвести замену $e_0 \rightarrow |\mathbf{q}_0|e^{i\vartheta_0}$ в выражении для критических полей, тогда имеем

$$\mathbf{L}_{B-IK} = \frac{\mathbf{E}_c^2}{4\pi\lambda_1^2} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{\lambda_1^2}{\mathbf{E}_c^2} \text{Re}(\underline{\mathbf{F}})^2 - \frac{\lambda_1^2\lambda_2^2}{4\mathbf{E}_c^4} [\text{Im}(\underline{\mathbf{F}})^2]^2} \right\} =$$

$$\frac{\mathbf{E}_c^2}{4\pi\lambda_1^2} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{\lambda_1^2}{\mathbf{E}_c^2} \text{Re}(e^{-i\vartheta_0} \underline{F})^2 - \frac{\lambda_1^2\lambda_2^2}{4\mathbf{E}_c^4} [\text{Im}(e^{-i\vartheta_0} \underline{F})^2]^2} \right\}, \quad (6)$$

где $\mathbf{B}_c = \mathbf{E}_c = \frac{m^2 c^3}{\hbar |\mathbf{q}_0|}$. Дуально инвариантный лагранжиан (6) в векторных обозначениях приобретает вид

$$\mathbf{L}_{B-IK} = \frac{\mathbf{E}_c^2}{4\pi\lambda_1^2} \left\{ 1 - \left\{ 1 - \frac{\lambda_1^2}{\mathbf{E}_c^2} [(E^2 - B^2) \cos 2\vartheta_0 + 2(BE) \sin 2\vartheta_0] - \frac{\lambda_1^2\lambda_2^2}{2\mathbf{E}_c^4} [2(BE) \cos 2\vartheta_0 - (E^2 - B^2) \sin 2\vartheta_0]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (7)$$

Очевидно, что разложение в (6), (7) ряд по малому параметру $\frac{\lambda_1^2}{\mathbf{E}_c^2}$ воспроизводит полевую часть лагранжианов (3), (4) и при соответствующем выборе [4] констант $\lambda_{1,2}$ – нелинейную часть лагранжиана КЭД в случае слабых внешних полей ($E/\mathbf{E}_c \ll 1$, $B/\mathbf{B}_c \ll 1$) [11; 12]

$$\mathbf{L}_{H-E} = \mathbf{L}_0 + \mathbf{L}_1 + \dots = \frac{1}{8\pi} (\underline{\mathbf{E}}^2 - \underline{\mathbf{B}}^2) + \frac{1}{360\pi^2 \mathbf{E}_c^2} [(\underline{\mathbf{E}}^2 - \underline{\mathbf{B}}^2)^2 + 7(\underline{\mathbf{B}}\underline{\mathbf{E}})^2] + \dots \quad (8)$$

При заменах дуально инвариантных напряженностей

$$\underline{\mathbf{E}}^2 - \underline{\mathbf{B}}^2 \rightarrow (E^2 - B^2) \cos 2\vartheta_0 + 2(BE) \sin 2\vartheta_0, \quad (\underline{\mathbf{B}}\underline{\mathbf{E}}) \rightarrow (BE) \cos 2\vartheta_0 - \frac{1}{2}(E^2 - B^2) \sin 2\vartheta_0, \quad (9)$$

где угол ϑ_0 определен выше, второй член в (8) совпадает с выражением, впервые полученным в [7].

Второй вариант комплексификации параметров в (5) – $\lambda_{1,2} \rightarrow |\lambda_{1,2}|e^{-i\vartheta_0}$ приводит к появлению в (6), (7) соответствующих модулей, при сохранении определений критических полей. Так, строится дуально инвариантное обобщение исходного лагранжиана Б–И

$$\mathbf{L}_{B-I} = \frac{1}{|\chi|^2} \left[1 - \sqrt{1 - |\chi|^2 (\underline{\mathbf{E}}^2 - \underline{\mathbf{B}}^2) - |\chi|^4 (\underline{\mathbf{B}}\underline{\mathbf{E}})^2} \right] =$$

$$\frac{1}{|\chi|^2} \left[1 - \sqrt{1 - |\chi|^2 \text{Re}[(e^{-i\vartheta_\chi} \underline{F})^2] - |\chi|^4 [\text{Im}(e^{-i\vartheta_\chi} \underline{F})^2]^2} \right], \quad (10)$$

где \underline{F} при желании можно трактовать и как бикватернион, и как комплексный вектор Римана–Зильберштейна $\bar{B} - i\bar{E}$. При дуальных преобразованиях $\vartheta_\chi \rightarrow \vartheta_\chi + \vartheta$. Из первой строки (10) следует, что полевые уравнения и уравнения связи, выраженные в дуально инвариантных полях, будут иметь стандартный алгебраический вид [2]

$$\nabla[(\underline{\mathbf{B}} - i\underline{\mathbf{E}}) + (\underline{\mathbf{H}} - i\underline{\mathbf{D}})] + \overline{\{\nabla[(\underline{\mathbf{B}} - i\underline{\mathbf{E}}) - (\underline{\mathbf{H}} - i\underline{\mathbf{D}})]\}^*} = 0,$$

$$\underline{\mathbf{H}} - i\underline{\mathbf{D}} = \frac{1 - i|\chi|^2 (\underline{\mathbf{B}}\underline{\mathbf{E}})}{\sqrt{1 + |\chi|^2 (\underline{\mathbf{B}}^2 - \underline{\mathbf{E}}^2) - |\chi|^4 (\underline{\mathbf{B}}\underline{\mathbf{E}})^2}} (\underline{\mathbf{B}} - i\underline{\mathbf{E}}). \quad (11)$$

Полагая, что $\underline{\mathbf{H}} - i\underline{\mathbf{D}} = (\underline{H} - i\underline{D})e^{-i\vartheta_\chi}$, и используя (9) при $\vartheta_0 \rightarrow \vartheta_\chi$, имеем

$$\underline{H} - i\underline{D} = \frac{\{1 - i|\chi|^2 [(\underline{BE}) \cos 2\vartheta_\chi - \frac{1}{2}(\underline{E}^2 - \underline{B}^2) \sin 2\vartheta_\chi]\}(\underline{B} - i\underline{E})}{\sqrt{1 + |\chi|^2 [(\underline{E}^2 - \underline{B}^2) \cos 2\vartheta_\chi + 2(\underline{BE}) \sin 2\vartheta_\chi] - |\chi|^4 [(\underline{BE}) \cos 2\vartheta_\chi - \frac{1}{2}(\underline{E}^2 - \underline{B}^2) \sin 2\vartheta_\chi]^2}}.$$

Этот прием применим ко всем лоренц-ковариантным нелинейным обобщениям электродинамики, лагранжианы которых строятся из лоренц-инвариантов $(\underline{E}^2 - \underline{B}^2)$, (\underline{BE}) и параметров, обеспечивающих необходимую размерность. Например, недавно автором [13] был переоткрыт логарифмический лагранжиан, судя по утверждению в [11], введенный еще Шредингером, $L = \beta^2 \ln[1 + \beta^{-2}(\underline{E}^2 - \underline{B}^2)]$, и предложен экспоненциальный лагранжиан $L = \beta^2 \exp[\beta^{-2}(\underline{E}^2 - \underline{B}^2) - 1]$. Очевидно, что они являются частными случаями дуально инвариантных лагранжианов, соответственно, $L = |\beta|^2 \ln[1 + |\beta|^{-2}(\underline{E}^2 - \underline{B}^2)]$ и $L = |\beta|^2 \exp[|\beta|^{-2}(\underline{E}^2 - \underline{B}^2) - 1]$.

Рассмотренные выше дуальные преобразования смешивают напряженности полей, а не напряженности с индукциями, как это происходит в случае общеизвестных дуальных преобразований уравнений Б-И, не затрагивающих свободного параметра модели. Несмотря на огромное количество работ по исследованию этой дуальности, все еще остаются неизвестными трансформационные свойства лагранжиана Б-И при конечных дуальных преобразованиях этого типа. Эта задача фактически была решена в [2], где удалось показать обратимость дуально инвариантной формы уравнений Б-И. Однако в явном виде преобразования лагранжиана не были приведены. Сделаем это сейчас.

Итак, рассмотрим теперь дуальные преобразования вида

$$(\underline{B} - i\underline{D}) \rightarrow (\underline{B} - i\underline{D}) \exp(i\theta), \quad (\underline{H} - i\underline{E}) \rightarrow (\underline{H} - i\underline{E}) \exp(i\theta). \quad (12)$$

Напомним, что дуальные преобразования, затрагивающие параметры, определялись над парами векторных бикватернионов $(\underline{B} - i\underline{E})$ и $(\underline{H} - i\underline{D})$, имеющих определенные свойства относительно действия группы Лоренца, задаваемого с помощью бикватернионов единичной нормы $L\bar{L} = 1$

$$(\underline{B} - i\underline{E}) \rightarrow L^* (\underline{B} - i\underline{E}) \bar{L}^*, \quad (\underline{H} - i\underline{D}) \rightarrow L^* (\underline{H} - i\underline{D}) \bar{L}^*.$$

Именно в терминах этих бикватернионов первое из уравнений (11) превращается в систему

$$\begin{aligned} \nabla(\underline{B} - i\underline{E}) + \overline{\{\nabla(\underline{B} - i\underline{E})\}^*} &= 0, \\ \nabla(\underline{H} - i\underline{D}) - \overline{\{\nabla(\underline{H} - i\underline{D})\}^*} &= 0, \end{aligned}$$

которая может быть получена из двух лагранжианов, в зависимости от того, как определяется потенциал

$$\underline{B} - i\underline{E} = -\{\bar{\nabla}A\}_V \quad \text{либо} \quad \underline{H} - i\underline{D} = -i\{\bar{\nabla}B\}_V.$$

Соответственно, имеем $L_{B-I}(A) = \chi^{-2}(1-l)$ и $L_{B-Id}(B) = \chi^{-2}(1-l_d)$, где

$$l = \sqrt{1 + \chi^2(\underline{B}^2 - \underline{E}^2) - \chi^4(\underline{BE})^2}, \quad l_d = \sqrt{1 + \chi^2(\underline{D}^2 - \underline{H}^2) - \chi^4(\underline{DH})^2}. \quad (13)$$

Эти лагранжианы рассматривались, например, в работе [14], где предложен дуально инвариантный лагранжиан $L + L_d$, который, однако, не удовлетворяет принципу соответствия, так как в максвелловском пределе $\chi^2 \rightarrow 0$, обращается в тождественный ноль. Правильный предел имеет двухпотенциальный лагранжиан

$$\mathcal{L}_{B-I} = \frac{1}{2}[L_{B-I}(A) - L_{B-Id}(B)],$$

очевидно не являющийся дуальным инвариантом.

Выясним теперь трансформационные свойства лагранжианов $L(A)$, $L_d(B)$, \mathcal{L} относительно конечных дуальных преобразований. Для этого достаточно напомнить [2], что лоренц-инварианты (13) связаны с дуальными инвариантами

$$h = \sqrt{1 + \chi^2(\underline{B}^2 + \underline{D}^2) + \chi^4[\underline{BD}]^2} \quad \text{и} \quad \tilde{h} = \sqrt{1 - \chi^2(\underline{H}^2 + \underline{E}^2) + \chi^4[\underline{HE}]^2} \quad (14)$$

соотношениями

$$h = l + \chi^2(\underline{DE}) = l_d + \chi^2(\underline{BH}) = 1/2\{l + l_d + \chi^2[(\underline{DE}) + (\underline{BH})]\}, \quad (15)$$

$$\tilde{h} = l - \chi^2(\underline{BH}) = l_d - \chi^2(\underline{DE}) = 1/2\{l + l_d - \chi^2[(\underline{DE}) + (\underline{BH})]\}, \quad (16)$$

$$h + \tilde{h} = l + l_d.$$

Складывая левые и правые части формул (15), (16), имеем $h + \tilde{h} = 2l + \chi^2[(\underline{DE}) - (\underline{BH})]$, где в левой части формулы стоит сумма дуальных инвариантов. Следовательно, при дуальных преобразованиях, обозначаемых ниже штрихом, сохраняется выражение

$$2l' + \chi^2[(\underline{DE}) - (\underline{BH})]' = 2l + \chi^2[(\underline{DE}) - (\underline{BH})].$$

Отсюда с учетом того, что реальная часть скалярной компоненты произведения $(\underline{B} - i\underline{D})(\underline{H} - i\underline{E})$ преобразуется по закону

$$\begin{aligned} [(\underline{DE}) - (\underline{BH})]' &= \text{Re}\{(\underline{B} - i\underline{D})(\underline{H} - i\underline{E})\exp(2i\theta)\}_s = \\ &[(\underline{DE}) - (\underline{BH})]\cos 2\theta - [(\underline{BE}) + (\underline{DH})]\sin 2\theta, \end{aligned}$$

а также формул (14)–(16) и равенства $(\underline{BE}) = (\underline{DH})$, следующего из уравнений связи электродинамики Б–И, находим

$$\begin{aligned} l' &= \frac{1}{2}l(1 + \cos 2\theta) + \frac{1}{2}l_d(1 - \cos 2\theta) + \chi^2(\underline{BE})\sin 2\theta = \\ &\frac{1}{2}[(l + l_d) + (l - l_d)\cos 2\theta + 2\chi^2(\underline{BE})\sin 2\theta], \\ l'_d &= \frac{1}{2}l(1 - \cos 2\theta) + \frac{1}{2}l_d(1 + \cos 2\theta) - \chi^2(\underline{BE})\sin 2\theta = \\ &\frac{1}{2}[(l + l_d) - (l - l_d)\cos 2\theta - 2\chi^2(\underline{BE})\sin 2\theta]. \end{aligned}$$

Откуда следуют формулы преобразования функций Лагранжа электродинамики Б–И

$$\begin{aligned} L'_{B-I} &= \frac{1}{2}[(L_{B-I} + L_{B-Id}) + (L_{B-I} - L_{B-Id})\cos 2\theta - 2(\underline{BE})\sin 2\theta], \\ L'_{B-Id} &= \frac{1}{2}[(L_{B-I} + L_{B-Id}) - (L_{B-I} - L_{B-Id})\cos 2\theta + 2(\underline{BE})\sin 2\theta], \end{aligned} \quad (17)$$

где $(L_{B-I} + L_{B-Id})$ – одновременно лоренцевский и дуальный инвариант, последние члены в обеих формулах представляют собой четырехмерные дивергенции, в силу $(\underline{BE}) = (\underline{DH})$. На первый взгляд зависимость от угла дуального поворота должна остаться в уравнениях движения, однако, это не так. Чтобы убедиться в этом, достаточно, опуская несущественные для вывода лагранжевых уравнений дивергенции, переписать (17) в виде

$$L'_{B-I} = L_{B-I} \cos^2 \theta + L_{B-Id} \sin^2 \theta, \quad L'_{B-Id} = L_{B-I} \sin^2 \theta + L_{B-Id} \cos^2 \theta.$$

Поскольку L_{B-I} и L_{B-Id} зависят от разных потенциалов и варьируются независимо, то умножение каждого из них на константу не приводит к изменению уравнений Б–И. Более того, их разность (12) преобразуется по закону

$$\mathcal{L}'_{B-I} = \mathcal{L}_{B-I} \cos 2\theta - (\underline{BE})\sin 2\theta,$$

совпадающему с форм-инвариантным поведением при дуальных поворотах лагранжиана свободных уравнений Максвелла в вакууме [15], для которых выраженные в напряженностях дуальные лагранжианы связаны равенством $L_d = -L$, что дает из (17) $L' = L \cos 2\theta - (\underline{BE})\sin 2\theta$.

Заклучение. Заметим, что в [15] рассматривались свободные от источников уравнения Максвелла, которые следуют как из дуально инвариантного лагранжиана относительно дуальных преобразований первого типа, так и из форм-инвариантного лагранжиана относительно дуальных преобразований второго типа. Преобразования полей в обоих случаях совпадают. При включении источников форм-инвариантный лагранжиан не является пределом полного лагранжиана, описывающего уравнения Максвелла в дуально инвариантном представлении.

Делались неоднократные попытки включения зарядов двух типов в уравнения электродинамики Б–И. При этом дуальная симметрия либо не рассматривалась [16], либо рассматривалась [17] третий вариант, когда преобразования полей индукций производились по второму типу, а зарядов – по первому. В задачи данной работы не входило рассмотрение уравнений Б–И с источниками, поэтому анализ последовательности предлагаемых в [16], [17] лагранжианов и уравнений остается за ее рамками.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Ф13-146).

Литература

1. Born M., Infeld L. // Proc. R. Soc. London. 1934. Vol. A144. P. 425–451.
2. Толкачев Е. А. // Докл. НАН Беларуси. 2009. Т. 53, № 3. С. 53–59.
3. Gerald V. D. // arXiv: hep-th. 2012. 1202.1557 v1. P. 1–10.
4. Kruglov S. I. // arXiv: hep-th. 2009. 0909.1032v1. P. 1–10.
5. Gaete P., Helayel-Neto J. // arXiv: hep-th. 2014. 1408.3363 v1. P. 1–10.
6. Тевикян Р. В. // ЖЭТФ. 1966. Т. 51. С. 791–794.
7. Kovalevich S. G., Osland P., Shnir Ya. M., Tolkachev E. A. // Phys. Rev. 1997. Vol. D55, N 9. P. 5857–5862.
8. Стражев В. И., Томильчик Л. М. Электродинамика с магнитным зарядом. Минск, 1975.
9. Березин А. В., Курочкин Ю. А., Толкачев Е. А. Кватернионы в релятивистской физике. Минск, 1989.
10. Тевикян Р. В. // ЖЭТФ. 1966. Т. 50. С. 911–914.
11. Тернов И. М., Дорофеев О. Ф. // ЭЧАЯ. 1994. Т. 25, вып. 1. С. 1–89.
12. Heisenberg W., Euler H. // Zeit. f. Phys. 1936. Vol. 98. P. 714 (arXiv:physics/0605038).
13. Hendi S. H. // Ann. Phys. 2013. Vol. 333. P. 282 (arXiv: gr-qc. 2014. 1405.5359v1. P. 1–7).
14. Chernitskii A. A. // JHEP. 1999. Vol. 12010. P. 1–35.
15. Томильчик Л. М. // Весті АН БССР, сер. фіз.-мат. навук. 1977. № 4. С. 127–128.
16. Wolf C. // Physica Scripta. 1992. Vol. 46. P. 385–388.
17. Chruscinski D., Romer H. // arXiv: hep-th. 1998. 9805042. P. 1–11.

E. A. TOLKACHEV

tea@dragon.bas-net.by

DOUBLE DUALITY OF THE BORN–INFELD EQUATIONS AND NONLINEAR LAGRANGIAN OF QED

Summary

It is shown that arbitrary nonlinear Lorentz-covariant generalizations of Maxwell electrodynamics are dual invariant if, along with the fields, the model parameters are transformed, which in QED are proportional to the electron charge. The transformation properties of the Born–Infeld Lagrangians with respect to two types of dual transformations are found explicitly.

ХИМИЯ

УДК 547.792.4+544.15+544.18

Вадим Э. МАТУЛИС¹, Ю. В. ГРИГОРЬЕВ¹, А. Г. СУХАНОВА², Ю. В. ФИЛИППОВА²,
И. А. КРУПНОВА², академик О. А. ИВАШКЕВИЧ¹

**КВАНТОВОХИМИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
РЕАКЦИЙ НУКЛЕОФИЛЬНОГО ЗАМЕЩЕНИЯ В РЯДУ
N-АЛКИЛ-3-НИТРО-1,2,4-ТРИАЗОЛОВ**

¹Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ, Минск

²Институт проблем химико-энергетических технологий
Сибирского отделения РАН, Бийск

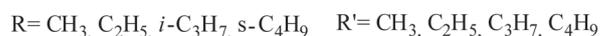
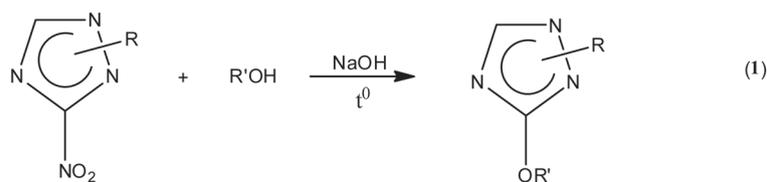
Поступило 17.11.2014

Благодаря широкому спектру биологической активности, производные 1,2,4-триазола находят достаточно широкое практическое применение, в частности, в медицине [1; 2], что делает исследования в области синтетической химии этого класса соединений весьма актуальной задачей. Одним из удобных методов функционализации 1,2,4-триазольного цикла по атому углерода цикла являются реакции нуклеофильного замещения, которые, благодаря своему большому синтетическому потенциалу, достаточно хорошо изучены и широко используются в органической химии, позволяя получать множество практически важных соединений [3]. Однако в ряду доступных N-замещенных 3-нитро-1,2,4-триазолов реакции S_N^{ipso}-замещения нитрогруппы мало изучены и ограничиваются лишь несколькими примерами [4–6].

Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию процессов нуклеофильного замещения нитрогруппы в ряду изомерных N-алкил-3-нитро-5-R-1,2,4-триазолов.

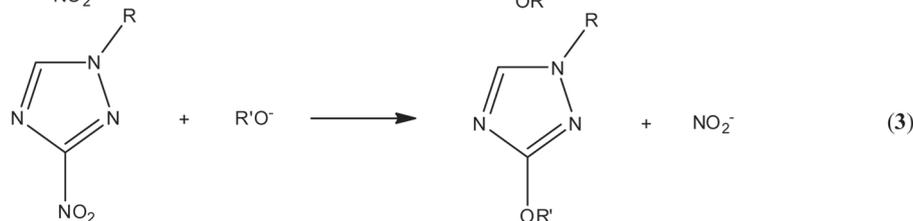
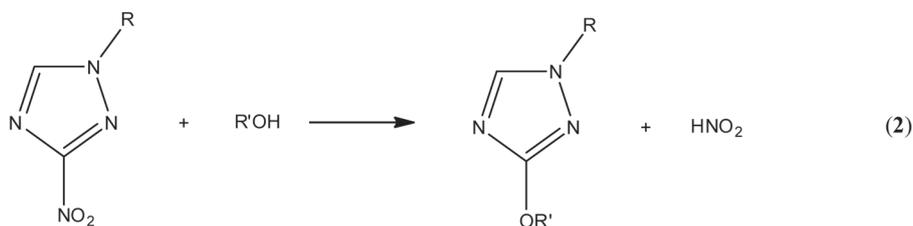
Квантовохимические расчеты выполнены с использованием программного пакета Gaussian-09 [7]. Стандартные энтальпии и энергии Гиббса реакций рассчитаны в рамках уровня теории B3LYP/6-311+G(d,p)//B3LYP/6-31G(d) [8]. Процедура расчета стандартных энтальпий ($\Delta_r H_{298}^0$) и энергий Гиббса ($\Delta_r G_{298}^0$) реакций данным методом описана в [9]. Для простейшего случая (R = H; R' = CH₃) термодинамические параметры реакций **2** и **3** были рассчитаны методом G3 [10]. В рамках данного метода оптимизация геометрии и расчет энергии нулевых колебаний выполняли с использованием RHF/6-31G(d) уровня теории. Затем производилась оптимизация геометрии с использованием уровня теории MP2(Full)/6-31G(d). При расчетах полной энергии эффект электронной корреляции учитывался в рамках метода MP4. Для исследования влияния реакционной среды на протекание реакций нуклеофильного замещения нитрогруппы были выполнены расчеты энергий частиц, помещенных в полярную среду. Учет влияния среды выполняли в рамках континуумной модели РСМ [11] со стандартными параметрами для воды. Для проведения расчетов использовали геометрии, оптимизированные для изолированных молекул. Стандартную энергию Гиббса молекул в растворе G_S определяли как сумму энергии Гиббса в газовой фазе G_{298}^0 и энергии сольватации $G_S = G_{298}^0 + \Delta_{\text{solv}}G$, где $\Delta_{\text{solv}}G$ – свободная энергия сольватации.

Экспериментально реакции нуклеофильного замещения проводили в избытке нуклеофильных реагентов, в качестве которых использовались метиловый, этиловый, *n*-пропиловый и *n*-бутиловый спирты с порционной дозировкой (по 9–10 мол. % от эквимолярного количества) гидроксида натрия.



Контроль процесса осуществляли по изменению pH реакционной смеси, а также методами газожидкостной хроматографии и ЯМР ^1H -спектроскопии до полного исчезновения исходного N-алкил-3-нитро-1,2,4-триазола.

С целью оценки термодинамической возможности протекания реакций замещения нитрогруппы в молекулах N-алкил-3-нитро-1,2,4-триазолов выполнены квантовохимические расчеты стандартных энтальпий и энергий Гиббса реакций нуклеофильного замещения нитрогруппы в молекулах 1-R-3-нитро-1,2,4-триазолов ($R = \text{H}, \text{CH}_3$ и C_2H_5) на метокси-, этокси- и фенокси-группы в газовой фазе и в водном растворе (схемы 2 и 3).



Расчетные значения энтальпий и энергий Гиббса реакций, представленных на схемах 2 и 3, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные значения стандартных энтальпий ($\Delta_r H_{298}^0$) и энергий Гиббса ($\Delta_r G_{298}^0$) в газовой фазе и в водном растворе ($\Delta_r G_s$) реакций, представленных на схемах 2 и 3 (кДж/моль)

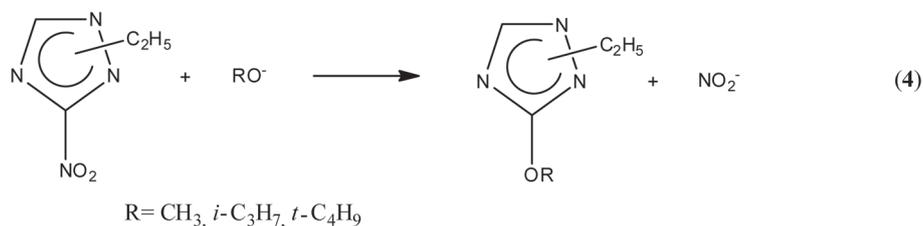
Реакция	R	R'	$\Delta_r H_{298}^0$	$\Delta_r G_{298}^0$	$\Delta_r G_s$
2	H	CH ₃	-51,2 (-56,2)*	-51,8 (-55,9)	-34,4
2	CH ₃	CH ₃	-46,2	-46,4	-29,8
2	C ₂ H ₅	CH ₃	-44,5	-44,8	-28,9
2	H	C ₂ H ₅	-50,7	-51,4	-34,6
2	H	C ₆ H ₅	-20,0	-23,3	-6,2
3	H	CH ₃	-231,0 (-238,8)	-233,4 (-240,5)	-196,1
3	CH ₃	CH ₃	-226,0	-228,0	-191,5
3	C ₂ H ₅	CH ₃	-224,3	-226,4	-190,6
3	H	C ₂ H ₅	-217,0	-216,7	-192,8
3	H	C ₆ H ₅	-62,1	-63,2	-81,1

Примечание. * – в скобках приведены величины, рассчитанные методом G3.

Результаты расчетов термодинамических характеристик реакций 2 и 3 с использованием уровня теории B3LYP/6-311+G(d,p)//B3LYP/6-31G(d) согласуются с величинами, вычисленными методом G3 (табл. 1).

Выполненные расчеты показывают, что нуклеофильное замещение нитрогруппы в триазольном цикле по реакциям **2** и **3** является термодинамически возможным и в газовой фазе, и в водном растворе. При этом как в случае анионов, так и в случае нейтральных нуклеофилов реакциям в водном растворе соответствуют большие по сравнению с газовой фазой значения $\Delta_r G$ (исключением является реакция с фенолят-анионом). С увеличением донорных свойств заместителя R у атома азота N(1) триазольного цикла величины $\Delta_r H^0_{298}$, $\Delta_r G^0_{298}$ и $\Delta_r G_S$ реакций **2** и **3** закономерно возрастают. В случае реакций с нейтральными нуклеофилами (реакция **2**) замена метанола на этанол практически не оказывает влияния на расчетные значения $\Delta_r H^0_{298}$, $\Delta_r G^0_{298}$ и $\Delta_r G_S$. При переходе от алканолов к фенолу величины $\Delta_r H^0_{298}$, $\Delta_r G^0_{298}$ и $\Delta_r G_S$ заметно возрастают, что согласуется с меньшей нуклеофильностью фенола, по сравнению с метанолом и этанолом. В случае отрицательно заряженных нуклеофилов (реакция **3**) эта тенденция выражена сильнее. Согласно выполненным расчетам для нейтральных нуклеофилов в водном растворе реакция с фенолом должна протекать обратимо ($\Delta_r G_S = -6,2$ кДж/моль).

Для исследования влияния положения заместителя в цикле и природы нуклеофильного реагента на термодинамическую возможность протекания процессов нуклеофильного замещения нитрогруппы были выполнены расчеты $\Delta_r G_S$ реакций, протекающих по схеме **4**.



Во всех случаях среди изомерных N-этил-3-нитро-1,2,4-триазолов наименьшее значение $\Delta_r G_S$ соответствует N(2)-изомеру (табл. 2). При переходе от метилат-аниона к *изо*-пропилат- и *трет*-бутилат-анионам $\Delta_r G_S$ возрастает, что может быть обусловлено стерическими факторами (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Расчетные значения $\Delta_r G_S$ реакций, представленных на схеме **4** (кДж/моль)

Положение этильного заместителя в цикле	R	$\Delta_r G_S$
1	CH ₃	-190,6
2	CH ₃	-220,3
4	CH ₃	-217,0
1	<i>i</i> -C ₃ H ₇	-182,5
2	<i>i</i> -C ₃ H ₇	-201,7
4	<i>i</i> -C ₃ H ₇	-196,8
1	<i>t</i> -C ₄ H ₉	-169,8
2	<i>t</i> -C ₄ H ₉	-201,8
4	<i>t</i> -C ₄ H ₉	-197,6

С целью изучения механизма реакций нуклеофильного замещения нитрогруппы в молекулах N-алкил-3-нитро-1,2,4-триазолов были выполнены расчеты энергетических профилей процессов взаимодействия молекул N-этил-3-нитро-1,2,4-триазолов с метилат-, *изо*-пропилат- и *трет*-бутилат-анионами в водном растворе в зависимости от расстояния между атомом кислорода алколят-аниона и атомом углерода C(3) цикла. Поскольку растворитель может оказывать существенное влияние на механизм реакций и структурные параметры активированного комплекса, при исследовании механизма и расчетах энергии активации реакций выполнена оптимизация геометрических параметров реагентов и активированных комплексов в полярной среде. Полученный энергетический профиль для взаимодействия наиболее реакционноспособного среди изомерных N-этил-3-нитро-1,2,4-триазолов 2-этил-3-нитро-1,2,4-триазола с метилат-анионом представлен на рис. 1.

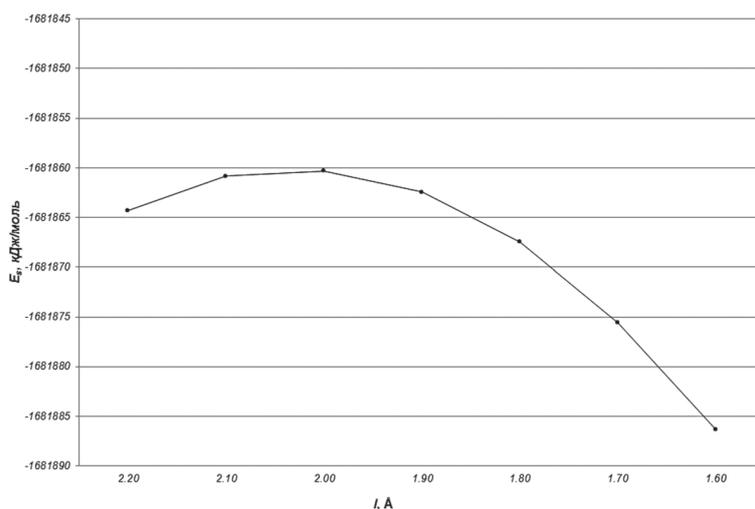
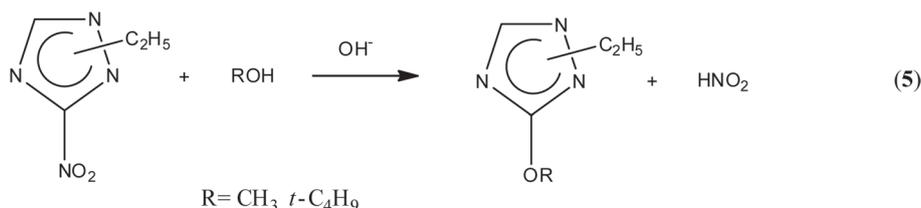


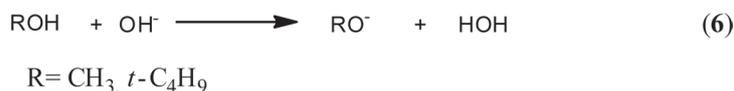
Рис. 1. Энергетический профиль процесса взаимодействия молекулы 2-этил-3-нитро-1,2,4-триазола с метилат-анионом в водном растворе

Профиль, представленный на рис. 1, показывает, что при взаимодействии 2-этил-3-нитро-1,2,4-триазола с метилат-анионом устойчивая структура, соответствующая σ -комплексу, на пути реакции не образуется.

Энергия Гиббса активации реакций (ΔG^\ddagger_S), протекающих по схеме



была оценена исходя из энергий активированных комплексов и энергий исходных веществ с учетом экспериментальных значений энергии Гиббса реакций



Расчетные значения энергии Гиббса активации реакций N-этил-3-нитро-1,2,4-триазолов с метиловым спиртом в водном растворе уменьшаются в ряду: ΔG^\ddagger_S (для 1-изомера) \gg ΔG^\ddagger_S (для 4-изомера) $>$ ΔG^\ddagger_S (для 2-изомера) (табл. 3), что хорошо согласуется с результатами экспериментального исследования нуклеофильного замещения в ряду N(1)-, N(2)- и N(4)-этил- и N-метил-3-нитро-1,2,4-триазолов метиловым спиртом в присутствии щелочи.

Таблица 3. Расчетные значения энергии Гиббса активации в водном растворе (pH = 14) реакций, представленных на схеме 5 (ΔG^\ddagger_S , кДж/моль)

Положение этильного заместителя в цикле	R	ΔG^\ddagger_S
1	CH ₃	82,6
2	CH ₃	41,4
4	CH ₃	52,2
2	t-C ₄ H ₉	90,6

Расчетное значение энергии Гиббса активации реакций 2-этил-3-нитро-1,2,4-триазола с *трет*-бутиловым спиртом в водном растворе (ΔG^\ddagger_S) составляет 90,6 кДж/моль, что значительно выше соответствующей величины, вычисленной для метанола (41,4 кДж/моль). Существенное уве-

личение энергии Гиббса активации при переходе от метанола к *трет*-бутанолу обусловлено уменьшением кислотности спирта и увеличением объема радикала, что приводит к стерическим затруднениям в активированном комплексе (рис. 2).

Результаты экспериментального исследования нуклеофильного замещения нитрогруппы в N-алкил-3-нитро-1,2,4-триазолах, протекающего по реакции 1, представлены в табл. 4 и подтверждают выводы, полученные с использованием квантовохимических расчетов.

Как видно из данных, представленных в табл. 4, реакционная способность N-алкил-3-нитро-1,2,4-триазолов в реакциях нуклеофильного замещения существенно зависит от положения заместителя в триазольном цикле и уменьшается в ряду N(2) > N(4) >>> N(1). Как показано на примере наиболее реакционноспособных 2-алкил-3-нитро-1,2,4-триазолов, увеличение электронодонорных свойств заместителя у атома азота триазольного цикла приводит к снижению реакционной способности N-алкил-3-нитро-1,2,4-триазолов. Реакционная способность используемого для проведения процесса спирта снижается с увеличением длины его углеводородного радикала.

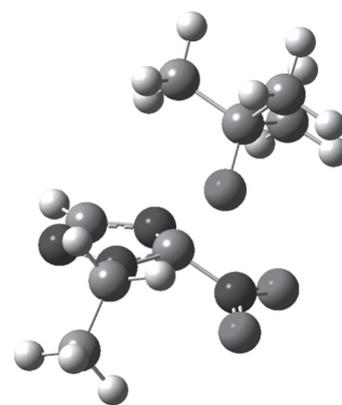


Рис. 2. Оптимизированная структура активированного комплекса реакции 2-этил-3-нитро-1,2,4-триазола с *трет*-бутилат-анионом

Таблица 4. Результаты экспериментального исследования нуклеофильного замещения нитрогруппы в N-алкил-3-нитро-1,2,4-триазолах

R		R'	T, °C	Время реакции, ч	Выход N-алкил-3-нитро-1,2,4-триазолов, %
Положение в гетероцикле	N-алкил				
1	CH ₃	CH ₃	66–68	110,0	95,0
2	CH ₃	CH ₃	66–68	3,5	91,0
2	CH ₃	C ₂ H ₅	78–80	6,0	76,5
2	CH ₃	<i>n</i> -C ₃ H ₇	78–80	13,5	91,2
2	CH ₃	<i>n</i> -C ₄ H ₉	78–80	14,0	57,1
4	CH ₃	CH ₃	66–68	6,0	93,0
1	C ₂ H ₅	CH ₃	66–68	160,0	85,0
2	C ₂ H ₅	CH ₃	66–68	5,0	97,4
2	C ₂ H ₅	C ₂ H ₅	78–80	11,0	86,0
4	C ₂ H ₅	CH ₃	66–68	8,5	86,6
2	<i>i</i> -C ₃ H ₇	CH ₃	66–68	5,5	85,1
2	<i>i</i> -C ₃ H ₇	C ₂ H ₅	78–80	45,0	65,9
2	<i>s</i> -C ₄ H ₉	CH ₃	66–68	7,0	85,3

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект X12CO-011).

Литература

1. Curtis A. D. M., Jennings N. // Compr. Heterocyclic Chem. III. 2008. Vol. 5. P. 159–209.
2. Машковский М. Д. Лекарства XX века. М., 1998. – 320 с.
3. Власов В. М. // Успехи химии. 2003. Т. 72, № 8. С. 764–786.
4. Певзнер М. С., Самаренко В. Я., Багал Л. И. // Химия гетероциклических соединений. 1970. № 4. С. 568–571.
5. Nagaо Y., Sano Sh., Ochiai M. // Tetrahedron. 1990. Vol. 46, N 9. P. 3211–3232.
6. Суханов Г. Т., Суханова А. Г., Филиппова Ю. В. и др. // Ползуновский Вестн. 2013. № 1. С. 24–26.
7. Frisch M. J. et al. // Gaussian 09, Revision A.02. Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2009.
8. Becke A. D. // J. Chem. Phys. 1993. Vol. 98. P. 5648–5652.
9. Matulis Vadim E., Ivashkevich O. A., Gaponik P. N. et al. // J. Mol. Struct. (Theochem). 2008. Vol. 854. P. 18–25.
10. Curtiss L. A., Raghavachari K., Redfern P. C. et al. // J. Chem. Phys. 1998. Vol. 109. P. 7764–7776.
11. Cancas M. T., Mennucci B., Tomasi J. // J. Chem. Phys. 1997. Vol. 107. P. 3032–3041.

*Vadim E. MATULIS, Y. V. GRIGORIEV, A. G. SUKHANOVA, Y. V. FILIPPOVA,
I. A. KRUPNOVA, O. A. IVASHKEVICH*

matulisvad@bsu.by; azole@bsu.by; admin@ipcet.ru; irinka-krupnova@mail.ru; nauka@bsu.by

**QUANTUM-CHEMICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF NUCLEOPHILIC SUBSTITUTION
REACTIONS OF N-ALKYL-3-NITRO-1,2,4-TRIAZOLES**

Summary

Reactions of nucleophilic substitution of nitro group in N-alkyl-3-nitro-1,2,4-triazoles have been studied both experimentally and theoretically using DFT method. The standard enthalpy and Gibbs free energy of alkoxylation reactions of N-alkyl-3-nitro-1,2,4-triazoles in gas phase and aqueous solution have been calculated. The calculation results show that nucleophilic substitution reactions of N-alkyl-3-nitro-1,2,4-triazoles with alcohols and alcoholate anions are thermodynamically possible both in gas phase and in aqueous solution. Computed activation energies for reactions of N-alkyl-3-nitro-1,2,4-triazoles with methanol decrease in the series of ΔG^\ddagger_S (for 1-isomer) \gg ΔG^\ddagger_S (for 4-isomer) $>$ ΔG^\ddagger_S (for 2-isomer). The calculation results are in good agreement with experimental data.

УДК 577.175.1:578.831:615.37

И. В. НАСОНОВ¹, М. И. ЛИХАЧЕВА¹, П. А. КИСЕЛЕВ², Н. И. БОВДЕЙ²,
А. Л. САВЧУК², В. Н. ЖАБИНСКИЙ², Р. П. ЛИТВИНОВСКАЯ², Н. Б. ХРИПАЧ²

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ СТЕРОИДНОГО ФИТОГОРМОНА: НОВЫЙ ПОДХОД К ЗАЩИТЕ ОТ ВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ

(Представлено академиком В. А. Хрипачом)

¹Институт экспериментальной ветеринарии им. С. Н. Вышеслеского, Минск

²Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск

Поступило 08.10.2014

Введение. Брассиностероиды (БС) – гормоны растений, играющие важную роль в регуляции роста, развития и ряда ключевых физиологических функций [1; 2]. Обработка растений экзогенными БС повышает их урожайность и устойчивость к различного рода стрессам – температурному, солевому, биотическому и др., что было использовано при создании новых эффективных агропрепаратов [3]. В последние годы получили развитие исследования физиологических эффектов БС у животных и человека, ориентированные на создание новых лечебно-профилактических средств. Результатом данных исследований явилось обнаружение различных видов биологического действия, имеющего аналогию с эффектами БС в растениях и перспективного для использования в медицине, например, анаболический и иммуностимулирующий эффекты, антистрессовая активность и защита от патогенов, в том числе, вирусной природы. Эти данные стали предпосылкой для проведения настоящей работы, которая посвящена получению и изучению антивирусных свойств композиций природного стероидного фитогормона, 24-эпибрассинолида, с целью профилактики и лечения вирусных заболеваний птицы.

Интерес, проявляемый к антивирусным препаратам в птицеводстве, обусловлен, прежде всего, тем, что использование живых и инактивированных вакцин не всегда эффективно и оправдано, а обеспеченность неспецифическими, действующими на широкий спектр вирусов средствами очень низка из-за высокой стоимости. Применение стероидных гормонов растений может оказаться наиболее перспективным подходом к решению рассматриваемой проблемы. Применение таких соединений связано, однако, с определенными трудностями, в частности, с плохой растворимостью их в воде, а следовательно, малой биодоступностью.

Целью наших исследований является поиск средств на основе БС для профилактики и лечения скрытопротекающих и латентных вирусных инфекций у птиц. Задача настоящего исследования – получение наноструктурированных комплексов включения, обеспечивающих достаточную растворимость БС, и изучение антивирусных свойств полученных комплексов *in vitro* в отношении вируса инфекционного ларинготрахеита птиц (ИЛТ) на развивающихся эмбрионах кур.

В ходе выполнения работы была показана возможность получения водных растворов БС путем первоначального растворения 24-эпибрассинолида в этиловом спирте и последующего разбавления полученного раствора водой. Полученные данные свидетельствовали о наличии у фитогормона противовирусной активности. Недостатком такого подхода является сравнительно низкая достигаемая концентрация 24-эпибрассинолида и необходимость использования этилового спирта. Перспективной в связи с этим представлялась попытка создания водорастворимого комплекса 24-эпибрассинолида с циклодекстрином. Циклодекстрины – это тороидальные циклические олигомеры, наиболее известные среди которых состоят из 6, 7 или 8 глюкопиранозных звеньев, и имеют название α -, β - и γ -циклодекстринов соответственно. В случае образования комплексов включения физические и химические свойства «гостей» могут значительно изме-

няться, что позволяет улучшать прикладные свойства связываемых веществ, например, увеличивать растворимость в воде неполярных субстанций (в 10–100 раз).

Материалы и методы исследования. Комплекс готовили по аналогии с работой [4] смешиванием двух растворов: водного раствора γ -циклодекстрина (50 мг в 5 мл воды) и ацетонового раствора 24-эпибрассинолида (19 мг в 2 мл ацетона) в мольном соотношении 1 : 1. Перемешивали 24 ч, затем упаривали досуха, к остатку добавляли 7 мл воды, перемешивали при 37 °С в течение 3–4 ч и раствор центрифугировали.

Для подтверждения факта образования комплекса применяли спектроскопию ЯМР высокого разрешения с использованием спектрометра AVANCE 500 фирмы Брукер-Биоспин с рабочей частотой 500,03 МГц. Образцы растворяли в тяжелой воде и регистрировали сигналы протонного резонанса. Обнаружение сигналов эпибрассинолида, практически нерастворимого в воде в индивидуальном состоянии, и изменение спектральных характеристик циклодекстрина по сравнению со спектром свободного соединения свидетельствует о встраивании стероида во внутреннюю полость молекулы циклодекстрина и об образовании химического комплекса.

Количественное определение 24-эпибрассинолида (ЭБ) в комплексе декстрин-эпибрассинолид проводили методом иммуноферментного анализа [5]. Сущность аналитического метода состоит в следующем: в лунки планшета помещали исследуемый раствор, содержащий то или иное количество эпибрассинолида, и раствор конъюгата эпикастастерона с пероксидазой хрена. Планшет инкубировали при определенной температуре, при этом устанавливается равновесие между брассиностероидом и конъюгатом с пероксидазой хрена с антителами, иммобилизованными предварительно на внутренней поверхности лунок. При удалении содержимого из лунок происходит разделение свободного и связанного антителами брассиностероида, свободного и связанного антителами соответствующего конъюгата с пероксидазой. Количество связанного антителами конъюгата обратно пропорционально количеству брассиностероида в образце. Во время дальнейшей инкубации содержимого лунок с хромоген/субстратной смесью происходит окрашивание раствора в лунках. Степень окраски прямо пропорциональна количеству связанного антителами конъюгата с пероксидазой. После измерения оптической плотности раствора в лунках на основании градуировочной прямой рассчитывается содержание 24-эпибрассинолида в препарате. Полученный раствор комплекса содержал до $1,9 \cdot 10^{-3}$ моль/л действующего вещества и использовался для приготовления водных растворов различной концентрации.

Для определения противовирусной активности композиции были исследованы концентрации ЭБ в диапазоне $(0,01–0,50) \cdot 10^{-4}$ моль/л. В каждом варианте исследовали 10 развивающихся куриных эмбрионов (РКЭ), растворы композиций в воде смешивали с вирусом инфекционного ларинготрахеита птиц (доза 10 ЭИД₅₀) в соотношении 1 : 1. Полученную смесь инкубировали при 4 °С в течение 24 ч, после чего производили заражение девяти суточных эмбрионов на хорион-аллантаисную оболочку в объеме 0,2 см³. В качестве контроля использовали стерильный физиологический раствор, а в качестве контроля вируса использовали смесь вируса и стерильного физиологического раствора в соотношении 1 : 1. В качестве контроля фитогормона брали растворы исследуемых концентраций и смешивали со стерильным физиологическим раствором в соотношении 1 : 1. Все полученные контрольные образцы выдерживали при 4 °С в течение 24 ч.

Куриные эмбрионы перед заражением вирусом ИЛТ овоскопировали и отбирали для заражения хорошо развитые, активно подвижные, жизнеспособные эмбрионы. Вирусосодержащий материал вносили в аллантаисную полость в объеме 0,2 см³. Зараженные и контрольные куриные эмбрионы помещали в термостат и выдерживали 12–168 ч при температуре 37,5 °С и влажности воздуха 60–70 %. Овоскопию эмбрионов проводили ежедневно в течение 72 ч. По окончании инкубации эмбрионы помещали в холодильные камеры и выдерживали при температуре 2–6 °С в течение 6–18 ч, перед вскрытием эмбрионы выдерживали 2–3 ч при комнатной температуре до испарения конденсата на скорлупе. Затем эмбрионы вскрывали в стерильных боксах. Отбирали пробы экстраэмбриональной жидкости в количестве 1 см³. Наличие вируса ИЛТ определяли по характерным патоморфологическим признакам при вскрытии эмбрионов (наличие или отсутствие помутнения и уплотнения хорион-аллантаисной оболочки с образованием на ней мелкозернистых или крупнозернистых бляшек серо-белого цвета величиной 0,5–2,0 мм округлой фор-

мы, кровоизлияния на всех участках тела, а также отклонения в росте, развитии и оперении самого эмбриона).

Результаты и их обсуждение. Обнаружение у брассиностероидов выраженной способности повышать устойчивость растений к фитопатогенам и, в частности, к вирусной инфекции [6–10], послужило предпосылкой для изучения возможностей применения БС для борьбы с вирусными заболеваниями человека и животных, которое показало перспективность работы в данном направлении [11; 12]. Одним из препятствий на пути к созданию лекарственных препаратов этого ряда является чрезвычайно низкая растворимость природных БС в воде и, как следствие, их сравнительно невысокая биодоступность. Один из путей решения проблемы – применение БС в составе наномолекулярных комплексов, в роли которых могут выступать соединения включения стероид-циклодекстрин [4]. В качестве последнего, т. е. молекулы «хозяина», наиболее подходящим представляется γ -циклодекстрин, геометрические размеры внутренней полости в молекуле которого наилучшим образом согласуются с размерами молекулы «гостя», т. е. БС. Это предположение было подтверждено рядом экспериментов с участием других представителей циклодекстринов (α - и β -), а также различных мольных соотношений стероид-циклодекстрин. Изменение характеристик спектра ЯМР молекулы «хозяина» в составе комплекса по сравнению со спектром свободной молекулы циклодекстрина (смещение в слабое поле сигналов протонов звеньев глюкозы) может служить доказательством химического связывания и факта комплексообразования, а регистрация резонансных сигналов молекулы стероида в водном растворе – признаком существенно возросшей растворимости. Ее прямое измерение методом иммуноферментного анализа указывает на возможность увеличения растворимости БС этим путем в 10 и более раз.

Изучением антивирусных свойств композиции декстрин-24-эпибрассинолид на развивающихся куриных эмбрионах против вируса ИЛТ установлена зависимость эффекта от концентрации препаративной формы. Полученные данные приведены в таблице.

Проявление патологоанатомических изменений при экспериментальном заражении эмбрионов птиц вирусом ИЛТ

Концентрация 24-эпибрассинолида, моль/л	Процент РКЭ с явными патологоанатомическими изменениями
$0,50 \cdot 10^{-4}$	40
$0,33 \cdot 10^{-4}$	60
$0,20 \cdot 10^{-4}$	80
$0,25 \cdot 10^{-4}$	90
$0,10 \cdot 10^{-4}$	100
$0,01 \cdot 10^{-4}$	100
Контроль	0
Контроль вируса инфекционного ларинготрахеита	100
Контроль фитогормона	0

Полученные данные свидетельствуют о том, что наилучший эффект из изученных концентраций композиции декстрин-24-эпибрассинолид показал препарат в концентрации $0,50 \cdot 10^{-4}$ моль/л, защищая 60 % эмбрионов от развития вируса ИЛТ. У 40 % развивающихся эмбрионов кур на хорион-аллантаиной оболочке наблюдались незначительные мелкоузелковые поражения без отека и слизи, нормальный рост и развитие с хорошим оперением.

При применении концентрации $0,33 \cdot 10^{-4}$ моль/л у 60 % эмбрионов также отмечались незначительные мелкоузелковые поражения на хорион-аллантаиной оболочке, эмбрионы были нормального роста и развития с хорошим оперением.

В рабочей концентрации $0,25 \cdot 10^{-4}$ моль/л у 80 % эмбрионов при осмотре хорион-аллантаиной оболочки наблюдались мелкие точечные кровоизлияния, мелкоузелковые поражения с отеком, незначительное отставание в росте и развитии с хорошим оперением.

Брассиностероид в диапазоне концентраций $(0,20–0,01) \cdot 10^{-4}$ моль/л оказался малоэффективным, проявив антивирусную активность к вирусу ИЛТ птиц менее 10 %. У эмбрионов при этом отмечались следующие патологоанатомические изменения – значительное отставание в росте

и развитии, кровоизлияния, при осмотре хорион-аллантаической оболочки присутствовали слизь, отечность и крупноузелковые поражения с непрозрачной периферией и некротическим центром.

В контроле со стерильным физиологическим раствором, а также в контроле 24-эпибрассинолида со стерильным физиологическим раствором развивающиеся эмбрионы кур имели хорошее оперение, хорион-аллантаическая оболочка была блестящей с отсутствием слизи и отечности, эмбрионы были нормального роста и развития, кровоизлияния на разных участках тела отсутствовали.

У контроля вируса инфекционного ларинготрахеита птиц с физиологическим раствором наблюдались помутнения и уплотнения хорион-аллантаической оболочки с образованием на ней мелкозернистых или крупнозернистых бляшек серо-белого цвета, величиной 0,5–2,0 мм округлой формы, кровоизлияния на всех участках тела, отклонения в росте, развитии и оперении самого эмбриона.

Заключение. Таким образом, установлено, что водорастворимая форма препарата на основе 24-эпибрассинолида в комплексе с γ -циклодекстрином обладает вирулицидным действием *in vitro* против вируса инфекционного ларинготрахеита птиц. Показано, что в концентрации композиционного препарата $0,50 \cdot 10^{-4}$ моль/л эффективность подавления вируса достигает 60 %.

Литература

1. Khripach V. A., Zhabinskii V. N., de Groot A. Brassinosteroids: A New Class of Plant Hormones. San Diego: Acad. Press, 1999. – 456 p.
2. Sakurai A., Yokota T., Clouse S. Brassinosteroids: Steroidal Plant Hormones. Berlin: Springer, 1999. – 253 p.
3. Khripach V., Zhabinskii V., De Groot A. // Annals of Botany. 2000. Vol. 86. P. 441.
4. De Azevedo M. B. M., Zullo M. A. T., Alderete J. B. et al. // Plant Growth Regulation. 2002. Vol. 37. P. 233–240.
5. Хрипач В. А., Свиридов О. В., Прядко А. Г. и др. // Биоорг. химия. 2007. Т. 33, № 3. С. 371–378.
6. Способ защиты картофеля от фитофтороза: Патент РБ № 3400 / Е. А. Савельева, И. И. Карась, А. В. Кильчевский, С. Н. Титова, В. А. Хрипач, В. Н. Жабинский, Р. П. Литвиновская, М. И. Завадская; заяв. и патентообладатель В. А. Хрипач, В. Н. Жабинский, Р. П. Литвиновская, М. И. Завадская // Офиц. бюл. 2000. № 2. – 75 с.
7. Способ защиты ячменя от листовых болезней: Патент РБ № 5168 / В. А. Хрипач, Р. П. Литвиновская, В. Н. Жабинский, М. И. Завадская, А. П. Волынец, Р. А. Прохорчик, Л. А. Пшеничная, Н. Е. Манжелесова, Г. В. Морозик // Офиц. бюл. 2003. № 2. – 95 с.
8. Способ размножения оздоровленного семенного материала картофеля: Патент РБ № 5698 / А. О. Бобрин, В. А. Хрипач, В. Н. Жабинский, М. И. Завадская, Р. П. Литвиновская // Офиц. бюл. 2003. № 4. – 88 с.
9. Nakashita H., Yasuda M., Nitta T. et al. // Plant J. 2003. Vol. 33. P. 887–898.
10. Блоцкая Ж. В., Вабищевич В. В., Домаш В. И. и др. // Докл. НАН Беларуси. 2010. Т. 54, № 4. С. 97–100.
11. Wachsmann M. B., Ramirez J. A., Talarico L. B. et al. // Curr. Med. Chem: Anti-Infect Agents. 2004. Vol. 3. P. 163–179.
12. Wachsmann M. B., Castilla V. // Brassinosteroids: Practical Applications in Agriculture and Human Health / ed. A. B. Pereira-Netto. Bentham Science Publishers, 2012. P. 57–71.

I. V. NASONAU, M. I. LIKHACHOVA, P. A. KISELEV, N. I. BOVDEI, A. L. SAUCHUK,
V. N. ZHABINSKII, R. P. LITVINOVSKAYA, N. B. KHRIPACH

litvin@iboch.bas-net.by

NANOSTRUCTURATED COMPLEXES OF STEROID PHYTOHORMONE: A NEW APPROACH TO AN INFECTIOUS VIRUS PROTECTION

Summary

The *in vitro* study of the antiviral activity of the dextrin-24-epibrassinolide complex in chicken embryos was carried out. The complex was shown to have an inhibitory effect against the infectious laryngotracheitis virus.

УДК 547.786

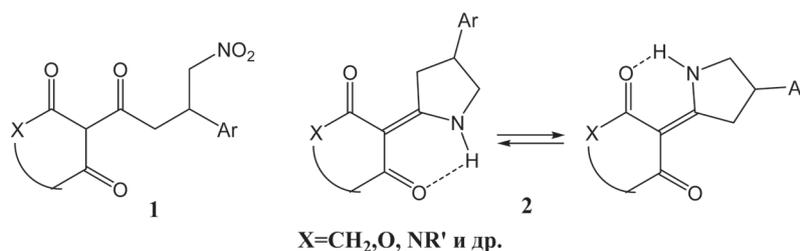
Ф. С. ПАШКОВСКИЙ, Ю. С. ДОНЦУ, академик Ф. А. ЛАХВИЧ

**НИТРИЛОКСИДНЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ ПРОИЗВОДНЫХ
ТЕТРАГИДРОБЕНЗИЗОКСАЗОЛОВ И ТЕТРАГИДРОИНДАЗОЛОВ
С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ГЕТЕРОЦИКЛИЧЕСКИМ
ФАРМАКОФОРНЫМ ФРАГМЕНТОМ**

Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск

Поступило 04.12.2014

Введение. В предыдущем сообщении [1] нами был описан простой общий метод синтеза нитрометилпроизводных карбо- и гетероциклических β -трикарбонильных соединений общей формулы (1), представляющих собой многоцелевые полифункциональные предшественники новых биоактивных соединений различных классов. Так, на основе нитрометилпроизводных (1) в результате хемоселективного восстановления в них нитрогруппы осуществлен синтез ранее не описанных 2(3)-(4-арилпирролидин-2-илиден)-1,3(2,4)-дионов (2) с потенциальной гистаминергической, антиконвульсантной, противовоспалительной и другой активностью [2; 3].



К важным химическим трансформациям нитрометилпроизводных относится генерирование на их основе нитрилоксидов – реакционноспособных 1,3-диполей, вступающих *in situ* в реакцию [3+2] циклоприсоединения с алкинами и алкенами с образованием изоксазолов и 2-изоксазолинов [4–8]. Эти гетероциклы представляют интерес в качестве лекарственных [6; 7] и агрохимических средств [6]. В электронике полиизоксазольные производные нашли применение в качестве органических полупроводниковых материалов [6]. С синтетической точки зрения существенным является тот факт, что изоксазолы (изоксазолины) обладают латентной функциональностью, которая может быть реализована на подходящей стадии конструирования структуры целевых молекул путем расщепления гетероцикла с образованием β -дикетонов, енаминокетонов, енонов, β -гидроксикетонов, еноксидов, γ -аминоспиртов и других дифункционализованных производных [4–7]. Благодаря таким особенностям изоксазольного (изоксазолинового) цикла «нитрилоксидная технология» нашла широкое применение в синтезе природных и родственных им биомолекул различных классов [5; 7; 9; 10].

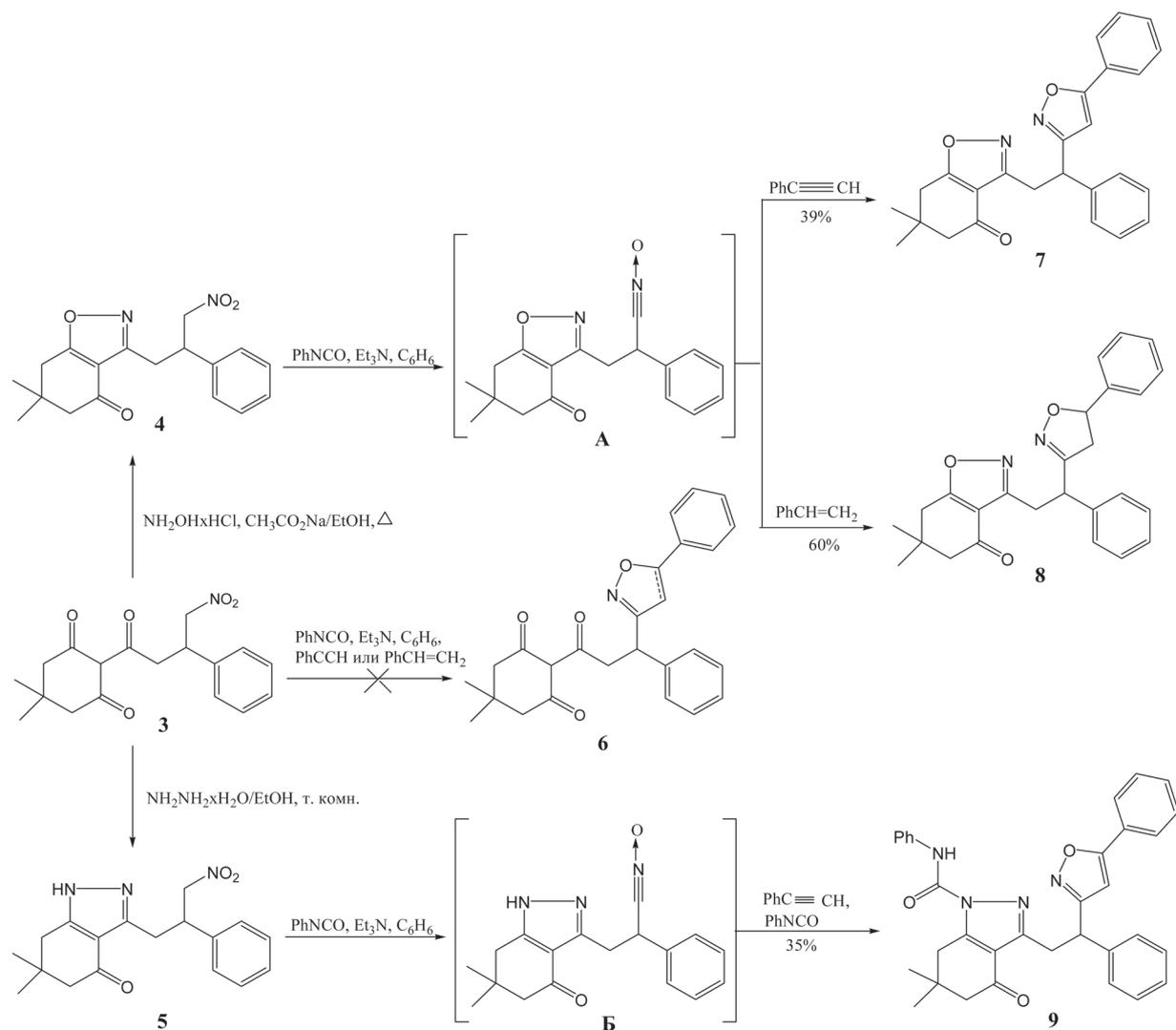
Наличие нитрометильного заместителя в соединениях типа (1) позволяет рассматривать их в качестве удобных предшественников изоксазольных (изоксазолиновых) производных, в свою очередь, являющихся латентной формой β -дикетонов. С другой стороны, циклическая β -трикарбонильная система соединений (1) служит еще одним реакционным центром, способным претерпевать селективные химические модификации. В частности, взаимодействие по β -трикарбонильному фрагменту 2-ацилциклогексан-1,3-дионов гидроксилamina, гидразина и его арил(алкил) производных в качестве бинуклеофильных агентов лежит в основе синтеза тетрагидробензи-

зоксазолов [11] и тетрагидроиндазолов [11; 12]. Последние представляют собой важный класс биоактивных гетероциклов, обладающих выраженной противоопухолевой, противовирусной, противомикробной, противовоспалительной, анальгетической, гербицидной активностью и другими видами физиологического действия [13–15]. Последовательное проведение селективных химических трансформаций по циклической β -трикарбонильной системе и нитрометильному заместителю соединений (**1**) позволит значительно расширить круг биоактивных производных, содержащих в структуре молекулы два гетероциклических фармакобиофорных фрагмента.

Задача исследования – на основе 5,5-диметил-2-(4-нитро-3-фенилбутаноил)-циклогексан-1,3-диона (**3**) осуществить синтез его тетрагидробензоизоксазольного (**4**) и тетрагидроиндазольного (**5**) производных и изучить поведение соединений (**3**)–(**5**) в нитрилоксидном синтезе.

Результаты и их обсуждение. 6,7-Дигидробензо[*d*]изоксазол-4(*5H*)-он (**4**) получен с выходом 61 % при нагревании нитрометилпроизводного (**3**) с 1,5 экв. гидросиламина гидрохлорида в присутствии двукратного избытка ацетата натрия в водно-этанольном растворе. Соответствующий 6,7-дигидро-1*H*-индазол-4(*5H*)-он (**5**) образуется с выходом 72 % в результате реакции соединения (**3**) с 1,1-экв. гидразингидрата в растворе этанола при комнатной температуре.

При введении β -трикетона (**3**) в классическую реакцию, в которой в качестве реагента для генерирования нитрилоксидных интермедиатов используется фенилизотиоцианат, а в качестве диполярофилов – фенилацетилен либо стирол целевых изоксазольных и изоксазолиновых производных (**6**) нам выделить не удалось. Вероятно, этой реакции препятствует циклическая β -трикарбонильная система, енольная форма которой представляет собой винилоговую кислоту.



Реакция же соединений (4), (5) в указанных выше условиях, протекающая через образование нитрилоксидных интермедиатов (А), (Б), приводит к изоксазольным и изоксазолиновым производным (7)–(9) с выходом 39–60 %. Во всех описанных случаях 1,3-диполярное присоединение нитрилоксидов (А), (Б) к фенилацетилену и стиrolу протекает региоселективно, вследствие чего образуются аддукты с 3,5-дизамещенным изоксазольным (изоксазолиновым) фрагментом. В случае 6,7-дигидро-1*H*-индазол-4(5*H*)-она (5) наряду с образованием изоксазольного цикла наблюдается присоединение фенилизотиоцианата к NH-группе пиразольного кольца с образованием уретана (9).

Структура полученных соединений (4), (5), (7)–(9) подтверждена данными физико-химических методов исследования, что отражено в экспериментальной части.

Бис-гетероциклические производные (7)–(9) и родственные им соединения представляют интерес в качестве новых веществ с потенциальной противоопухолевой, противовоспалительной, анальгетической и противомикробной активностью.

Экспериментальная часть. Температура плавления полученных соединений измерена на блоке Voetius. ИК спектры сняты на приборе FT IR Bomem Michelson 100 для образцов в таблетках KBr. Спектры ЯМР ¹H (500 МГц) и ¹³C (125,7 МГц) записаны на спектрометре Bruker Avance-500 с TMS в качестве внутреннего стандарта. Масс-спектры зарегистрированы на комплексе ВЭЖХ Accela с масс-детектором LCQ-Fleet в режиме APCI и ESI с детектированием положительных ионов.

5,5-Диметил-2-(4-нитро-3-фенилбутаноил)циклогексан-1,3-дион (3) получен по методу, описанному в [1], его физико-химические характеристики приведены в [2; 3].

6,6-Диметил-3-(3-нитро-2-фенилпропил)-6,7-дигидробензо[*d*]изоксазол-4(5*H*)-он (4). К раствору 0,331 г (1 ммоль) соединения (3) в смеси этанола (1 мл) и воды (2 мл) прибавляли 0,104 г (1,5 ммоль) гидрохлорида гидросиламина и 0,17 г (2 ммоль) ацетата натрия. Реакционную смесь нагревали при перемешивании в течение 6 ч и оставляли на ночь при комнатной температуре. После удаления растворителя в вакууме остаток промывали водой (3 × 15 мл), растворяли в 20 мл хлороформа, раствор сушили безводным сульфатом натрия. После удаления растворителя в вакууме продукт реакции очищали колоночной хроматографией на силикагеле (элюент – хлороформ). Получили 0,2 г изоксазолпроизводного (4) (выход 61 %) в виде белого кристаллического вещества. Т. пл. 88–89 °С (из диэтилового эфира). ИК спектр (ν , см⁻¹): 1047, 1082, 1385, 1437, 1464, 1493, 1551 (макс.), 1605, 1688 (макс.), 2874, 2943, 2961, 3030. Спектр ЯМР ¹H (CDCl₃, δ , м. д.): 1,12 с (3H, CH₃); 1,13 с (3H, CH₃); 2,39 с (2H, CH₂ цикла); 2,80 с (2H, CH₂ цикла); 3,25 д. д (1H, CH _{α} H _{β} , ²*J* 14,5, ³*J* 8,0 Гц); 3,35 д. д (1H, CH _{α} H _{β} , ²*J* 14,5, ³*J* 7,0 Гц); 4,16 квинтет (1H, CH, ³*J* 7,5 Гц); 4,70 д (2H, CH₂NO₂, ³*J* 7,5 Гц); 7,23–7,26 м (3H_{аром}); 7,29–7,32 м (2H_{аром}). Спектр ЯМР ¹³C (CDCl₃, δ , м. д.): 28,18 (CH₃); 28,33 (CH₃); 29,38 (CH₂); 35,59 (C); 36,69 (CH₂); 41,80 (CH); 52,24 (CH₂); 79,45 (CH₂); 113,66 (C); 127,41 (2CH_{аром}); 127,88 (CH_{аром}); 128,91 (2CH_{аром}); 138,42 (C); 157,87 (C); 180,97 (C); 192,37 (C). C₁₈H₂₀N₂O₄. Масс-спектр (APCI): *m/z* 329 [MH]⁺.

6,6-Диметил-3-(3-нитро-2-фенилпропил)-6,7-дигидро-1*H*-индазол-4(5*H*)-он (5). К раствору 0,331 г (1 ммоль) нитрометилпроизводного (3) в 10 мл этанола прибавляли 0,053 мл (1,1 ммоль) гидразин-гидрата. После перемешивания реакционной смеси в течение 12 ч при комнатной температуре этанол удаляли в вакууме, остаток растворяли в 20 мл хлороформа, полученный раствор промывали разбавленной (1 : 10) соляной кислотой (3 × 15 мл), а затем – водой (1 × 15 мл), сушили безводным сульфатом натрия. После удаления растворителя в вакууме продукт реакции очищали колоночной хроматографией на силикагеле (элюент – хлороформ / этилацетат, градиентное элюирование). Получили 0,235 г пиразолпроизводного (5) (выход 72 %) в виде белого кристаллического вещества. Т. пл. 168–169 °С (из диэтилового эфира). ИК спектр (ν , см⁻¹): 1365 сл., 1390 сл., 1497, 1555, 1645 (макс.), 2928, 2936, 2962. Спектр ЯМР ¹H (CDCl₃, δ , м. д.): 1,07 с (3H, CH₃); 1,08 с (3H, CH₃); 2,36 с (2H, CH₂ цикла); 2,67 с (2H, CH₂ цикла); 3,31 д. д (1H, CH _{α} H _{β} , ²*J* 14,5, ³*J* 8,5 Гц); 3,34 д. д (1H, CH _{α} H _{β} , ²*J* 14,5, ³*J* 7,0 Гц); 4,08 квинтет (1H, CH, ³*J* 7,5 Гц); 4,66 д. д (1H, CH _{α} H _{β} NO₂, ²*J* 13,0, ³*J* 8,5 Гц); 4,69 д. д (1H, CH _{α} H _{β} NO₂, ²*J* 13,0, ³*J* 7,0 Гц); 7,19–7,23 м (3H_{аром}); 7,25–7,28 м (2H_{аром}); 8,50 уш. сигнал (1H, NH). Спектр ЯМР ¹³C (CDCl₃, δ , м. д.): 28,24 (CH₃); 28,27 (CH₃); 30,98 (CH₂); 35,56 (CH₂); 35,70 (C); 43,14 (CH); 52,75 (CH₂); 79,52 (CH₂); 114,87 (C); 127,33

(2CH_{аром}); 127,69 (CH_{аром}); 128,83 (2CH_{аром}); 139,11 (C); 147,37 (C); 152,45 (C); 193,98 (C). C₁₈H₂₁N₃O₃. Масс-спектр (APCI): *m/z* 328 [MH]⁺.

Нитрилоксидный синтез изоксазол(изоксазолин)производных тетрагидробензизоксазолов и тетрагидроиндазолов (общая методика). К раствору 1 ммоль нитрометилпроизводного тетрагидробензизоксазола (4) либо тетрагидроиндазола (5) в 6 мл бензола прибавляли 20 ммоль фенилацетилена (2,19 мл) либо стирола (2,29 мл), 0,44 мл (4 ммоль) фенилизоцианата и 5 капель триэтиламина. Реакционную смесь перемешивали в течение 5 суток при комнатной температуре. Образовавшуюся дифенилмочевину отфильтровывали, растворитель удаляли в вакууме, остаток растворяли в 20 мл хлороформа. К полученному раствору прибавляли 15 мл 1 н HCl и смесь перемешивали в течение 1 ч. Водный слой отделяли, органическую фазу промывали водой (1 × 15 мл) и сушили безводным сульфатом натрия. После удаления растворителя в вакууме остаток очищали колоночной хроматографией на силикагеле (элюент – хлороформ). Целевые изоксазол(изоксазолин)производные (7)–(9) получены в виде белых или желтовато-белых кристаллических веществ.

6,6-Диметил-3-[2-фенил-2-(4-фенилизоксазол-3-ил)этил]-6,7-дигидробензо[d]-изоксазол-4(5H)-он (7). Выход 39 %. Т. пл. 156–158 °С. ИК спектр (ν , см⁻¹): 1414, 1460 уш., 1496, 1575, 1600 уш., 1685 (макс.), 2873, 2931, 2960. Спектр ЯМР ¹H (CDCl₃, δ , м. д.): 1,09 с (3H, CH₃); 1,11 с (3H, CH₃); 2,38 с (2H, CH₂ цикла); 2,76 с (2H, CH₂ цикла); 3,62 д. д (1H, CH_αH_β, ²J 14,5, ³J 7,5 Гц); 3,79 д. д (1H, CH_αH_β, ²J 14,5, ³J 8,5 Гц); 4,90 т (1H, CH, ³J 8,0 Гц); 6,36 с (1H_{изокс}); 7,22 т. т (1H_{аром}, ³J 7,0, ⁴J 1,5 Гц); 7,29 т (2H_{аром}, ³J 7,5 Гц); 7,33–7,35 м (2H_{аром}); 7,37–7,42 м (3H_{аром}); 7,69–7,70 м (2H_{аром}). Спектр ЯМР ¹³C (CDCl₃, δ , м. д.): 28,03 (CH₃); 28,35 (CH₃); 30,27 (CH₂); 35,47 (C); 36,65 (CH₂); 41,34 (CH); 52,29 (CH₂); 99,09 (CH_{изокс}); 113,82 (C); 125,68 (2CH_{аром}); 127,24 (CH_{аром}); 127,37 (C); 127,91 (2CH_{аром}); 128,67 (2CH_{аром}); 128,78 (2CH_{аром}); 129,96 (CH_{аром}); 140,41 (C); 158,58 (C); 165,67 (C); 169,66 (C); 180,72 (C); 192,44 (C). C₂₆H₂₄N₂O₃. Масс-спектр (APCI): *m/z* 413 [MH]⁺.

6,6-Диметил-3-[2-фенил-2-(5-фенил-4,5-дигидроизоксазол-3-ил)этил]-6,7-дигидробензо[d]изоксазол-4(5H)-он (8). Выход 60 %. Т. пл. 101–102 °С. ИК спектр (ν , см⁻¹): 1472, 1496, 1604 уш., 1687 (макс.), 2871, 2934, 2963. Спектр ЯМР ¹H (CDCl₃, δ , м. д.): 1,11 с (3H, CH₃); 1,12 с (3H, CH₃); 2,37 с (2H, CH₂ цикла); 2,79 с (2H, CH₂ цикла); 2,79 д. д (1H, CH_αH_β изокс., ²J 17,0, ³J 9,0 Гц); 3,25 д. д (1H, CH_αH_β изокс., ²J 17,0, ³J 11,0 Гц); 3,51 д. д (1H, CH_αH_β, ²J 15,0, ³J 7,5 Гц); 3,69 д. д (1H, CH_αH_β, ²J 15,0, ³J 8,5 Гц); 4,45 т (1H, CH, ³J 8,0 Гц); 5,44 д. д (1H, CH изокс., ³J₁ 11,0, ³J₂ 9,0 Гц); 7,22–7,33 м (10H_{аром}). Спектр ЯМР ¹³C (CDCl₃, δ , м. д.): 28,13 (CH₃); 28,36 (CH₃); 28,95 (CH₂); 35,52 (C); 36,70 (CH₂); 42,54 (CH); 44,09 (CH₂); 52,32 (CH₂); 81,90 (CH_{изокс}); 113,85 (C); 125,84 (2CH_{аром}); 127,54 (CH_{аром}); 127,83 (2CH_{аром}); 127,98 (CH_{аром}); 128,56 (2CH_{аром}); 128,82 (2CH_{аром}); 138,66 (C); 140,81 (C); 158,65 (C); 159,29 (C); 180,75 (C); 192,44 (C). C₂₆H₂₆N₂O₃. Масс-спектр (APCI): *m/z* 415 [MH]⁺.

6,6-Диметил-4-оксо-N-фенил-3-[2-фенил-2-(5-фенилизоксазол-3-ил)этил]-4,5,6,7-тетрагидроиндазол-1-карбоксамид (9). Выход 42 %. Т. пл. 172–174 °С. ИК спектр (ν , см⁻¹): 1385, 1395, 1448, 1473, 1530 (макс.), 1603 уш., 1676, 1743, 2872, 2938, 2962, 3030, 3062, 3112. Спектр ЯМР ¹H (CDCl₃, δ , м. д.): 1,08 с (3H, CH₃); 1,11 с (3H, CH₃); 2,37 АВ-«квартет» (2H, CH₂ цикла); 3,20 АВ-«квартет» (2H, CH₂ цикла); 3,68 д. д (1H, CH_αH_β, ²J 15,0, ³J 7,5 Гц); 3,83 д. д (1H, CH_αH_β, ²J 15,0, ³J 8,5 Гц); 4,88 т (1H, CH, ³J 8,0 Гц); 6,43 с (1H_{изокс}); 7,16 т.т (1H_{аром}, ³J 7,5, ⁴J 1,0 Гц); 7,23 т. т (1H_{аром}, ³J 7,5, ⁴J 1,0 Гц); 7,30–7,37 м (4H_{аром}); 7,39–7,43 м (5H_{аром}); 7,51 д. д (2H_{аром}, ³J 9,0, ⁴J 1,5 Гц); 7,71–7,72 узк. м (2H_{аром}); 9,05 с [1H, C(O)NHPh]. Спектр ЯМР ¹³C (CDCl₃, δ , м.д.): 28,21 (CH₃); 28,55 (CH₃); 32,28 (CH₂); 35,27 (C); 37,69 (CH₂); 41,96 (CH); 52,37 (CH₂); 99,05 (CH_{изокс}); 118,70 (C); 119,70 (2CH_{аром}); 124,82 (CH_{аром}); 125,70 (2CH_{аром}); 127,13 (CH_{аром}); 127,43 (C); 127,95 (2CH_{аром}); 128,65 (2CH_{аром}); 128,86 (2CH_{аром}); 129,14 (2CH_{аром}); 130,01 (CH_{аром}); 136,27 (C); 140,97 (C); 147,33 (C); 151,21 (C); 152,78 (C); 166,26 (C); 169,59 (C); 193,67 (C). C₃₃H₃₀N₄O₃. Масс-спектр (APCI, ESI): *m/z* 412 [M – C(O)NHPh + 2]⁺.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № X13M-046).

Литература

1. Пашковский Ф. С., Донцу Ю. С., Рубинов Д. Б. и др. // Докл. НАН Беларуси. 2013. Т. 57, № 4. С. 68–72.
2. Pashkovsky F. S., Dontsu J. S., Rubinov D. B., Lakhvich F. A. // ХГС. 2014. № 10. С. 1545–1556.
3. Пашковский Ф. С., Донцу Ю. С., Рубинов Д. Б. и др. // ЖОрХ. 2014. Т. 50, вып. 11. С. 1612–1626.
4. Ахрем А. А., Лахвич Ф. А., Хрипач В. А. // ХГС. 1981. № 9. С. 1155–1173.
5. Лахвич Ф. А., Королева Е. В., Ахрем А. А. // ХГС. 1989. № 4. С. 435–453.
6. Pinho e Melo, Teresa M. V. D. // Curr. Org. Chem. 2005. Vol. 9, N 10. P. 925–958.
7. Namboothiri I. N. N., Rastogi N. // Top. Heterocycl. Chem. 2008. Vol. 12. P. 1–44.
8. Nitrile Oxides, Nitrones, and Nitronates in Organic Synthesis / Ed. H. Feuer. – 2nd ed. Wiley, 2008. – 768 p.
9. Лахвич Ф. А., Королева Е. В. // ЖОрХ. 1999. Т. 35, вып. 12. С. 1749–1781.
10. Kozikovskiy A. P. // Acc. Chem. Res. 1984. Vol. 17, N 12. P. 410–416.
11. Rubinov D. B., Rubinova I. L., Akhrem A. A. // Chem. Rev. 1999. Vol. 99, N 4. P. 1047–1065.
12. Хлебникова Т. С., Исакова В. Г., Лахвич Ф. А., Курман П. В. // ХГС. 2008. № 3. С. 393–403.
13. Cerecetto H., Gerpe A., Gonzalez M. et al. // Mini-Rev. Med. Chem. 2005. Vol. 5, N 10. P. 869–878.
14. Пантюхин А. А., Першина Н. Н., Баландина С. А. и др. // Хим.-фарм. журн. 2013. Т. 47, № 4. С. 17–19.
15. Lamberth C. // Heterocycles. 2007. Vol. 71, N 7. P. 1467–1502.

F. S. PASHKOVSKY, Yu. S. DONTSU, F. A. LAKHVICH

pashkovsky61@mail.ru

NITRILE OXIDE APPROACH TO THE SYNTHESIS OF TETRAHYDROBENZISOXAZOLE AND TETRAHYDROINDAZOLE DERIVATIVES WITH ADDITIONAL HETEROCYCLIC PHARMACOPHORE FRAGMENT

Summary

Nitrile oxide approach to the synthesis of tetrahydrobenzisoxazole and tetrahydroindazole derivatives with additional isoxazole (isoxazoline) pharmacophoric moiety is developed. Bis-heterocyclic derivatives obtained and related compounds are of interest as new compounds possessing potent anticancer, anti-inflammatory, analgesic and antimicrobial activity.

УДК 541.183

Л. В. ДИХТИЕВСКАЯ

СОЛЮБИЛИЗАЦИЯ НЕПОЛЯРНЫХ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ И УГЛЕВОДОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ИОНОГЕННЫХ ФТОРИРОВАННЫХ И УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ*(Представлено членом-корреспондентом Ф. Ф. Можейко)**Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск**Поступило 01.12.2014*

Введение. Солюбилизация, или коллоидное растворение олеофильных органических соединений в мицеллярных растворах поверхностно-активных веществ (ПАВ) является основой многих технологических и биологических процессов. Поэтому этот процесс и сопутствующие ему явления составляют предмет серьезного и систематического изучения [1–4]. Солюбилизации в системах, включающих в качестве одного из компонентов фторуглеродное соединение, уделено недостаточно внимания [5–7]. Хотя эти вопросы интересны как в научном, так и практическом плане в связи с развитием мицеллярного катализа, эмульсионной полимеризации и др.

Цель работы – исследование солюбилизации перфторированных ароматических и алифатических соединений и их нефторированных аналогов в водных растворах ионогенных углеводородных и фторуглеродных ПАВ.

Материалы и методы исследования. В качестве солюбилизаторов использованы органические жидкости: бензол (C_6H_6), октан (C_8H_{18}) и их фторированные аналоги – перфторбензол (C_6F_6), перфтороктан (C_8F_{18}). В качестве солюбилизаторов (коллоидных растворителей) использованы анионоактивные ПАВ – натриевые соли алифатических кислот (гептановой, нонановой, лауриновой, олеиновой) и перфторалифатических кислот (перфторгептановой, перфторнонановой, перфторлауриновой). В качестве катионоактивных ПАВ – додециламмония гидрохлорид, гексадецилтриметиламмония бромид и гептадекафтордецилметилдиэтилоламмония иодид.

Коллоидную растворимость олеофильных органических жидкостей в водных растворах ПАВ определяли рефрактометрическим методом, основанном на правиле аддитивности удельной рефракции компонентов системы [8]. При солюбилизации углеводородных жидкостей, имеющих более высокий показатель преломления (n), чем вода и водные растворы ПАВ, наблюдается увеличение n системы. Но растворение фторуглеродных жидкостей, показатель преломления которых ниже, чем у воды, приводит к обратному эффекту – уменьшению n системы. Измерения показателя преломления проводили на рефрактометре ИРФ-23, снабженном источником света с ртутно-натровой лампой. Абсолютная ошибка в определении n составляет $(1-2) \cdot 10^{-5}$.

Рефрактометрические исследования солюбилизации проведены в изотермических условиях при 20 °С. Водный раствор ПАВ с органической жидкостью, взятой в заведомо большем (на 10–20 %) количестве, чем нужно для насыщения, встряхивали в течение 20 мин и затем выдерживали до установления равновесия. Продолжительность выдержки определяли по зависимости n от времени. Система считалась равновесной, если ее показатель преломления не изменялся во времени. В наших опытах системы выдерживались большее время, чем требуется для насыщения, что обеспечивало заведомо равновесные значения коллоидной растворимости.

Результаты рефрактометрических измерений представлены в виде зависимостей удельной растворимости, выраженной в граммах солюбилизатора на 100 мл раствора ПАВ и молярной солюбилизации, выраженной в молях солюбилизатора на моль мицеллярного ПАВ (рис. 1–4).

При рассмотрении солиubilизации неполярных углеводородных (бензол, октан) и фторуглеродных (перфторбензол, перфтороктан) соединений в растворах углеводородных ПАВ анионного (рис. 1) и катионного типов (рис. 2) можно отметить следующие особенности. В растворах исследованных углеводородных ПАВ наблюдается достаточно высокая растворимость углеводородных солиubilизаторов. Например, в мицеллярных растворах лаурата натрия солиubilизируется 1 моль бензола, а в растворах додециламмония гидрохлорида – 2 моля бензола на моль мицеллярного ПАВ. Исследование систем, содержащих фторированный солиubilизатор, в частности, перфторбензол, показывает, что в растворах низших членов гомологического ряда – гептаноате и нонаноате натрия перфторбензол не солиubilизируется, но в растворах типичных мылоподобных ПАВ с числом атомов углерода в цепи 12 и более солиubilизация перфторбензола имеет место. В водных растворах углеводородных ПАВ неполярные углеводородные жидкости растворяются в значительно больших количествах, чем соответствующие фторированные аналоги. Растворение углеводородных солиubilизаторов начинает проявляться при концентрациях ПАВ, меньших их критической концентрации мицеллообразования (ККМ), а их фторированных аналогов – при концентрациях выше ККМ ПАВ.

В растворах ионных фторированных ПАВ как анионных (натриевых солей перфторалифатических кислот, рис. 3), так и катионных (гептадекафтордецилметилдиэтиллоаммония йодида, рис. 4) наблюдается абсолютное отсутствие солиubilизации углеводородных солиubilизаторов – бензола и октана. Подобный факт с чисто качественной стороны был отмечен в [9]. Вместе с тем наблюдается достаточно большая, резко нарастающая в гомологическом ряду ФПАВ от 0,1 моль/моль для перфторгептаноата до 3 моль/моль для перфторундеканоата растворимость перфторбензола. Коллоидное растворение фторированных солиubilизаторов начинается при концентрациях ФПАВ, превышающих их ККМ.

Сопоставление коллоидной растворимости углеводородных и фторуглеродных неполярных веществ в водных растворах мицеллообразующих углеводородных и фторированных ПАВ дает возможность отметить главные особенности систем, содержащих фторуглеродный компонент. Основная особенность состоит в неспособности фторированных ПАВ, в отличие от углеводородных, растворять неполярные углеводородные жидкости. Фторуглеродные же органические

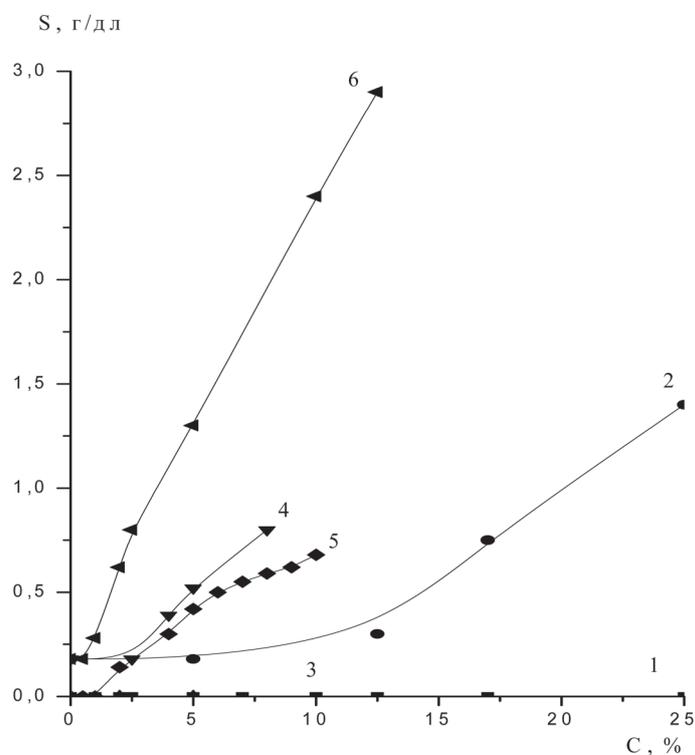


Рис. 1. Концентрационная зависимость общей растворимости перфторбензола (1, 3, 5) и бензола (2, 4, 6) в водных растворах гептаноата (1, 2), нонаноата (3, 4), лаурата натрия (5, 6)

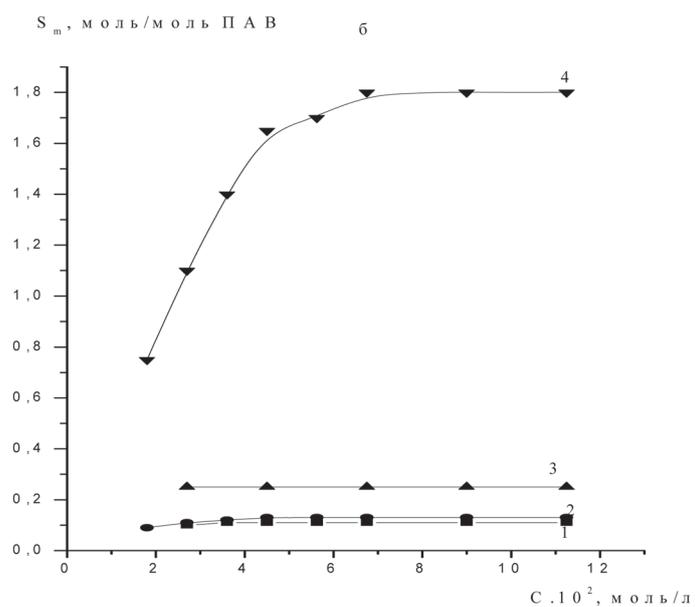
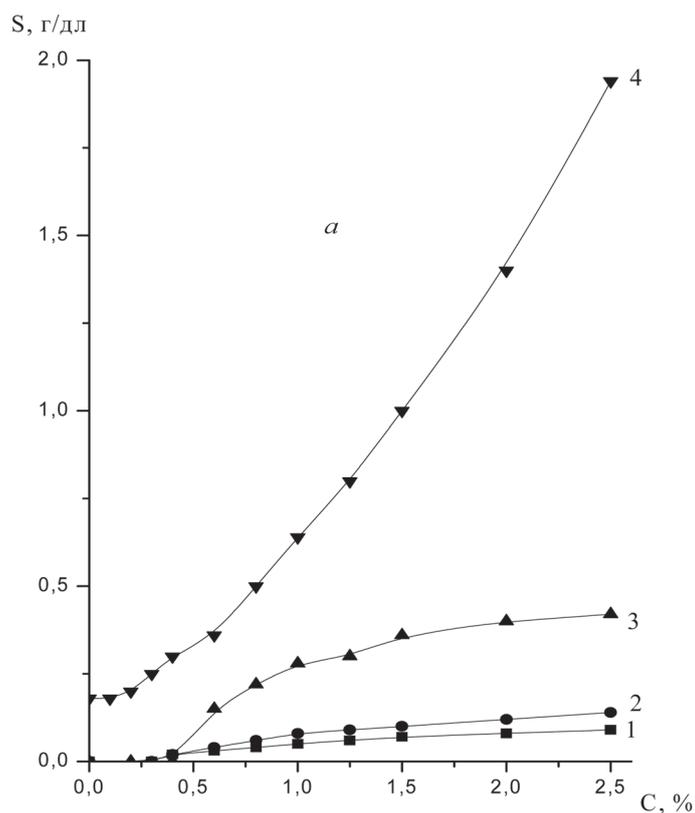


Рис. 2. Концентрационная зависимость общей (а) и молярной (б) растворимости:
 1 – перфтороктана, 2 – октана, 3 – перфторбензола, 4 – бензола в водных растворах додециламмония хлорида

жидкости сольбилизируются как в мицеллярных растворах фтортензидов, так и в растворах типичных мицеллообразующих ПАВ углеводородного типа. Вторая особенность заключается в том, что бензол и октан, растворяясь в растворах углеводородных ПАВ, как правило, приводят к смещению ККМ в область более низких концентраций. Фторированные же органические жидкости неполярного типа сольбилизируются при концентрациях, значительно превышающих ККМ ПАВ (табл. 1).

Обнаруженные различия в сольбилизирующей способности углеводородных и фторированных ПАВ по отношению к углеводородным и фторуглеродным неполярным жидкостям можно

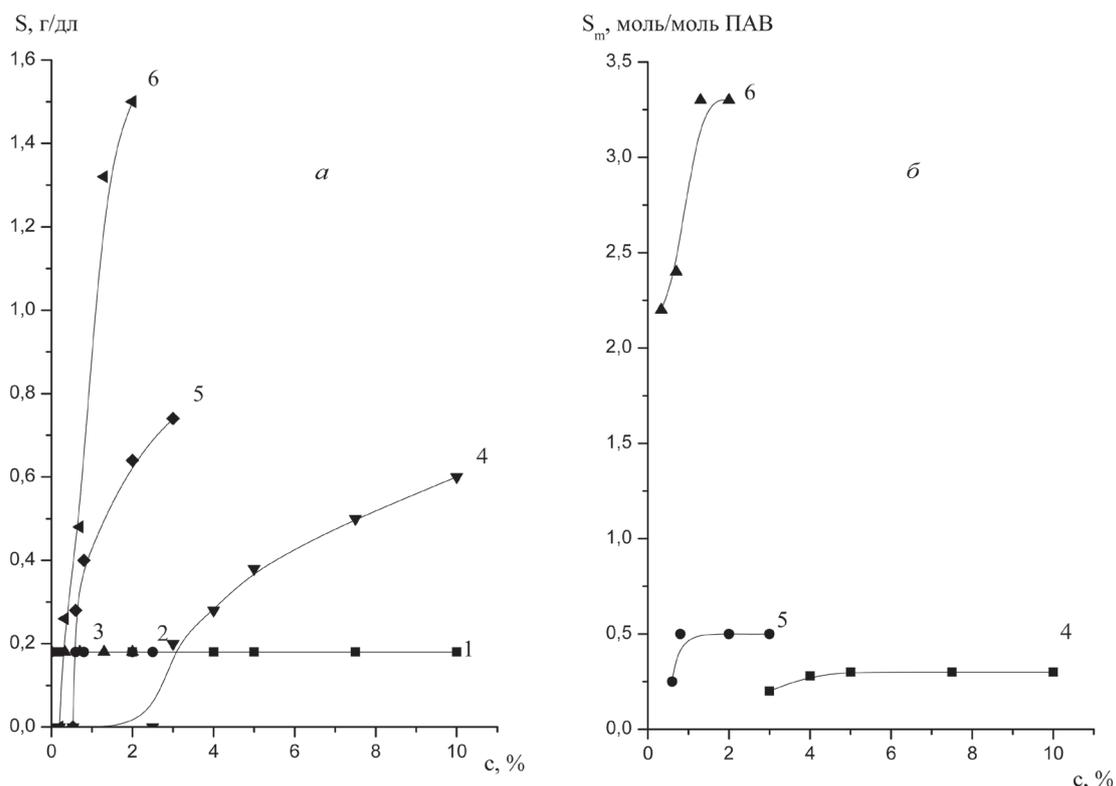


Рис. 3. Концентрационная зависимость общей (а) и молярной (б) растворимости: 1–3 – бензола, 4–6 – перфторбензола в водных растворах перфторгептаноата (1, 4), перфторнонаноата (2, 5), перфторлаурата натрия (3, 6)

объяснить, опираясь на данные о сродстве молекул фторуглеродов и углеводородов к молекулам воды [10]. Фтор, являясь одним из наиболее реакционно-способных элементов, дает с углеродом стабильные соединения. Атомы углерода находятся в них в состоянии крайней степени окисления, давая прочную связь между С и F. Соединения углерода с фтором обнаруживают сугубо нейтральный или неполярный характер, который проявляет себя в форме слабых межмолекулярных взаимодействий.

Абсолютная несовместимость углеводородов и фторированных ПАВ, находящихся в водной фазе, обусловлена более высоким сродством углеводородных соединений к воде, чем к фторированным цепям ФПАВ. Что же касается самих фторуглеродов, способных сольбилизоваться в мицеллах углеводородных ПАВ, то это указывает на их более слабое сродство к воде, чем к углеводородным цепям ПАВ. Это обеспечивает их частичное растворение в мицеллярных системах, образованных углеводородными ПАВ.

Наблюдаемый сдвиг ККМ ПАВ в область больших концентраций при сольбилизации фторуглеродных неполярных соединений, в противоположность сдвигу в область меньших концентраций под действием углеводородных аналогов (табл. 1), можно объяснить ослаблением когезионного взаимодействия между гидрофобными радикалами в мицеллах при

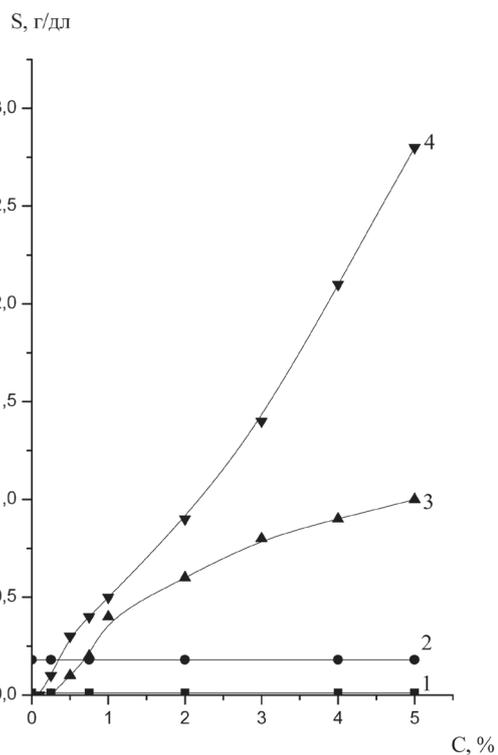


Рис. 4. Концентрационная зависимость общей растворимости: 1 – октана, 2 – бензола, 3 – перфтороктана, 4 – перфторбензола в водных растворах катионного ФПАВ – гептадекафтордецилметилдиэтилоламмония иодида

внедрении в них сильно гидрофобных фторированных солибилизаторов. Кроме того, определенную роль играют также размеры фторуглеродов, значительно превосходящие по величине молекулы углеводородов (ковалентный радиус атома фтора в 1,5 раза больше атома водорода). Начало мицеллообразования при ослабленных силах взаимодействия должно сдвигаться в сторону более высоких концентраций.

Кроме различий в солибилизирующей способности ПАВ по отношению к неполярным углеводородным и фторированным веществам установлено также различие в локализации молекул бензола и гексафторбензола в мицеллах ионогенных алифатических ПАВ [11]. Эти результаты получены на основе ПМР-спектроскопических исследований по смещению сигналов протонов групп ПАВ под действием солибилизатора (табл. 2).

Таблица 1. Изменение ККМ ПАВ под действием солибилизаторов

ПАВ	Солибилизат	ККМ ПАВ, %	ККМ ПАВ с солибилизатором, %
$C_6F_{13}COONa$	C_6F_6	2,93	3,10
$C_8F_{17}COONa$	C_6F_6	0,78	0,90
$C_{10}F_{21}COONa$	C_6F_6	0,18	0,22
$C_6H_{13}CCONa$	C_6H_6	11,80	8,00
$C_8H_{17}COONa$	C_6H_6	1,17	0,85
$C_{12}H_{25}COONa$	C_6H_6	0,52	0,40
$C_{12}H_{25}COONa$	C_6F_6	0,52	0,80
$C_{12}H_{25}NH_3Cl$	C_6H_6	0,27	0,20
$C_{12}H_{25}NH_3Cl$	C_6F_6	0,27	0,33

Таблица 2. Смещение сигналов ($\Delta\tau$, м. д.) протонных групп ПАВ при солибилизации бензола и гексафторбензола

ПАВ	Химический сдвиг групп, м. д.			
	$N(CH_3)_3$	$\alpha-CH_2-$	$(-CH_2-)_n$	$-CH_3$
<i>Бензол C_6H_6</i>				
Додециламмония гидрохлорид $C_{12}H_{25}NH_3Cl$	–	0,08	0,06	0,05
Гексадецилтриметиламмония бромид $C_{16}H_{33}N(CH_3)_3Br$	0,19	0,42	0,13	0,12
Натрия лаурат $C_{11}H_{23}COONa$	–	0,04	0,08	0,08
Натрия олеат $C_{17}H_{33}COONa$	–	0,08	0,13	0,16
<i>Гексафторбензол C_6F_6</i>				
Додециламмония гидрохлорид $C_{12}H_{25}NH_3Cl$	–	0,00	0,04	0,08
Гексадецилтриметиламмония бромид $C_{16}H_{33}N(CH_3)_3Br$	0,00	0,00	0,06	0,11
Натрия лаурат $C_{11}H_{23}COONa$	–	0,00	0,03	0,06
Натрия олеат $C_{17}H_{33}COONa$	–	0,00	0,05	0,09

Видно, что молекулы бензола при солибилизации в растворах углеводородных ПАВ распределяются по всему объему мицелл – смещение сигналов имеет место для всех групп. В случае катионных ПАВ наблюдается преимущественное сосредоточение молекул бензола в поверхностном слое. В случае анионных ПАВ наблюдается противоположный эффект – в поверхностном слое с отрицательно заряженными группами концентрация бензола ниже, чем во внутренних областях. Что касается углеводородного ядра мицелл, то в нем молекулы бензола распределяются равномерно независимо от типа полярной группы ПАВ. Совершенно иная картина наблюдается при солибилизации гексафторбензола. Внедрение молекул этого солибилизатора в мицеллы, не вызывая смещения сигналов углеводородных атомных групп, соединенных непосредственно с полярной «головкой» молекул ПАВ, вызывает определенное смещение сигналов метиленовых групп, которые находятся в середине углеводородной цепи, и вдвое большее смещение сигналов

концевых метильных групп. Тип полярной группы никак не сказывается на общем характере изменений значений при переходе от «головных» групп к «хвостовым». Таким образом, распределение молекул перфторбензола в мицеллах алифатических ПАВ крайне неравномерно. Поверхностный слой мицелл совсем не содержит молекул солюбилизата, а в углеводородном ядре его концентрация увеличивается от периферических областей к центру мицеллы. Если иметь в виду не сферическую, а пластинчатую или слоистую модель мицеллы, то следует говорить о концентрировании солюбилизированного перфторбензола в середине гидрофобной прослойки бимолекулярного слоя ПАВ.

Заключение. Таким образом, исследование солюбилизации в системах, содержащих фторуглеродный компонент, указывает на своеобразии и особый характер их свойств, что обусловлено чрезвычайно высокой гидрофобностью, меньшим сродством к молекулам воды, чем к углеводородным радикалам ПАВ, а также значительными размерами фторуглеродных неполярных соединений.

Литература

1. *McBain M. E. L., Hutchinson E.* Solubilization and related phenomena. N.-Y., 1955.
2. *Ребиндер П. А.* // Успехи коллоид. химии. М., 1973. С. 9–29.
3. Мицеллообразование, солюбилизация и микроэмульсии / под ред. К. Миттел. М., 1980.
4. *Митина Т. Д., Дихтievская Л. В., Можейко Ф. Ф.* // ЖПХ. 2000. Т. 73, № 10. С. 1631–1635.
5. *Маркина З. Н., Задымова Н. М., Щукин Е. Д.* и др. // Коллоид. журн. 1987. Т. 49, № 6. С. 1084–1088.
6. *Treiner C., Chattopadhyay A. K.* // J. Coll. Inter. Sci. 1984. Vol. 98, N 2. P. 447–458.
7. *Задымова Н. М., Цикурина Н. Н., Потешнова М. У.* // Коллоид. журн. 2003. Т. 65, № 3. С. 347–351.
8. *Юрженко А. И.* // Журн. общ. химии. 1946. Т. 16, № 8. С. 1171–1187.
9. *Николаев А. Ф., Зеленкова Т. Н., Панич Р. М., Белгородская К. В.* // Коллоид. журн. 1968. Т. 30, № 6. С. 867–870.
10. *Макаревич Н. А., Дихтievская Л. В.* // Журн. физ. химии. 1993. Т. 67, № 3. С. 542–544.
11. *Ларченко В. Е., Дихтievская Л. В., Шиц Л. А., Маркина З. Н.* // Докл. Академии наук СССР. 1977. Т. 233, № 2. С. 417–419.

L. V. DIKHTIEVSKAYA

dixti@yandex.ru

SOLUBILIZATION OF NONPOLAR FLUOROCARBON AND HYDROCARBON SUBSTANCES IN AQUEOUS SOLUTIONS OF FLUORINATED AND HYDROCARBON SURFACTANTS

Summary

Solubilizing capacity of aqueous micellar solutions of fluorinated and hydrocarbon surfactants in relation to nonpolar fluorocarbon and hydrocarbon substances has been investigated. It has been shown that fluoroorganic nonpolar liquid are solubilized in solutions of fluorinated and hydrocarbon surfactants. Absolute incompatibility of hydrocarbon solubilizate and ionic surfactant has been found. Detected features of systems containing fluorocarbon component are explained according to affinity of fluorocarbons and hydrocarbons molecules to water molecules.

УДК 678.643.42.5:667.6:620.18

В. Д. КОШЕВАР

СТАБИЛИЗАЦИЯ ВОДНОЙ ДИСПЕРСИИ ЭПОКСИДНОГО ОЛИГОМЕРА
МИКРОЧАСТИЦАМИ ОРГАНИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

(Представлено членом-корреспондентом Н. Р. Прокочуком)

Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск

Поступило 26.11.2014

Введение. Одно из ведущих мест в ассортименте прогрессивной продукции для строительного назначения занимают материалы, использующие в качестве связующего звена водные дисперсии (ВД) промышленных полимеров [1–3]. Такие пленкообразователи имеют ряд ценных свойств по сравнению с традиционными: экологическая безопасность (отсутствие органических растворителей); пожаро- и взрывобезопасность; возможность разбавления водой; простота нанесения; очистка оборудования водными растворами; высокая адгезия к влажным основаниям и высокие защитные свойства покрытий; значительная экономия на системах вентиляции. Сравнительный анализ стоимости получаемых покрытий показывает, что при формировании их из водных систем расходуется меньше энергии, чем при нанесении слоев из органоразбавляемых композиций. В последнее время разработан ряд самопроизвольно диспергирующихся эпоксидных смол (ЭС) для лакокрасочной промышленности. Это – эпоксисмолы, модифицированные введением в молекулу гидрофильных фрагментов. Некоторые из этих смол эмульгируются в форме высокодисперсных эмульсий или дисперсий с размером частиц 0,1–1,0 мкм [1]. Однако из-за высокой гидрофильности получаемые на их основе покрытия обладают невысокими защитными свойствами. Немодифицированные эпоксидные олигомеры (ЭО) являются более гидрофобными, чем указанные выше, но для перевода их в водоразбавляемую форму необходимо ввести специальный эмульгатор и дополнительно вещество, выполняющее функции стабилизатора системы [1]. Получаемые при этом дисперсии или эмульсии имеют размеры частиц преимущественно до 4–10 мкм и склонны к медленной агломерации, но зато образуют покрытия с высокими защитными параметрами.

Цель работы – исследовать возможность повышения агрегативной и седиментационной устойчивости водных дисперсий промышленного эпоксидного олигомера с применением твердых гидрофобных или частично гидрофилизированных микрочастиц органического происхождения.

Материалы и методы исследования. При исследовании применяли следующие вещества: технический ЭО марки ЭД-20 (ГОСТ 10687–84); эмульгатор – неионогенный ПАВ с 28 молями этиленоксидных групп (Emulsogen LCN 287 фирмы Clariant (Финляндия)); стабилизирующие агенты – водные дисперсии акрил-метакрилового (АМ), бутадиен-стирольного (БС), стирол-акрилатного (СА), полиметилсилоксанового (ПМС) высокомолекулярных соединений. Некоторые характеристики используемых дисперсий полимеров приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры стабилизирующих агентов

Вид дисперсий сополимеров	Средний размер частиц, мкм	Ионное регулирование	Величина pH
АМ	0,15	анионное	9,0
БС	0,14	анионное	5,5
СА	0,1	анионное	7,5
ПМС	0,1	анионное	3,5

Методом прямого диспергирования ЭО с помощью механического лабораторного диспергирующего устройства марки ЛДУ-3МПР (Россия) в режиме биссерной мельницы и в присутствии эмульгатора LCN 287 при комнатной температуре получали 60 %-ные ВД ЭО. При такой концентрации дисперсной фазы формировались эмульсии масло/вода (М/В) наиболее высокой агрегативной устойчивости [4]. Время диспергирования во всех случаях составляло 20 мин, скорость вращения дисков диспергатора 7000 об/мин, количество введенного эмульгатора 4 мас. % от массы дисперсной фазы. Содержание стабилизатора варьировали в зависимости от его химической природы в диапазоне 0,5–4 мас. % по отношению к ЭО. Стабилизаторы вводили непосредственно после диспергирования при скорости вращения мешалки 1000 об/мин.

Гранулометрический состав дисперсий определяли с помощью фотометрического седиментометра ФСХ-4 (Россия) (диапазон измерений размера частиц 0,1–300 мкм). Принцип действия прибора основан на применении законов затухания излучения в мутных средах Ламберта–Бера и седиментационного Стокса.

Седиментационную устойчивость полученных дисперсий изучали также методом коллективного оседания [5]. Для этого их помещали в мерные герметически закрывающиеся цилиндры объемом 50 мл одинакового диаметра и вели наблюдение за движением границы раздела между двумя зонами – дисперсионной средой и осаждаемой дисперсией. Это дало возможность построить графическую зависимость объемной доли нижней зоны от продолжительности оседания. Точка перелома на кривой этой зависимости (переход наклонной линии в горизонтальную) соответствует времени полного оседания (ВПО).

Электрокинетический потенциал исследуемых систем определяли методом электрофореза с использованием автоматической установки микроэлектрофорометр Zetaphorometer 4 фирмы «CAD Instrumentation» (Франция). Расчет ζ -потенциала осуществляли по уравнению Гемгольца–Смолуховского [6] при помощи программного обеспечения Zeta Cad. Дисперсии для измерения готовили с методом последовательного разбавления их бидистиллированной водой. Измерения проводили при температуре 20 ± 2 °С.

Структурно-реологические исследования ВД проводили на ротационном вискозиметре «Реотест-2» (Германия). Измерительная ячейка прибора состояла из коаксиальных цилиндров с отношением диаметров 1,62. Скорость деформации изменяли в диапазоне 0,33–145,8 с⁻¹. Точность измерений ± 3 %.

В проходящем свете с помощью оптического микроскопа ММВ-2300 (RR USS OPTROMS, Германия) были получены фотоснимки изучаемых водных дисперсий через сутки после эмульгирования при увеличении $\times 200$.

Результаты и их обсуждение. Полученные 60 %-ные дисперсии ЭО–ПАВ и ЭС–ПАВ–латекс являются дисперсиями первого рода, т. е. М/В. Доказательством этому является значительное (в 1000 раз) повышение электропроводности дисперсий по сравнению с растворами смолы, хорошая растворимость в них красителя метиленового голубого и разбавляемость систем водой. Введение неионогенного ПАВ в систему ЭО–Н₂О существенно облегчает ее эмульгирование и увеличивает продолжительность «жизни» от нескольких часов до 7 суток (до этого времени признаков расслоения дисперсной системы ЭО–ПАВ не наблюдается). ВПО данной дисперсии составляет 14 сут.). В табл. 2 приведен гранулометрический состав водной дисперсии ЭС–ПАВ.

Таблица 2. Фракционный состав водной дисперсии, полученной эмульгированием ЭС в присутствии неионогенного ПАВ

Показатель	Распределение масс капель по размерам						
	1–5	5–7	7–10	10–40	40–100	100–180	180–250
мкм	1–5	5–7	7–10	10–40	40–100	100–180	180–250
%	77,7	0,8	1,5	4,3	4,8	5,5	5,4

Как следует из данных табл. 2, полученная 60 %-ная водная дисперсия эпоксидного олигомера имеет низкую степень полидисперсности с существенным преобладанием фракции 1–5 мкм.

Гранулометрический состав дисперсий ЭС, стабилизированных латексом АМ, приблизительно соответствует таковому для ЭО–ПАВ, не содержащей добавку латекса (рис. 1, а). При введении твердых микрочастиц другой химической природы (КБС, СА, ПМС) картина заметно ухудшается – преобладают массы более крупных частиц (40–250 мкм) (61,6–73,6 %) (рис. 2, б–г).

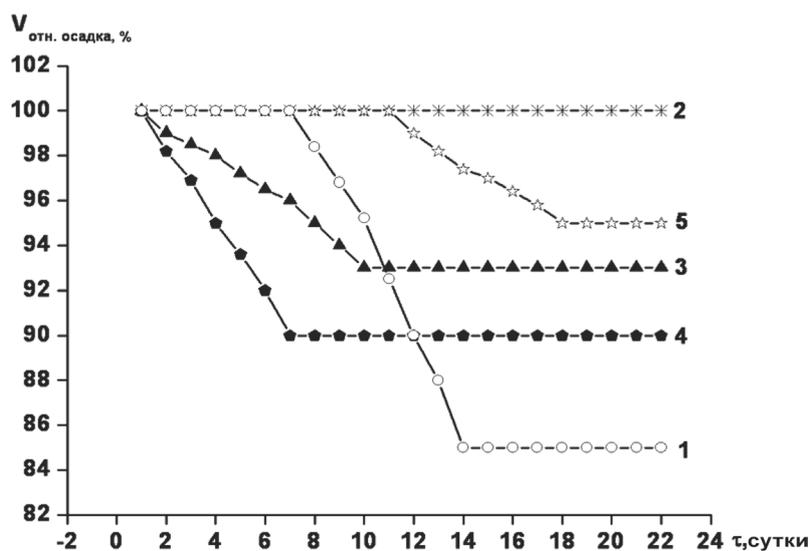


Рис. 1. Кинетические кривые оседания дисперсной системы ЭО–ПАВ без стабилизатора (1) и стабилизированной латексами: 2 – АМ; 3 – КВС; 4 – СА; 5 – ПМС

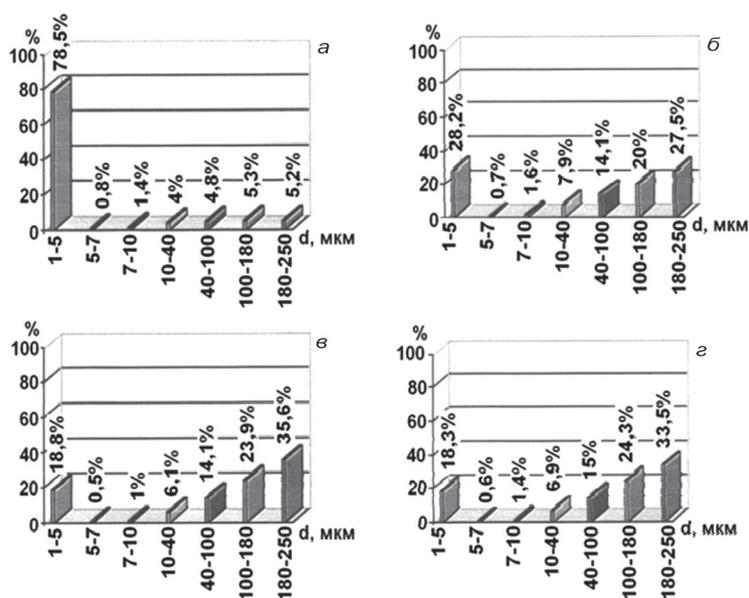


Рис. 2. Распределение масс частиц по размерам в дисперсиях системы ЭС–ПАВ, стабилизированных латексами: АМ (а); КВС (б); СА (в); ПМС (г). Концентрация введенных латексов 1 % по сухому веществу относительно содержания эпоксидного олигомера

На рис. 2 приведены кинетические кривые оседания контрольной и смешанных дисперсий ЭС. Из рис. 2 следует, что особенно высокую стабилизирующую активность при получении водных дисперсий эпоксидной смолы проявляет дисперсия полимера АМ. Стабилизированные им дисперсии хранятся в течение 6–12 месяцев без видимых признаков расслоения. Стабилизирующее действие, хотя и менее значительное, чем АМ, проявляют и микрочастицы ПМС. Введение других видов дисперсий полимеров, наоборот, несколько сокращает начальное время расслоения по сравнению с контрольным образцом, однако объем осадка стабилизируется на значениях 90 % (СА) и 93 % (КВС), что превышает его значение для нестабилизированной дисперсии ЭО (84 %).

Для выяснения причин такого различного характера действия полимеров на устойчивость дисперсной системы ЭО–ПАВ регистрировали фотоснимки смешанных дисперсий в проходящем свете, измеряли их дзета-потенциалы и изучали реологическое поведение под действием механических нагрузок на сдвиг (рис. 3, 4 и табл. 3)

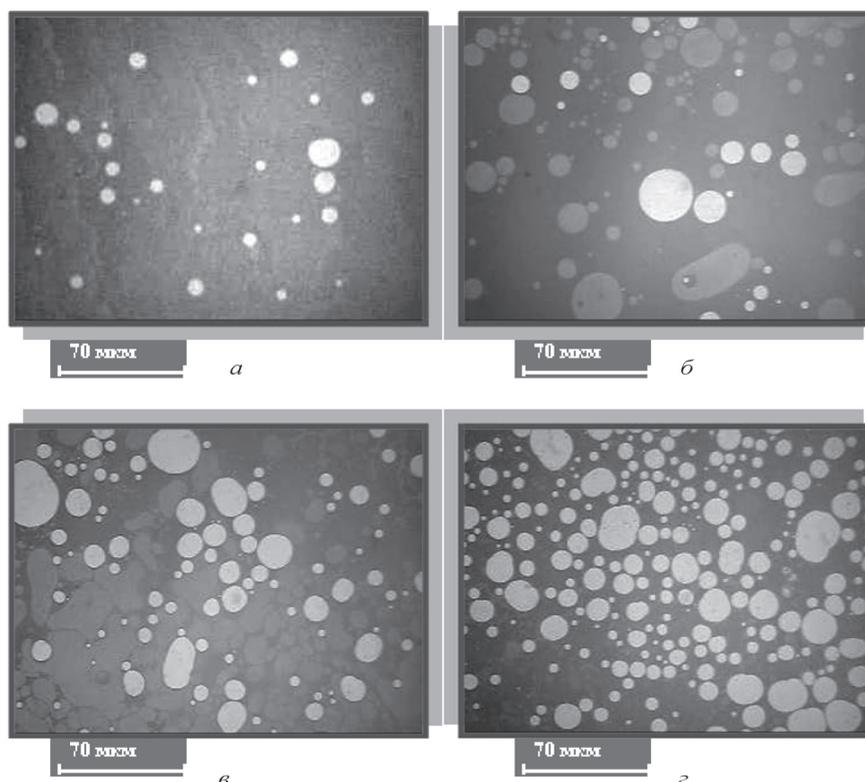


Рис. 3. Микрофотографии дисперсий ЭС, стабилизированных латексами: АМ (а); КБС (б); СА (в); ПМС (г)

Дисперсия, стабилизированная АМ, состоит из капель смолы округлой формы, средний размер которых составляет $\sim 1\text{--}5$ мкм (рис. 3, а). Использование в качестве стабилизаторов латексов КБС, СА или ПМС приводит к образованию более грубодисперсных систем, состоящих из сферических или овальных глобул и агломератов (рис. 3, б–г). Ввиду, по-видимому, недостаточной разрешающей способности микроскопа не удалось наблюдать месторасположение частиц латексов, которые более чем на порядок меньше по размерам капель ЭС.

Таблица 3. Электрокинетические потенциалы стабилизирующих агентов, индивидуальной и смешанных дисперсий

Объект исследования	ξ -потенциал, мВ	Количество частиц в единице объема
<i>ВД индивидуальных латексов</i>		
АМ	-10,52	138
СА	-63,0	177
КБС	-64,01	180
ПМС	-40,05	176
<i>60 %-ные ВД ЭО, стабилизированные латексами</i>		
ЭС+ПАВ	-12,10	271
ЭС+ПАВ+АМ	-38,22	298
ЭС+ПАВ+ПМС	-27,67	249

Из табл. 3, где приведены данные дзетофорометрии, следует, что наиболее высокой стабилизирующей способностью обладают полимерные дисперсии, имеющие более низкий отрицательный ξ -потенциал АМ (-10,52 мВ), ПМС (-40,05 мВ), что, по-видимому, в меньшей степени препятствует сближению одноименно заряженных капель смолы и твердых микрочастиц латексов и росту общего количества частиц в единице объема дисперсионной среды. Для смешанных дисперсий просматривается удовлетворительная корреляция их агрегативной устойчивости с ξ -потенциалом.

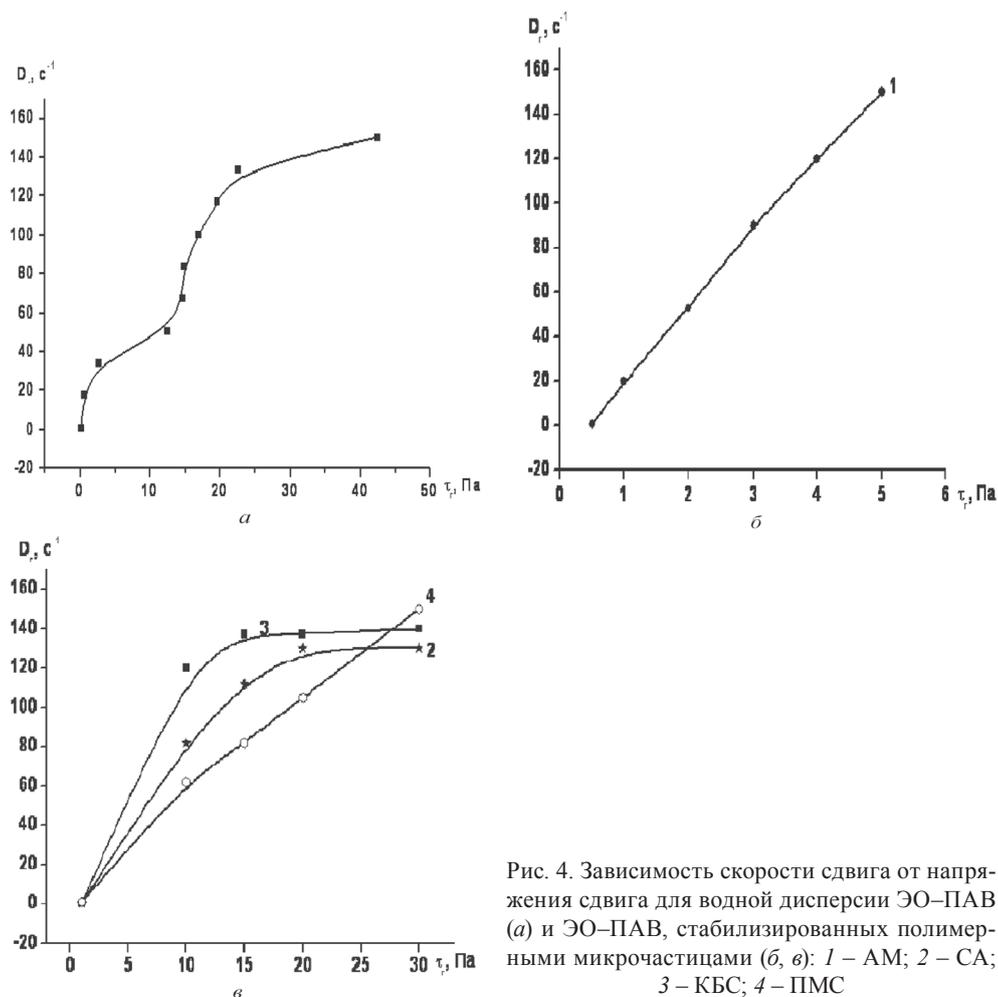


Рис. 4. Зависимость скорости сдвига от напряжения сдвига для водной дисперсии ЭО–ПАВ (а) и ЭО–ПАВ, стабилизированных полимерными микрочастицами (б, в): 1 – АМ; 2 – СА; 3 – КБС; 4 – ПМС

Исследование зависимости скорости деформации (D_p , s^{-1}) от напряжения сдвига (τ , Па) показывает, что дисперсии ЭС–ПАВ относятся к неньютоновским жидкостям с аномальными локальными экстремумами на реологической кривой течения (рис. 4, а). Формы же кривых течения дисперсий с добавками латексов зависят от химической природы и заряда микрочастиц (рис. 4, кривые 1–4). Так, введение в дисперсию ЭО–ПАВ латекса АМ (рис. 4, кривая 1) и в некоторой степени ПМС (рис. 4, кривая 4) приводит к полному снятию аномальных явлений, существующих в бездобавочной дисперсии, и к переходу к ньютоновскому течению.

Таким образом, анализ полученных результатов позволил выявить существование удовлетворительной корреляции между устойчивостью исследуемых дисперсий (рис. 2), их электрокинетическими свойствами и характером зависимости скорости деформации от напряжения сдвига. Повышенная устойчивость ВД ЭС в присутствии микрочастиц некоторых сополимеров объясняется одновременным действием электростатического и структурно-механического факторов устойчивости.

Заключение. Установлен эффект стабилизации водных дисперсий ЭО–ПАВ гидрофилизированными микрочастицами акрилового латекса. Он зависит от химической природы микрочастиц, их ξ -потенциала, ξ -потенциала смешанных дисперсий и массового соотношения ЭО и латексов.

60%-ные дисперсии ЭО–ПАВ, не содержащие стабилизирующих микрочастиц органической природы, представляют собой дилатантные вязкопластичные неньютоновские системы с относительно низкой механической прочностью. Реологическое поведение дисперсии ЭО–ПАВ с введенными частицами латексов определяется их природой и зарядом: в одних случаях наблюдается сильная пластификация дисперсии (ЭО–ПАВ–АМ), в других – заметное усиление структурирующего эффекта (ЭО–ПАВ–ПМС), в третьих – образование за первые сутки хранения

небольшого количества коагулюма, локализованного на стенках сосуда, и усиление дилатансии (ЭО–ПАВ–КБС, СА).

На основании полученных экспериментальных данных высказаны суждения о вероятном механизме стабилизации ВД ЭО–ПАВ микрочастицами органического происхождения.

Работа частично финансировалась по проекту БРФФИ (грант Х14-012).

Литература

1. *Елисеева В. И.* Полимерные дисперсии. М.: Химия, 1980. – 296 с.
2. *Xinwen Z., Dongliang J.* // *Materials Science and Engineering A*. 2002. Vol. 323, N 1–2. P. 232–238.
3. *Греков А. П., Сухорукова С. А.* // Пластические массы. 1987. № 11. С. 45–47.
4. *Шинкарева Е. В., Кошевар В. Д.* // ЖПХ. 2011. Т. 84, № 3. С. 488–494.
5. Многокомпонентные полимерные системы / под ред. Р. Ф. Голда. М.: Химия, 1974. – 302 с.
6. *Фридрихсберг Д. А.* Курс коллоидной химии. Л.: Химия, 1984. – 368 с.

V. D. KOSHEVAR

koshevar@igic.bas-net.by

STABILIZATION OF WATER DISPERSION OF AN EPOXY OLIGOMER BY MICROPARTICLES OF THE ORGANIC NATURE

Summary

In work it is shown that microparticles of water dispersions of copolymers (synthetic latex) which was entered in small quantities, they have the strong stabilizing effect on emulsions of the epoxy oligomer. Factors of stability of such mixed disperse systems was detected by methods of the dzetaforometriya, the rheology and the optical microscopy.

УДК 547.913:543.544.32

В. Н. ЛЕОНТЬЕВ¹, Н. А. КОВАЛЕНКО¹, Г. Н. СУПИЧЕНКО¹, А. Г. ШУТОВА²,**ЭНАНТИОМЕРЫ МОНОТЕРПЕНОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ
В ЭФИРНЫХ МАСЛАХ РАСТЕНИЙ РОДА *THUJA***

(Представлено академиком А. В. Бильдюкевичем)

¹Белорусский государственный технологический университет, Минск²Центральный ботанический сад НАН Беларуси, Минск

Поступило 01.12.2014

Введение. Широкое использование эфирных масел в производстве пищевых продуктов и лекарственных средств неразрывно связано с вопросами стандартизации растительного сырья и препаратов на его основе. Перспективным методом исследования компонентного состава эфирных масел и фармацевтических продуктов является энантиоселективная газожидкостная хроматография [1]. Хроматографические данные по энантиомерному составу и распределению оптических изомеров являются индивидуальной характеристикой и могут быть использованы для идентификации, установления подлинности и качества эфирных масел и препаратов на их основе [2].

Эфирные масла представителей рода *Thuja* содержат ряд биологически активных компонентов и достаточно широко используются в гомеопатии и фитотерапии благодаря своим иммуномодулирующим и противовирусным свойствам [3]. В литературе имеются сведения о компонентном составе эфирных масел туи различного географического происхождения. Однако эти публикации практически не затрагивают вопросы распределения энантиомеров монотерпеновых соединений [4–6].

Цель работы – установление особенностей распределения энантиомеров монотерпеновых соединений в эфирных маслах туи из коллекции Центрального ботанического сада НАН Беларуси методом газо-жидкостной хроматографии.

Материалы и методы исследования. Объектами исследования являлись эфирные масла следующих видов и сортов туи из коллекции Центрального ботанического сада НАН Беларуси: *T. occidentalis* L. «Hoveyi» (образец № 1), *T. occidentalis* L. «Aureo-variegata» (образец № 2), *T. occidentalis* L. «Globosa» (образец № 3), *T. occidentalis* L. «Lutea» (образец № 4) и *T. plicata* D. Don (образец № 5). Для выделения эфирного масла использовали охвоенные концы ветвей длиной 30–40 см, собранные в осенне-зимний период 2012 г. Эфирные масла получали методом перегонки с водяным паром. Разделение энантиомеров компонентов эфирного масла выполняли на хроматографе «Цвет 800», оснащенный пламенно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой Cyclosil B. Идентификацию энантиомеров компонентов эфирных масел проводили с использованием эталонных соединений. Определение оптических изомеров компонентов эфирных масел проводили методом внутренней нормализации без использования поправочных коэффициентов [7].

Результаты и их обсуждение. Качественный состав монотерпеновых соединений исследованных эфирных масел туи является постоянным и представлен α -туйеном, α - и β -пиненами, камфеном, сабиненом, мирценом, лимоненом, γ -терпиненом.

Количественный состав эфирных масел несколько различается и зависит от вида растительного сырья. По суммарному содержанию ациклических, моноциклических и бициклических монотерпенов лидирует образец № 2, содержащий $\approx 6,5$ мас. % монотерпеновых соединений. В остальных образцах суммарная концентрация монотерпенов составляет от 3 до 5 мас. %.

Диаграммы, отражающие распределение энантиомеров α -пинена в образцах эфирных масел, представлены на рис. 1. В образцах № 2 и № 4 отмечена наибольшая концентрация этого монотерпена. В образце № 1 содержание α -пинена практически вдвое ниже. Во всех изученных

маслах отмечено преобладание (1R)-(+)-форм α -пинена. Вместе с тем каждый из исследованных видов туи характеризуется свойственным ему соотношением энантиомеров α -пинена. В образце № 5 энантиомерный избыток правовращающих форм составляет $\approx 17\%$. В образце № 4 преобладание R(+)-форм вдвое ниже – энантиомерный избыток составляет $\approx 7\%$. В эфирном масле № 3 отмечено практически равное содержание энантиомеров α -пинена с небольшим преобладанием правовращающих форм (энантиомерный избыток составляет 3–4 %).

Концентрация камфена в исследованных образцах составляет менее 1 мас. % (рис. 2). По содержанию камфена наиболее близкими являются эфирные масла № 3 и № 4. Эфирное масло № 1 обеднено этим соединением. Наибольшее содержание камфена отмечено в эфирном масле № 2.

Характер распределения оптических изомеров камфена в образцах эфирных масел аналогичен распределению энантиомеров α -пинена. Во всех образцах камфен представлен преимущественно правовращающей (1R)-(+)-формой, энантиомерный избыток которой составляет от 20 до 30 % в зависимости от вида туи.

На рис. 3 представлены данные по содержанию оптических изомеров лимонена. Наибольшее содержание лимонена отмечено в образце № 2. Несколько ниже его концентрация в маслах № 3–5, что сопоставимо с литературными данными [7]. Только у *T. occidentalis* L. «Hoveyi» (образец № 1) интенсивность биосинтеза лимонена выражена слабее по сравнению с остальными видами туи. Для всех образцов характерно преобладание R(+)-форм лимонена, однако количественное соотношение энантиомеров зависит от вида туи. В образцах № 1 и № 2 энантиомерный избыток правовращающих изомеров близок и составляет $\approx 40\%$. Несколько более высокое значе-

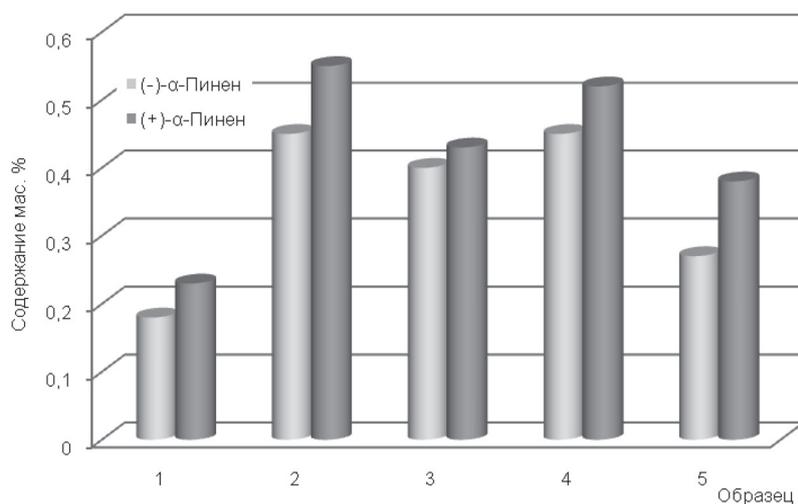


Рис. 1. Содержание энантиомеров α -пинена в эфирных маслах растений рода *Thuja*

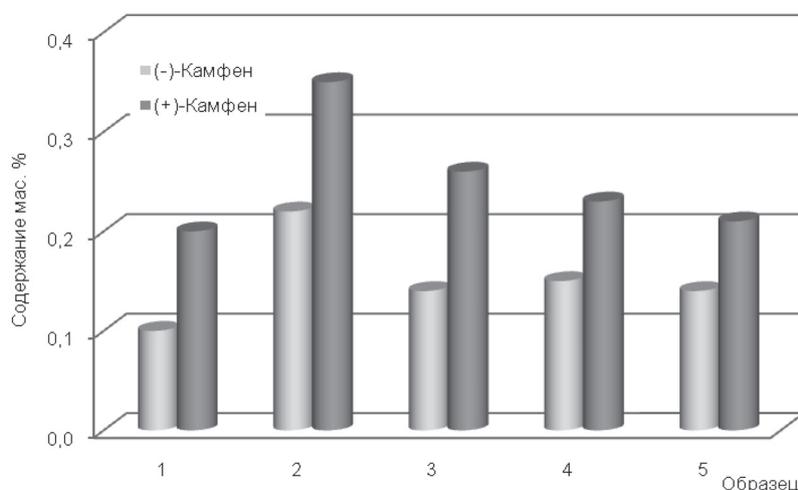


Рис. 2. Содержание энантиомеров камфена в эфирных маслах растений рода *Thuja*

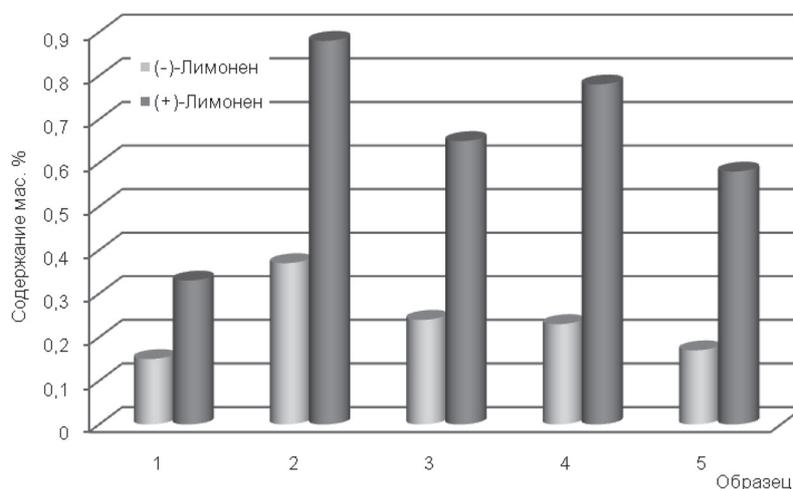


Рис. 3. Содержание энантиомеров лимонена в эфирных маслах растений рода *Thuja*

ние энантиомерного избытка R(+)-форм ($\approx 46\%$) отмечено в масле № 3. Для образцов № 4 и № 5 энантиомерный избыток правовращающих форм составляет $\approx 55\%$.

Исследованные образцы содержат небольшие количества β -пинена. Максимальная концентрация $\approx 0,2$ мас. % этого монотерпена отмечена в эфирном масле № 2. Содержание сабинена в эфирных маслах практически не зависит от вида туи и составляет 1–1,5 мас. %.

Отличительной чертой исследованных эфирных масел является оптическая чистота по (1R)-(+)- β -пинену и (1R)-(+)-сабинену. Независимо от использованного для извлечения масла растительного сырья во всех образцах β -пинен и сабинен представлены только правовращающими изомерами.

Заключение. Установлено, что для исследованных эфирных масел туи характерным является преобладание правовращающих форм α -пинена, камфена и лимонена. Сабинен и β -пинен представлены исключительно (1R)-(+)-изомерами.

Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для создания базы данных с целью идентификации, стандартизации и установления подлинности эфирных масел и препаратов на их основе.

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией интродукции древесных растений ЦБС НАН Беларуси канд. биол. наук И. М. Гарановичу за предоставление образцов для исследований.

Исследование выполнено в рамках гранта БРФФИ № Б12В-004.

Литература

1. Ткачев А. В. // Успехи химии. 2007. Т. 76, вып. 10. С. 1014–1032.
2. Способ идентификации эфирного масла многоколосника морщинистого: пат. № 15602 Респ. Беларусь / Н. А. Коваленко, Г. Н. Суличенко, В. Н. Леонтьев, А. Г. Шутова, Е. В. Спиридович; заявитель Бел. гос. технолог. ун-т. – № а 20101011; заявл. 01.07.2010.
3. Hansel R., Keller R., Rimpler H., Schneider G. Hagers Handbuch der Pharmazeutischen Praxis: Drogen P–Z (Thuja). Berlin: Springer Verlag, 1994. S. 955–966.
4. Svajdenka E., Martonfi P., Tomasko I. et al. // J. Essent. Oil Res. 1999. Vol. 11. P. 532–536.
5. Jirovetz L., Buchbauer G., Denkova Z. et al. // Nutrition. 2006. Vol. 30, N 4. P. 152–159.
6. Tsiri D., Graikou K., Poblocka-Olech et al. // Molecules. 2009. Vol. 14. P. 4707–4715.
7. Шутова А. Г., Спиридович Е. В., Гаранович И. М. и др. // Тр. БГУ. 2009. Т. 4. С. 237–242.

V. N. LEONTIEV, N. A. KAVALENKA, H. M. SUPICHENKA, H. G. SHUTAVA

chembstu@rambler.ru

ENANTIOMERS OF MONOTERPENE COMPOUNDS IN THE *THUJA* ESSENTIAL OILS

Summary

The essential oils of *Thuja* species introduced in Central botanical garden of NAS of Belarus have been analysed by GC-technique. A β -cyclodextrin capillary column has been used for the separation of enantiomers. The dominant monoterpene enantiomers of essential oils of *Thuja* are R-(+)-forms of α -pinene, camphene, limonene. Sabinene and β -pinene are presented only in R-(+)-isomers.

БИОЛОГИЯ

УДК 633.521:577.21

Д. В. ГАЛИНОВСКИЙ¹, Е. Н. КОЖЕМЯКО², Т. А. ПОДВИЦКИЙ¹, Н. В. АНИСИМОВА¹,
академик Л. В. ХОТЫЛЕВА¹, член-корреспондент А. В. КИЛЬЧЕВСКИЙ¹

ПДРФ-АНАЛИЗ ГЕНОВ ЦЕЛЛЮЛОЗОСИНТАЗ ЛЬНА
(*LINUM USITATISSIMUM* L.)

¹Институт генетики и цитологии НАН Беларуси, Минск

²Белорусский государственный университет, Минск

Поступило 06.10.2014

Введение. Лен – важный источник натурального волокна, широко востребованного на современном сырьевом рынке. В 2011 г. Беларусь была третьей после Франции и Бельгии по объему продаж льноволокна, при этом финансовая выручка Беларуси в сравнении с Францией оказалась в 10 раз ниже. Из первой двадцатки крупнейших экспортеров Беларусь продает лён по самой низкой цене (по данным FAO [1]). Специалистами отмечается, что в настоящее время производство льноволокна в Беларуси падает [2], что связано в первую очередь с низким качеством получаемой продукции [3]. Поэтому улучшение качества волокна льна является актуальной задачей, которую можно решить только при условии тщательного изучения биогенеза волокон и селекции данной культуры [2].

Поскольку целлюлоза является основным компонентом льноволокна, для создания принципиально новых сортов льна необходимо понимание процессов биогенеза целлюлозных микрофибрилл. К настоящему времени известен основной компонент биосинтеза целлюлозы, представляющий собой 36 CESA-полипептидов, образующих трансмембранную целлюлозосинтазную розетку [4]. Однако из-за сложности его структуры собрать этот комплекс *in vitro* и изучить его функционирование не удастся [5]. В качестве наиболее перспективного подхода изучения биогенеза волокна могут быть использованы методы молекулярной генетики.

CESA-полипептиды кодируются генами целлюлозосинтаз (*CesA*-генами), которые можно идентифицировать не только по полноразмерной последовательности, но и по класс-специфическим областям (CSRII), т. е. по фрагментам генов [6]. Исследователям уже доступна полная нуклеотидная последовательность генома льна культурного [7], а также некоторые последовательности транскриптома льна, включая и последовательности CSRII областей четырех генов целлюлозосинтаз [8]. На основе этих последовательностей нами был разработан метод идентификации генов целлюлозосинтаз льна с помощью ПДРФ-анализа [9]. Используя этот метод, можно сравнивать между собой сорта и формы льна, различающиеся по качеству волокна, и найти *CesA*-гены, способствующие формированию качественного льноволокна.

Цель работы – идентификация генов целлюлозосинтаз, экспрессирующихся у контрастных по качеству волокна форм льна.

Материалы и методы исследования. В качестве объектов исследования выбраны сорт льна-долгунца *Agiane*, относящийся к подвиду *elongatum* и используемый для получения льноволокна, а также сорт *Endress Olajlen*, относящийся к подвиду *mediterraneum* (лен крупносемянный), который выращивается для получения масла и не формирует качественное волокно. Данные сорта льна имеют значительные различия по морфологическим признакам: высота растения (ВР), техническая длина стебля (ТД), число коробочек на одном растении (ЧК), число семян с одного растения (ЧСР), число семян, содержащихся в коробочке (ЧС/К), масса семян, собранных с одно-

го растения (МСП), масса 1000 семян (М1000) и др., а также по качеству формируемого волокна (табл. 1). Растения льна выращивали на делянках ЦБС НАН Беларуси в 2013 г. по общепринятым методикам, семена высеяли в оптимально ранние сроки в первой декаде мая (07.05.2013) для формирования нормального стеблестоя.

Таблица 1. Хозяйственно ценные признаки сортов льна культурного

Сорт	ВР, см	ТД, см	ЧК	ЧСР	ЧС/К	МСП, г	М1000, г
Лен-долгунец (subsp. <i>elongatum</i> Vav. et Ell.)							
Ariane	88,0 ± 1,9	79,9 ± 2,4	3,9 ± 0,3	29,4 ± 3,4	7,5 ± 0,3	0,15 ± 0,01	4,92 ± 0,09
Лен крупносемянный (subsp. <i>mediteranium</i> Vav. et Ell.)							
Endress Olajlen	69,1 ± 1,5	55,0 ± 1,7	11,8 ± 1,4	64,9 ± 10,6	5,3 ± 0,2	0,74 ± 0,12	11,32 ± 0,16

Синтез матрицы кДНК. В качестве матрицы использовали кДНК, синтезированную при обратной транскрипции на общей РНК, с помощью олиго-дТ праймеров и набора RevertAid First Strand cDNA Synthesis Kit (Thermo Scientific, Литва) согласно инструкции производителя. РНК для синтеза выделяли из стеблей на стадии быстрого роста (45-е сутки после посева) по методике с использованием TRI REAGENT™ (Sigma, США). После выделения и очистки ДНКазой I (Thermo Scientific, Литва) препараты РНК растворяли в 100 мкл воды, не содержащей РНКазы.

Аmplификацию необходимых фрагментов *CesA*-генов проводили методом ПЦР в объеме 20 мкл с использованием 0,3 ед. ДНК-полимеразы Tornado (Праймтех, Беларусь) и соответствующего ей 2х Т-буфера (S). На одну реакцию нуклеотиды добавляли в конечной концентрации 0,2 мМ для каждого нуклеотида, прямой и обратный праймер в конечной концентрации 0,2 мкМ, 1,5 мкл кДНК, которая после синтеза была разбавлена в соотношении 1 : 25. В опытах использовали класс-специфические праймеры, которые позволяют амплифицировать CSRII-область генов целлюлозосинтаз (табл. 2). Амплификацию проводили на амплификаторе TProfessional (Biometra, Германия) по программе, указанной в табл. 3.

Таблица 2. Праймеры, использованные для идентификации генов целлюлозосинтаз

Праймер	Последовательность 5'→3'	Метка на 5' конце	Ссылка
HVR2F	TGYTATGTGTCAGTTYCCWC	ROX	[10]
HVR2R	GANCCRTARATCCAYCC	FAM-ACH	

Таблица 3. Программа для амплификации класс-специфических областей генов целлюлозосинтаз льна

№	Температура, °С	Время, с
1	95	900
2	91	60
3	55	90
4	72	120
№ 2–4 повторяли 35 раз		
5	16	300

Рестриктию проводили в 20 мкл реакционной смеси, которая включала 7 мкл воды mQ, 10 мкл ПЦР продукта, 2 мкл буфера, соответствующего ферменту, а также 1 мкл фермента. В работе использовали ферменты *Bam*HI, *Pst*I и *Pvu*II (Thermo Scientific, Литва). Образцы инкубировали в течение часа при 37 °С.

Капиллярный электрофорез выполняли на восьмикпиллярном генетическом анализаторе Genetic Analyzer 3500 (Applied Biosystems, США) в капиллярах длиной 50 см и диаметром 50 мкм. Электрофорез проводили при температуре 60 °С. Использовали ANODE Buffer 3500 series и CATODE Buffer 3500 (Applied Biosystems, США), гель для электрофореза – POP-7 (Applied

Biosystems, США). Перед загрузкой в генетический анализатор к пробам ДНК объемом 2–3 мкл добавляли 1 мкл раствора размерного стандарта S450 (CorDIS, Россия) и деионизированный формамид до 10 мкл. После этого пробы прогревали при 94 °С в течение 2 мин, а затем охлаждали во льду.

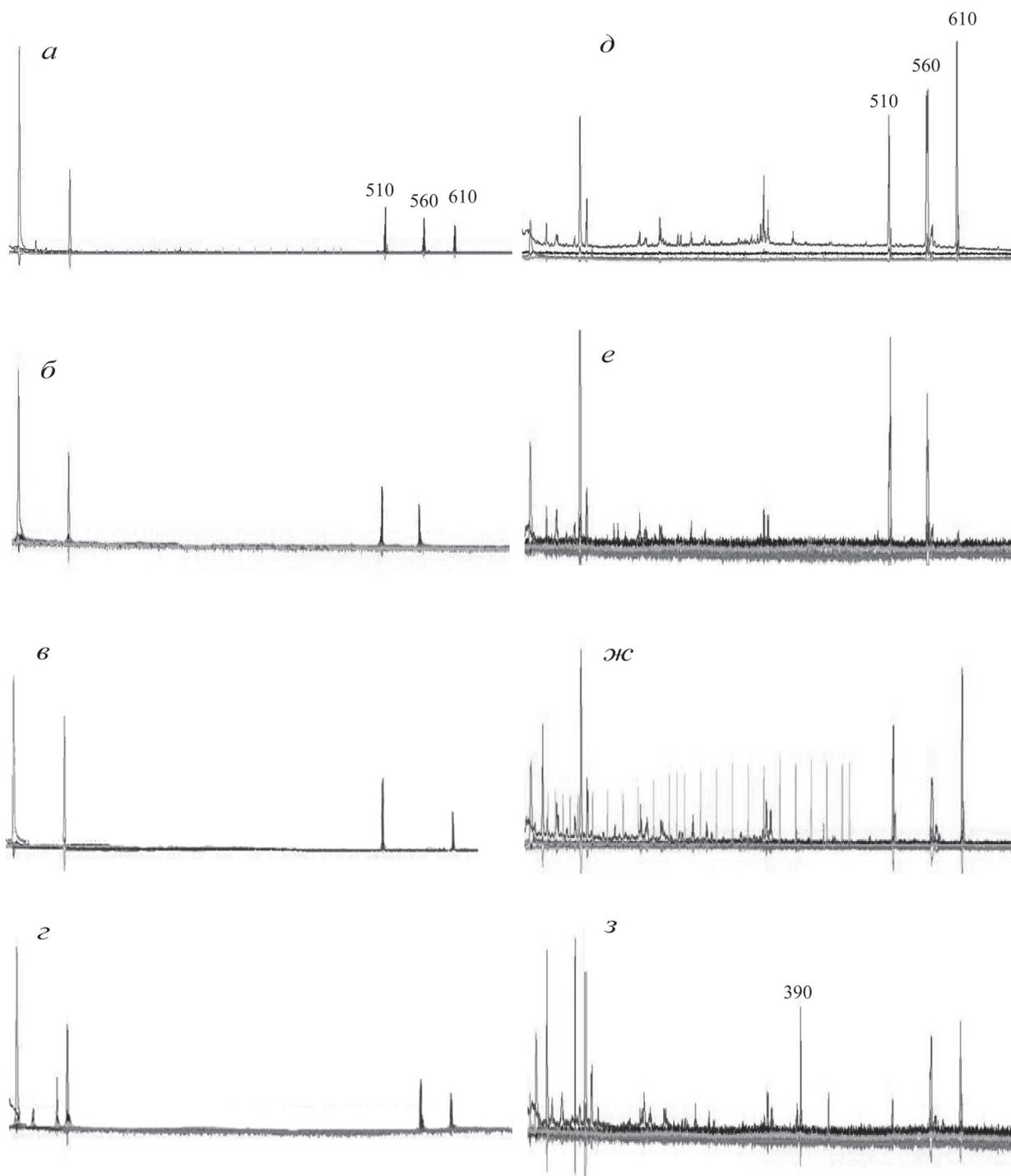
Результаты и их обсуждение. Для разработки метода идентификации генов целлюлозосинтазы мы использовали подход, который предложили в 2006 г. М. Ranik и А. Myburg для растений эвкалипта (*Eucalyptus grandis* W. Hill). Данный подход позволяет идентифицировать гены целлюлозосинтазы не по полноразмерной последовательности данных генов, а по класс-специфической области (CSRII), т. е. по фрагменту гена [6]. Эффективность данного подхода позднее была показана для растений осины [10] и льна (*Linum usitatissimum* L.) [8]. Нуклеотидные последовательности CSRII областей четырех генов целлюлозосинтазы льна (*LusCesA1*, *LusCesA4*, *LusCesA7* и *LusCesA9*) были сиквенированы и депонированы нами в базу данных GenBank (JZ482253, JZ482254, JZ482255, JZ482256). На основе полученных CSRII-фрагментов генов целлюлозосинтазы были подобраны ферменты рестрикции, которые в данных последовательностях имели уникальные сайты узнавания, и разработан метод идентификации данных генов на основе ПДРФ-анализа. Разработанный метод включает два этапа. Первый этап – амплификация с помощью ПЦР класс-специфической области *CesA*-генов, а второй этап – гидролиз ПЦР-продукта ферментами *Bam*HI, *Pst*I и *Pvu*II. Различия длины фрагментов ДНК, образующихся при расщеплении ферментом *Pvu*II, позволяют различить гены *LusCesA1* и *LusCesA9*. Гидролиз CSRII-области ферментом *Bam*HI позволяет идентифицировать ген *LusCesA4*, а *Pst*I – ген *LusCesA7* [9].

В нашей работе мы применили метод ПДРФ-анализа для идентификации генов целлюлозосинтазы двух подвидов льна культурного, которые имеют существенные фенотипические различия по признакам продуктивности волокна (табл. 1). Это позволяет предположить, что данные растения могут различаться по экспрессии генов целлюлозосинтазы. CSRII-области генов целлюлозосинтазы из стеблей льна *Argiane* (лен-долгунец) и *Endress Olajlen* (лен крупносемянный) амплифицировали и разделили с помощью электрофореза (рисунок, *a* и *d*). Праймеры, использованные в работе на 5'-конце, несли модифицированные нуклеотиды, что позволило детектировать ПЦР-продукты посредством флуоресценции. В наших экспериментах интенсивность флуоресценции красителя FAM была значительно выше по сравнению с красителем ROX.

При разделении данных фрагментов в капилляре обнаружили три пика, соответствующие фрагментам ДНК размером 510, 560, 610 п. н. (рисунок, *a* и *d*). Полученные фрагменты ДНК соответствуют класс-специфическим областям следующих *CesA* генов: 610 п. н. – *CesA4*, 510 п. н. – *CesA7*, 560 п. н. – *CesA1* и/или *CesA9*. На электрофореграмме также видны дополнительные пики (более многочисленные для *Argiane* и менее выраженные для *Endress Olajlen*), соответствующие более легким фрагментам ДНК (рисунок, *d*). Мы полагаем, что данные фрагменты ДНК представляют собой неспецифические продукты амплификации либо абортированные продукты ПЦР. После расщепления полученных ПЦР продуктов ферментами *Bam*HI, *Pst*I и *Pvu*II образцы разделяли методом капиллярного электрофореза (рисунок).

После обработки ферментом *Bam*HI ПЦР-продуктов CSRII-областей *CesA*-генов в обоих случаях обнаружили фрагменты ДНК размером 510, 560 и 100 п. н. (рисунок *b*, *e*). Из экспериментальных данных можно заключить, что самый крупный фрагмент ДНК размером 610 п. н. расщепляется на участки размером 100 п. н. и 510 п. н. (рисунок, *b*, *e*). На этом основании мы делаем вывод, что в изучаемых образцах присутствует CSRII-область гена *LusCesA4*. Другими словами, можно утверждать, что в клетках стебля льна сорта *Argiane* и *Endress Olajlen* экспрессируется данный ген.

В результате расщепления ферментом *Pst*I CSRII-областей из льна-долгунца фрагмент ДНК 510 п. н. расщепляется на два участка размером 415 и 90 п. н. (рисунок, *з*), что свидетельствует об экспрессии гена *LusCesA7* в анализируемых пробах. Кроме того, на фореграмме идентифицировали дополнительный пик (метка FAM), соответствующий фрагменту ДНК размером 390 п. н. При анализе фрагментов класс-специфических областей из генома льна биоинформатическими методами не обнаружили ген, который бы по размерам продуктов рестрикции его CSRII-области соответствовал нашим экспериментальным данным. Наиболее близкие значения были получены для генов из локусов *Lus10026609*, *Lus10026610* и *Lus10030455*, которые составляли около 350



Рестрикционный анализ CSR II-области *CesA*-генов льна-долгунца (Ariane) и льна крупносемянного (Endress Olajlen):
 а – без рестриктазы (Endress Olajlen); б – *Bam*HI (Endress Olajlen); в – *Pvu*II (Endress Olajlen); г – *Pst*I (Endress Olajlen);
 д – без рестриктазы (Ariane); е – *Bam*HI (Ariane); ж – *Pvu*II (Ariane); з – *Pst*I (Ariane)

и 210 п. н. Данные последовательности являются гомологами последовательности AT2G33100.1 из генома *Arabidopsis thaliana* и могут быть отнесены к целлюлозосинтазоподобным генам (*CsID*).

При обработке CSR II-областей, полученных из льна крупносемянного, ферментом *Pst*I фрагмент ДНК размером 510 п. н. также расщепляется (рисунок, г), что является индикатором гена *LusCesA7*. В результате на электрофореграмме появляется фрагмент ДНК размером 90 п. н., а второй фрагмент размером около 415 п. н. обнаружить не удалось. Возможно, это связано с тем, что краситель ROX, в нашем случае, имеет более низкую интенсивность флуоресценции по срав-

нению с FAM, поэтому внесенного количества образца было недостаточно для идентификации данного фрагмента.

При анализе фрагментов ДНК, образующихся при расщеплении CSRII-областей из стеблей льна-долгунца ферментом *PvuII*, были идентифицированы фрагменты размером 610, 560 и 510 п. н. (рисунок, ж). Причем интенсивность флуоресценции пика 560 п. н. значительно ниже по сравнению с контрольным образцом, не обработанным ферментом (рисунок, д), что свидетельствует о прошедшей рестрикции. Неполное расщепление фрагмента может указывать на присутствие дополнительных генов целлюлозосинтаз в данных образцах. Анализ генома льна биоинформатическими методами указывает, что такими генами могут быть гены *CesA6* (локус Lus10041063), ген *CesA8* (локус Lus10029245), либо целлюлозосинтазоподобный *CsID*-ген (Lus10012119). После рестрикции фрагментов *CesA*-генов из льна крупносемянного ферментом *PvuII* детектировали присутствие двух фрагментов ДНК 610 и 510 п. н. (рисунок, в), т. е. в данном случае происходит полное расщепление фрагмента ДНК размером 560 п. н. Согласно методу идентификации *CesA*-генов, с помощью данного фермента можно идентифицировать гены *LusCesA1* и *LusCesA9* [9]. В случае гена *LusCesA1* фрагмент размером 552 п. н. расщепляется на фрагменты размером 497 и 55 п. н., а в случае гена *LusCesA9* фрагмент размером 576 п. н. разрезается на 441 и 135 п. н. Однако предполагаемые продукты рестрикции в эксперименте не обнаружили, что не позволило дифференцировать данные гены.

Таким образом, можно сделать вывод, что в клетках стебля льна-долгунца и льна крупносемянного экспрессируются гены *LusCesA4*, *LusCesA7* и/или гены *LusCesA1*, *LusCesA9*. В стебле льна-долгунца обнаружена экспрессия гена, который по профилю рестрикции CSRII-областей похож на ген, кодирующий целлюлозосинтазоподобный белок *CsID* (гомолог последовательности AF232907 из *Arabidopsis thaliana*), который не был обнаружен в пробах из стеблей льна крупносемянного.

Заключение. В результате работы были получены и проанализированы класс-специфические области генов целлюлозосинтаз льна культурного (*Linum usitatissimum* L.) двух подвидов – льна-долгунца (subsp. *elongatum* Vav. et Ell.) и льна крупносемянного (subsp. *mediteranium* Vav. et Ell.). В стеблях образцов обоих подвидов наблюдалась схожая картина профиля экспрессии генов целлюлозосинтаз. Установлена экспрессия генов *LusCesA4*, *LusCesA7*, имеются доказательства функционирования гена *LusCesA9* или *LusCesA1* либо их комбинации. Выявленные отличия в профиле продуктов рестрикции свидетельствуют об экспрессии в стеблях льна-долгунца дополнительных генов целлюлозосинтаз либо целлюлозосинтазоподобных генов (возможно, *CesA6*, *CesA8*, а также *CsID* гомолог гена AF232907 из генома *Arabidopsis thaliana*), что может влиять на качественные характеристики формируемого волокна.

Авторы статьи искренне благодарят доктора биол. наук В. В. Титка за содействие в проведении исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ–ГФФИУ (договор № Б13К-024).

Литература

1. FAO Statistics [Electronic resource] – Mode of access: <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E>. – Date of access: 05.05.2014.
2. Пестис М. В., Шинтарь И. М., Пестис П. В. Состояние и перспективы производства и переработки льна в условиях Гродненской области. Гродно, 2011. – 168 с.
3. Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Льноводство. – Минск, 2014. – Режим доступа: <http://mshp.minsk.by/agriculture/crop/tk/>. – Дата доступа: 05.05.2014.
4. Saxena I. M., Brown R. M. // *Annals of Botany*. 2005. Vol. 96. P. 9–21.
5. Горшкова Т. А. Растительная клеточная стенка как динамическая система. М., 2007. – 429 с.
6. Ranik M., Myburg A. A. // *Tree Physiology*. 2006. Vol. 26, N 5. P. 545–556.
7. Wang Z., Hobson N., Galindo L. et al. // *Plant J*. 2012. Vol. 72, N 3. P. 461–473.
8. Галиновский Д. В., Анисимова Н. В., Райский А. П. и др. // *Генетика*. 2014. Т. 50, № 1. С. 26–34.
9. Галиновский Д. В., Анисимова Н. В., Титок В. В., Хотылева Л. В. // Матер. междунар. конф. «Интродукция, сохранение и использования биологического разнообразия мировой флоры». Минск, 2012. Ч. 2. С. 272–276.
10. Liang X., Joshi C. P. // *Tree Physiology*. 2004. Vol. 24, N 5. P. 543–550.

D. V. GALINOUSKY, E. N. KAZHAMIAKO, Ts. A. PADVITSKI, N. V. ANISIMOVA,
L. V. KHOTYLEVA, A. V. KILCHEVSKY

D.Galinousky@igc.bas-net.by

RFLP-ANALYSIS OF CELLULOSE SYNTHASE GENES OF FLAX (*LINUM USITATISSIMUM* L.)

Summary

The fiber flax Ariane and linseed Endress Olajlen were used as a subject of investigation in the present work. These flax cultivars form various types of fiber with contrast quality properties. Cellulose synthase genes, which are expressed in different breeds of flax, were identified by the RFLP-analysis. The expression of *LusCesA4*, *LusCesA7*, as well as *LusCesA9* and/or *LusCesA1* genes was determined in the stems of the both breeds. The functioning of additional genes (probably, *CesA6*, *CesA8*, *Cs1D*) was found in the stems of fiber flax, but they were not expressed in the stems of linseed.

УДК 582.293.378(476)

П. Н. БЕЛЫЙ¹, А. Г. ЦУРИКОВ², В. В. ГОЛУБКОВ³,
член-корреспондент Е. А. СИДОРОВИЧ¹

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ЛИШАЙНИКАХ РОДА *CETRELIA* (LECANORALES, ASCOMYCOTA) В БЕЛАРУСИ

¹Центральный ботанический сад НАН Беларуси, Минск

²Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

³Гродненский государственный университет им. Я. Купалы

Поступило 06.10.2014

Введение. Род *Cetrelia* W.L. Culb. & C.F. Culb., являющийся представителем семейства *Parmeliaceae* Zenker – одного из крупнейших семейств лихенизированных аскомицетов, насчитывает около 20 широко распространенных видов [1]. Представители рода характеризуются листоватым, широколопастным талломом, зеленовато-серым (до пепельно-белого) цветом верхней поверхности слоевища (у старых гербарных образцов становится коричневым или желтовато-коричневым), постоянным наличием псевдоцифелл, часто – соредий и/или изидий, отсутствием маргинальных ресничек. Кроме того, для видов данного рода характерна черная нижняя поверхность слоевища, редкие ризины, белая сердцевина, леканориновые (обычно продырявленные) апотеции, расположенные ближе к краю лопастей, эллипсоидные аскоспоры и краевые пикниды, содержащие палочковидные пикноконидии [2].

В зависимости от взглядов различных исследователей, для территории Европейского субконтинента указывается от одного до четырех видов рода *Cetrelia*. Некоторые лихенологи признают только *Cetrelia olivetorum* s.l. (или *C. cetrarioides* s.l.) в качестве самостоятельного вида, выделяя различные хемотипы этого таксона. Другие же рассматривают данные хемотипы в качестве самостоятельных видов: *C. cetrarioides* (Delise) W.L. Culb. & C.F. Culb., *C. chicitae* (W.L. Culb.) W.L. Culb. & C.F. Culb., *C. monachorum* (Zahlbr.) W.L. Culb. & C.F. Culb. и *C. olivetorum* (Nyl.) W.L. Culb. & C.F. Culb. Эта точка зрения находит все большее признание в настоящее время и подтверждена недавними молекулярными исследованиями [3].

Для Республики Беларусь имеются литературные указания *C. cetrarioides* и *C. olivetorum* [4–8]. Их определения основаны на морфологических характеристиках образцов и результатах цветных химических реакций, которые не всегда надежны. Кроме того, отсутствие современного ключа по лишайникам рода *Cetrelia* Беларуси значительно затрудняет работу и в ряде случаев делает публикуемые флористические данные не корректными для таксономических обобщений.

Таким образом, на сегодняшний день нет достоверных сведений о видовом составе и эколого-географических особенностях лишайников рода *Cetrelia* на территории Беларуси. В связи с вышеизложенным, весьма актуально изучение всех доступных образцов данного рода посредством современных методов. Это позволит установить истинное видовое разнообразие представителей рода *Cetrelia* в Беларуси, а также уточнить созологический статус каждого вида, что имеет первостепенное значение в связи с готовящимся четвертым изданием Красной книги Республики Беларусь. Кроме того, указанные виды, в силу своей приуроченности к старовозрастным лесам со сформировавшимся стабильным микроклиматом, могут служить надежными индикаторами ненарушенных или слабонарушенных лесов при проведении лихеноиндикационных, мониторинговых либо лесоустроительных мероприятий.

Материал и методы исследования. Материалом для данного исследования послужили образцы лишайников рода *Cetrelia*, хранящиеся в коллекционных фондах Белорусского государ-

ственного университета (MSKU), Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины (GSU), Гродненского государственного университета им. Я. Купалы (GRSU), Института экспериментальной ботаники НАН Беларуси (MSK) и Центрального ботанического сада НАН Беларуси (MSKH). Состав вторичных метаболитов всех образцов был изучен методом тонкослойной хроматографии в системе растворителей С [9]. Микрористаллический метод идентификации лишайниковых кислот был проведен с использованием смеси глицерина и ледяной уксусной кислоты в соотношении 3 : 1 [10]. Кроме того, изучались реакции слоевища и сердцевины таллома лишайников при воздействии гипохлорита кальция (С), гидроксида калия (К), а также сочетания этих реактивов (КС, СКС).

Названия таксонов лишайников приводятся согласно [11]. Названия сосудистых растений приводятся согласно [12].

Результаты и их обсуждение. Первые указания лишайников рода *Cetrelia* относятся к началу XX в. [4–6]. В ходе белорусской ботанической экспедиции 1923–1924 гг. В. П. Савич проводил лишайниковое обследование центральной и юго-восточной частей Беларуси [5; 6]. В одной из своих работ [5, с. 6] В. П. Савич, характеризуя ассоциации лишайников различных лиственных древесных пород, приводит для Беларуси *Parmelia perlata* f. *ceptrarioides* (Delise) Elenk., встречающийся на стволах граба. Кроме того, в этой же работе *P. perlata* (L.) Ach. указан в составе эпифитных лишайниковых синузид на ветвях ели [5, с. 7]. Последующие указания *Cetrelia* spp. связаны с исследованиями Н. В. Горбач, предпринятыми с целью установления места эпифитных лишайников в комплексе лесорастительных условий, а также выявления влияния типов леса на видовое разнообразие и субстратную специфичность лишайнизированных грибов. В работе [7] *Parmelia ceptarioides* Delise (= *Cetrelia ceptarioides*) был указан для лесов еловой формации республики. Дальнейшие сведения о видах рода *Cetrelia* связаны с изучением лишайников особо охраняемых природных территорий Беларуси, проведенным В. В. Голубковым в 1980-х годах. В результате этих исследований в [8] приводятся два вида лишайников этого рода: *C. ceptarioides* и *C. olivetorum*. Однако эти, как и все предыдущие, сведения следует трактовать как *Cetrelia ceptarioides* s.l., поскольку авторами не проводились тонкие методы определения вторичных метаболитов изучаемых образцов.

Первые указания о лишайниках рода *Cetrelia* Беларуси, основанные на изучении химического состава лишайниковых кислот методом тонкослойной хроматографии, приводятся в работе эстонских лишайников [13]. В результате ревизии лишайников данного рода на территории Советского Союза Т. В. Рандлане и А. Ю. Сааг впервые указывают вид *Cetrelia monachorum* для территории республики. Позднее эти же данные были использованы при составлении сводки пармелиоидных лишайников Европы и прилегающих территорий [14].

Первые достоверные указания *C. ceptarioides* s.str. и *C. olivetorum* s.str. для Республики Беларусь содержатся в публикации, посвященной изучению видового разнообразия лишайников еловых лесов республики [15].

В результате обработки 210 образцов лишайников рода *Cetrelia*, собранных в Беларуси в период с 1954 по 2012 г., было установлено, что в настоящее время на территории республики встречается 3 вида: *C. ceptarioides*, *C. monachorum* и *C. olivetorum*. *Cetrelia olivetorum* (51 % общего числа исследованных образцов) и *C. monachorum* (43 %) встречаются наиболее часто (рис. 1), в то время как *C. ceptarioides* (6 %) является более редким видом.

Ревизия всех доступных образцов рода *Cetrelia* позволила выявить отличительные особенности морфологии и химического состава каждого вида, на ос-

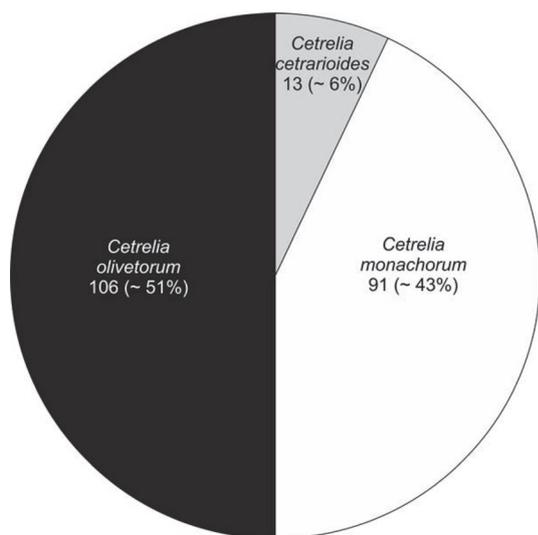


Рис. 1. Встречаемость видов рода *Cetrelia* в Беларуси

новании чего были составлены уточненные диагнозы *C. cetrarioides*, *C. monachorum* и *C. olive-torum* в условиях Беларуси. Полученные данные послужат надежной основой при составлении определительных ключей для лишайников рода *Cetrelia*. Кроме того, обобщены данные по экологии и распространению на территории республики каждого вида.

Cetrelia cetrarioides (Delise) W. L. Culb. & C. F. Culb.

Contrib. U. S. Natl. Herb. 34: 498. 1968. = *Parmelia cetrarioides* Delise, in Duby, Bot. Gall. (Paris) 2(2): 601. 1830.

Слоевище крупнолопастное, неопределенной формы, до 15(20) см в диаметре, рыхло прикрепляющееся к субстрату. Лопасты до 2–2,5 см ширины, по краю складчато-волнистые, с приподнимающимися округлыми концами. Псевдоцифеллы на верхней стороне слоевища мелкие (до довольно крупных), практически всегда не приподнятые, довольно часто развиваются также на нижней поверхности приподнимающихся лопастей, или иногда отсутствуют. Сорали гладкие, сильновыпуклые. Соредии мелкие (как правило 30–35 мкм в диаметре). Апотеции в белорусском материале не обнаружены.

Основные лишайниковые метаболиты: атранорин и перлатоловая кислота.

Cetrelia cetrarioides можно отличить от остальных членов рода по гладким выпуклым соралам, мелким соредиям и наличию многочисленных псевдоцифелл на нижней стороне лопастей. *Cetrelia cetrarioides* наиболее сходен с *C. monachorum* как по внешнему виду, так и по химическому составу. Основное его отличие заключается в содержании значительных количеств перлатоловой кислоты в качестве основного лишайникового метаболита.

В Беларуси *Cetrelia cetrarioides* известен всего в 13 локалитетах, расположенных преимущественно на северо-западе республики. Большинство находок *C. cetrarioides* приурочено к хвойным лесам. Данный вид произрастает преимущественно на лиственных (исключительно редко на хвойных) деревьях: *Alnus glutinosa* (3 образца), *Betula* spp. (2), *Populus tremula* (2), *Carpinus betulus* (1), *Juniperus communis* (1) и *Quercus robur* (1).

Распространение в Беларуси: Брестская область: Пружанский р-н; Витебская область: Городокский р-н, Докшицкий р-н, Лепельский р-н, Россонский р-н; Гродненская область: Новогрудский р-н, Свислочский р-н; Минская область: Минский р-н, Мядельский р-н; Могилевская область: Осиповичский р-н (рис. 2).

Cetrelia monachorum (Zahlbr.) W. L. Culb. & C. F. Culb

C. F. Culb. & W. L. Culb. Syst. Bot. 1(4): 326 (1977) [1976]. = *Parmelia monachorum* Zahlbr., in Handel-Mazzetti, Symb. Sinic. 3: 180 (1930).

Слоевище крупнолопастное, неопределенной формы, до 15(20) см в диаметре, рыхло прикрепляющееся к субстрату. Лопасты до 2–2,5 см ширины, по краю складчато-волнистые, с приподнимающимися округлыми концами. Псевдоцифеллы на верхней стороне слоевища мелкие и почти всегда выпуклые, иногда плоские, отсутствуют в центральной части слоевища. На нижней стороне слоевища псевдоцифеллы, как правило, не развиваются. Сорали грубые, бесформенные. Изредка могут развиваться головчатые сорали на поверхности лопастей. Соредии достигают 60 мкм в диаметре. Апотеции в белорусском материале не обнаружены.

Основные лишайниковые метаболиты: атранорин и имбрикарвая кислота.

Cetrelia monachorum является вторым по встречаемости видом в Беларуси. Многочисленные местонахождения его приурочены, главным образом, к особо охраняемым природным территориям. В республике *Cetrelia monachorum* произрастает преимущественно в лиственных лесах с повышенной влажностью воздуха. Вид предпочитает селиться на лиственных деревьях: *Quercus* spp. (34 образца), *Alnus glutinosa* (22), *Carpinus betulus* (15), *Fraxinus excelsior* (6), *Acer platanoides* (4), *Salix* spp. (4) и *Populus tremula* (3). Один образец был собран на гниющей древесине.

Распространение в Беларуси: Брестская область: Барановичский р-н, Каменецкий р-н, Пружанский р-н, Столинский р-н; Витебская область: Браславский р-н, Докшицкий р-н, Лепельский р-н, Полоцкий р-н, Толочинский р-н; Гомельская область: Житковичский р-н, Петриковский р-н; Гродненская область: Гродненский р-н, Новогрудский р-н, Свислочский р-н; Минская область: Борисовский р-н, Логойский р-н, Мядельский р-н; Могилевская область: Глусский р-н, Осиповичский р-н (рис. 3).

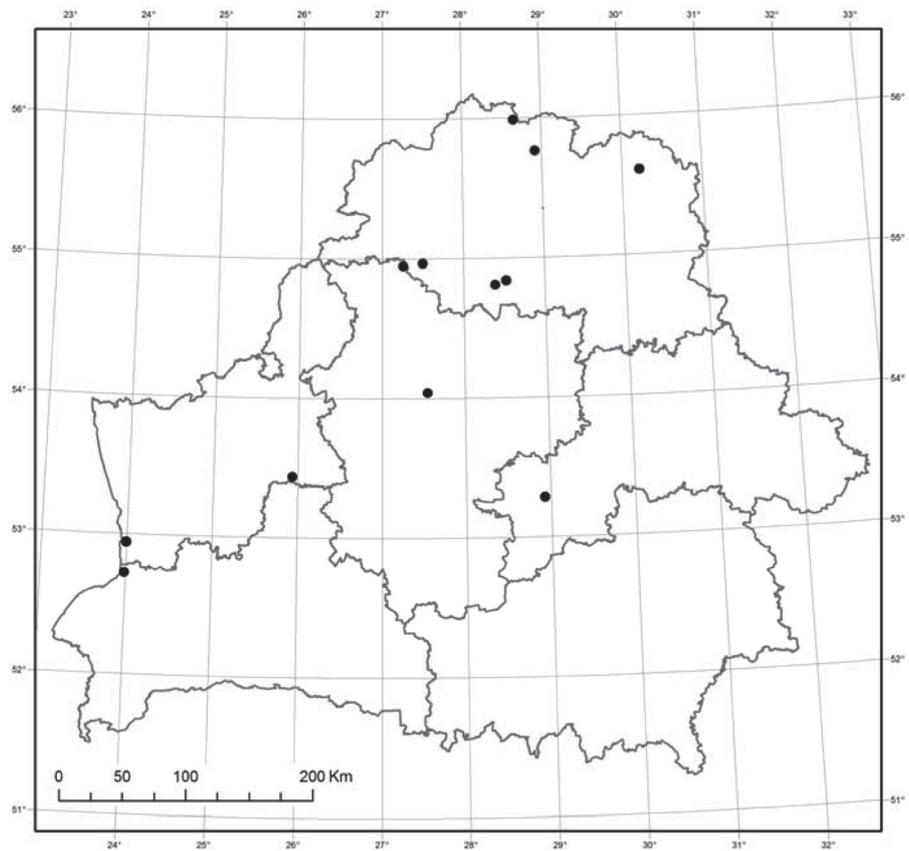


Рис. 2. Распространение *Cetrelia cetrarioides* в Беларуси

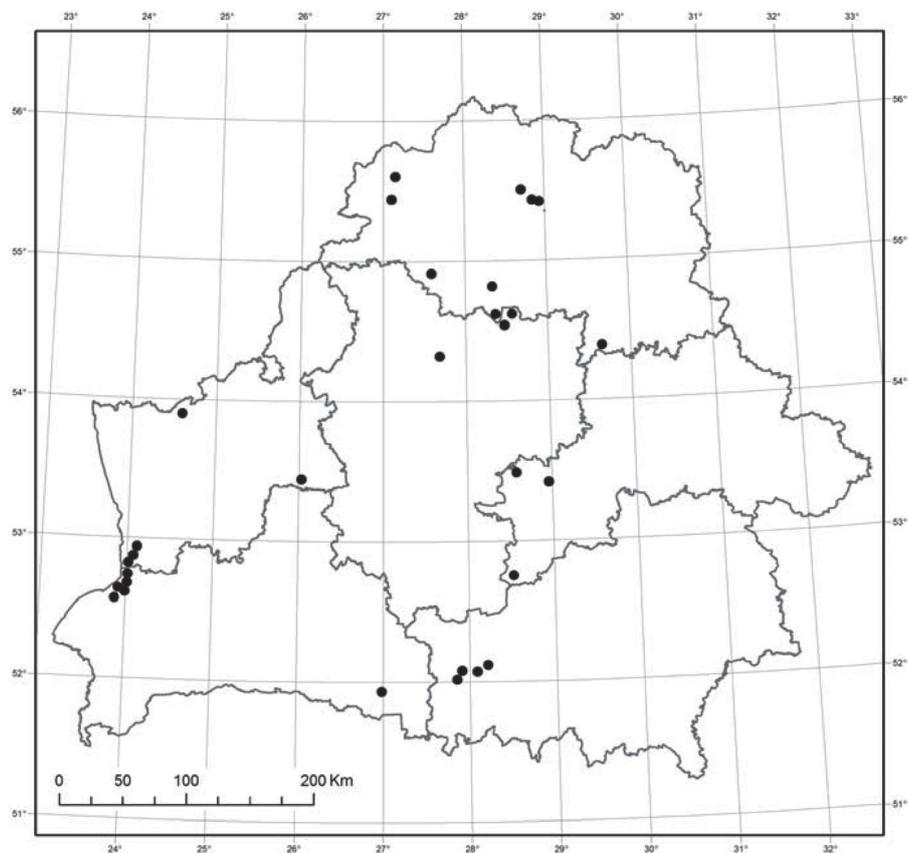


Рис. 3. Распространение *Cetrelia monachorum* в Беларуси

Cetrelia olivetorum (Nyl.) W. L. Culb. & C. F. Culb.

Contrib. U. S. Natl. Herb. 34: 515. 1968. = *Parmelia olivetorum* Nyl. Not. Sällsk. Fauna et Fl. Fenn. Förh. 8: 180 (1866).

Слоевище крупнолопастное, неопределенной формы, до 15(20) см в диаметре, рыхло прикрепляющееся к субстрату. Лопасты до 2–2,5 см ширины, по краю складчато-волнистые, с приподнимающимися округлыми концами. Фертильные лопасты с хорошо развитыми мелкими плоскими псевдоцифеллами, а также с ламинальными головчатыми соралиями. Псевдоцифеллы на поверхности слоевища мелкие, не приподнимающиеся над поверхностью. Соралии гладкие, выпуклые, располагаются по краям лопастей. Изредка могут развиваться головчатые соралии. Соредии от 20 до 55 мкм в диаметре. Апотеции выявлены у единственного образца. Апотеции слегка приподнятые над поверхностью лопастей (на короткой, широкой (до 1,5 мм ширины) ножке), до 1,75 мм в диаметре, с красновато-коричневым, вогнутым и слегка блестящим, цельным диском. Слоевищный край апотециев соредиозный, довольно широкий и неравномерно утолщенный. В наиболее широкой части достигает 1 мм. Поверхность слоевища вблизи плодовых тел, несоредиозные участки слоевищного края и ножки апотециев покрыты хорошо развитыми псевдоцифеллами. Споры не обнаружены, что может быть обусловлено ранней стадией развития апотециев.

Вид характеризуется содержанием значительных количеств атранорина и оливеторовой кислоты. Наличие последней служит хорошим отличительным признаком *C. olivetorum* от других представителей рода благодаря интенсивному окрашиванию сердцевины при взаимодействии с насыщенным раствором гипохлорита кальция.

Cetrelia olivetorum – наиболее распространенный в республике вид, схожий в своем распространении с *C. monachorum*. Он поселяется, главным образом, во влажных лиственных (73 образца), реже в хвойных (9) лесах, исключительно редко – в пределах урбанизированных территорий (1). *Cetrelia olivetorum* отмечен исключительно на лиственных деревьях: *Quercus robur* (32 образца), *Alnus glutinosa* (28), *Carpinus betulus* (13), *Salix* spp. (13), *Betula pubescens* (5), *Fraxinus*

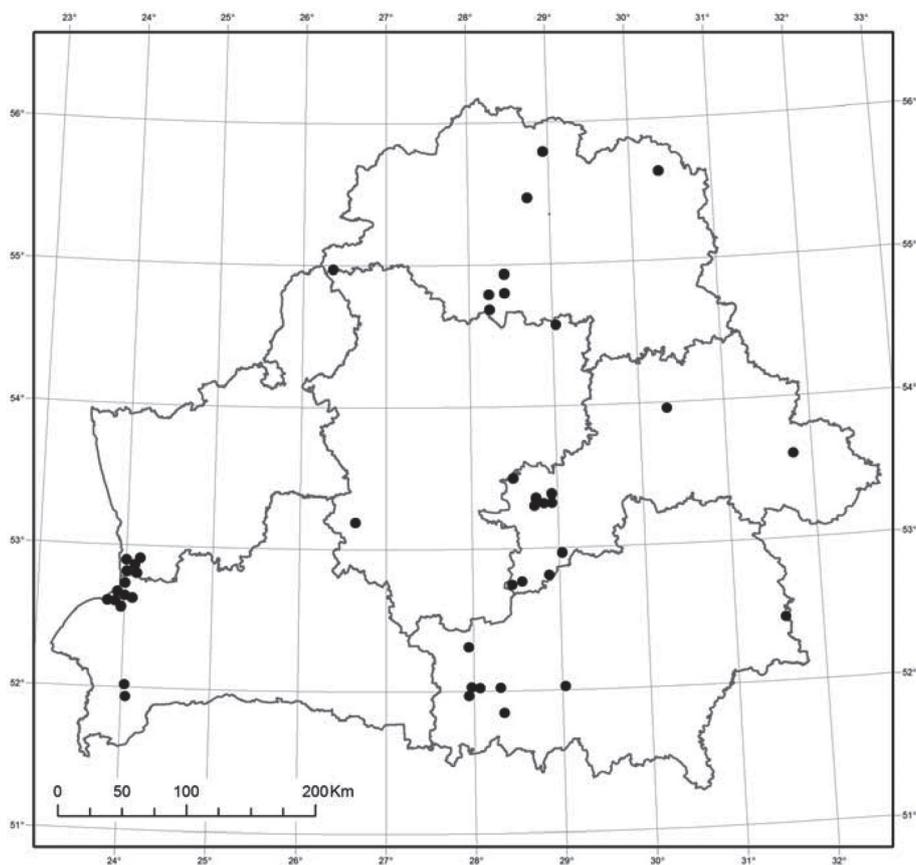


Рис. 4. Распространение *Cetrelia olivetorum* в Беларуси

excelsior (3), *Acer platanoides* (2), *Populus tremula* (2) и *Betula pendula* (1). Один образец был собран на замшелом валежнике (1).

Распространение в Беларуси: Брестская область: Жабинковский р-н, Каменецкий р-н, Малоритский р-н, Пружанский р-н; Витебская область: Городокский р-н, Докшицкий р-н, Лепельский р-н, Полоцкий р-н, Россонский р-н, Чашникский р-н; Гомельская область: Добрушский р-н, Житковичский р-н, Лельчицкий р-н, Мозырский р-н; Гродненская область: Свислочский р-н; Минская область: Мядельский р-н, Несвижский р-н; Могилевская область: Бобруйский р-н, Глусский р-н, Климовичский р-н, Могилевский р-н, Осиповичский р-н (рис. 4).

Заключение. Ревизия гербарного материала по роду *Cetrelia* в Беларуси выявила неполноту опубликованных флористических данных по рассматриваемому роду. Установлено, что большинство гербарных образцов, определенных ранее как *C. cetrarioides*, относится к другому виду – *C. monachorum*. Таким образом, в настоящее время в состав рода *Cetrelia* на территории Беларуси входит три вида: *C. cetrarioides*, *C. monachorum* и *C. olivetorum*. Полученные в ходе исследования данные уточняют представления о таксономических особенностях и ареалах лишайников рода *Cetrelia* в Европе и, кроме того, могут быть использованы при составлении Красной книги Республики Беларусь, а также фундаментального многотомного издания «Флора Беларуси».

Авторы выражают искреннюю благодарность Прадипу Дивакару (Мадрид, Испания) и Тиине Рандлане (Тарту, Эстония) за консультации, оказанные в ходе написания настоящей работы.

Литература

1. Kirk P. M. et al. Ainsworth and Bisby's Dictionary of the Fungi. Wallingford, 2008.
2. Randlane T., Saag A. // The Lichenologist. 1991. N 23. P. 113–126.
3. Crespo A. et al. // Taxon. 2010. N 59. P. 1735–1753.
4. Крейер Г. К. // Тр. Императорскаго С.-Петербургскаго Ботаническаго Сада. 1913. Т. 31. С. 263–440.
5. Савич В. П., Савич Л. И. // Зап. Бел. гос. ин-та сельского хозяйства. 1924. Вып. 3. С. 57–72.
6. Савич В. П. // Зап. Бел. гос. ин-та сельского и лесного хозяйства. 1925. Вып. 4. С. 1–33.
7. Горбач Н. В. // Весці акадэміі навук Беларускай ССР. 1955. № 3. С. 112–118.
8. Голубков В. В. // Ботаника: Исследования. 1986. Вып. 27. С. 139–141.
9. Huneck S., Yoshimura I. Identification of lichen substances. Berlin, 1996.
10. Asahina Y. Lichens of Japan. Vol. II. Genus *Parmelia*. Tokyo, 1952.
11. Esslinger T. L. // North Dakota State University [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.ndsu.edu/pubweb/~esslinge/chcklst/chcklst7.htm#C>. – Date of access: 25.02.2014.
12. Сауткина Т. А. и др. Определитель высших растений Беларуси. Минск, 1999.
13. Рандлане Т. В., Сааг А. Ю. // Новости систематики низших растений. 1992. Т. 28. С. 118–134.
14. Hawksworth D. L., Blanco O., Divakar P. K. et al. // The Lichenologist. 2008. N 40. P. 1–21.
15. Белый П. Н. // Особо охраняемые природные территории Беларуси. Исследования. 2011. Вып. 6. С. 146–178.

P. N. BELY, A. G. TSURIKOV, V. V. GOLUBKOV, E. A. SIDOROVICH

pavel.bely@tut.by

NEW DATA ON THE LICHEN GENUS *CETRELIA* (LECANORALES, ASCOMYCOTA) IN BELARUS

Summary

Two hundred and ten lichen specimens of *Cetrelia* collected in Belarus during 1954–2012 were examined based on morphological and chemical characters. Three species of *Cetrelia* (*C. cetrarioides*, *C. monachorum*, and *C. olivetorum*) have been identified in this study. The occurrence of detected species in Belarus is reviewed and distribution maps are provided.

МЕДИЦИНА

УДК 612.084

М. В. КОВАЛЕВА, В. Ю. АФОНИН

ОСОБЕННОСТИ ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРЫС ЛИНИИ SHR В УСЛОВИЯХ ГЕНЕТИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННОЙ АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИИ*(Представлено членом-корреспондентом С. А. Усановым)*

Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск

Поступило 08.09.2014

Введение. Процесс гипертрофии сердца лежит в основе развития сердечно-сосудистых осложнений и приводит к коронарному синдрому, инфаркту миокарда, сердечной недостаточности и внезапной смерти. Установлено, что в 15–20 % случаев патологическое увеличение массы сердца развивается в условиях генетически обусловленной артериальной гипертензии [1]. Создание экспериментальной модели гипертрофии миокарда на животных является важной задачей для изучения механизма развития патологии сердечно-сосудистой системы.

Спонтанно гипертензивные крысы (линия SHR) являются патологической моделью в условиях высокого артериального давления. В свою очередь, Wistar-Kyoto крысы (линия WKY) представляют собой модель контроля для крыс линии SHR в условиях нормального артериального давления [2].

Согласно литературным данным, у крыс линии SHR увеличивается артериальное давление [3], соотношение массы миокарда к массе тела, наблюдается нарушение окислительного фосфорилирования в митохондриях, гиперактивация ренин-ангиотензин-альдостероновой системы по сравнению с крысами линии WKY [4]. Изменения в органах и тканях могут регистрироваться с использованием морфологических, ферментных, цитогенетических, гематологических показателей [5].

Таким образом, комплексная оценка животных с гипертрофией миокарда в условиях генетически обусловленной артериальной гипертензии является важной и актуальной проблемой.

Цель исследования – провести сравнительную оценку морфологических и биохимических показателей у крыс линий WKY и SHR в условиях генетически обусловленной артериальной гипертензии для создания экспериментальной модели гипертрофии миокарда.

Материалы и методы исследования. Для моделирования генетически обусловленной артериальной гипертензии использовали 16 (22 недели) и 5 (20 недель) белых крыс-самцов линии SHR. Крысы линии WKY в количестве 5 шт (20 недель) были контрольной группой.

Развитие гипертрофии миокарда оценивали путем измерения веса тела, сердца, относительного коэффициента массы сердца.

Проводили контроль ферментных, цитогенетических, гематологических показателей:

измеряли активность ферментов энергетического обмена в сыворотке крови: аспартатаминотрансферазы (АСТ), аланинаминотрансферазы (АЛТ), креатинкиназы (КФК), креатинкиназы сердечной мышцы (КФК-МБ), лактатдегидрогеназы (ЛДГ), лактатдегидрогеназы сердечной мышцы (ЛДГ-1). Использовали наборы LiquickCor, Cormay и измерения проводили на биохимическом анализаторе (Hitachi 902 ISE Hitachi Science Systems Ltd, Rochediagnostics Gmth);

анализировали количество клеток с ДНК-повреждениями, распределение клеток по фазам клеточного цикла. Анализ ДНК проводили методом проточной цитофлуориметрии на проточном цитофлуориметре Cytomics FC500 (Beckman Coulter, США);

оценивали количество лейкоцитов, лимфоцитов, моноцитов, гранулоцитов. Для оценки гематологических показателей кровь добавляли к изотоническому раствору HC-Diluent (Human GmbH, Германия) и оценивали на автоматизированном гематологическом анализаторе (Hema-count, Германия). Декапитацию крыс и забор биологического материала проводили в возрасте 20 и 22 недели.

Статистическую обработку проводили с использованием пакета анализа данных Excel и Statistica 8.0 непараметрическими методами с использованием критериев Краскела–Уоллиса, Манна–Уитни и коэффициента парной корреляции. Результаты представлены как среднее арифметическое значение плюс/минус стандартная ошибка среднего для выборки.

Результаты и их обсуждение. В ходе исследования было установлено, что у крыс линии SHR в возрасте 20 и 22 недель по сравнению с крысами WKY масса почек, сердца, относительный коэффициент массы почек статистически значимо не изменялись ($p = 0,076$, $p = 0,401$, $p = 0,251$ и $p = 0,081$, $p = 0,142$, $p = 0,395$ соответственно). Наблюдалась тенденция к снижению массы тела у крыс линии SHR в возрасте 20 недель, которая достигла статистической значимости для крыс в возрасте 22 недель по сравнению с крысами линии WKY ($p = 0,171$ и $p < 0,001$ соответственно). Достоверно увеличивался относительный коэффициент массы сердца у крыс линии SHR в возрасте 20 и 22 недель по сравнению с крысами WKY ($p = 0,016$ и $p = 0,008$ соответственно). Полученные результаты подтверждают литературные данные о развитии гипертрофии сердца у крыс линии SHR по сравнению с крысами линии WKY [6] путем увеличения показателя относительного коэффициента массы сердца. Результаты оценки морфологических показателей представлены в табл. 1.

Таблица 1. Оценка морфологических признаков крыс линий SHR и WKY

Линия крыс	Возраст, нед.	Масса тела, г	Масса сердца, г	ОКМ сердца	Масса почек, г	ОКМ почек
SHR	22	284,0 ± 5,3*	1,19 ± 0,03	4,18 ± 0,08*	2,32 ± 0,11	8,13 ± 0,27
SHR	20	330 ± 5,7	1,34 ± 0,03	4,05 ± 0,06*	2,44 ± 0,11	7,40 ± 0,36
WKY	20	348 ± 12	1,32 ± 0,04	3,74 ± 0,07	2,63 ± 0,08	7,58 ± 0,09

Примечание: * – $p < 0,05$ по сравнению с группой крыс WKY, критерий Краскела–Уоллиса и Манна–Уитни.

Набор ферментов энергетического обмена, используемый в нашем исследовании, отражает функциональное состояние миокарда [4]. Результаты определения ферментных показателей в сыворотке крови крыс представлены в табл. 2.

Таблица 2. Оценка ферментных показателей у крыс линий SHR и WKY

Линия крыс	Возраст, нед.	АСТ	АЛТ	АСТ/АЛТ	ЛДГ	ЛДГ-1	КФК	КФК-МБ
SHR	22	288,9 ± 17,3**	86,2 ± 2,9**	3,3 ± 0,10	1897 ± 154*	770,3 ± 54*	6015 ± 651	1958 ± 211*
SHR	20	323,5 ± 17,3*	64,8 ± 2,6	5,04 ± 0,41*	1739 ± 141*	818,9 ± 59*	6624 ± 859	1116 ± 134
WKY	20	226,4 ± 27,3	71,9 ± 4,5	3,11 ± 0,23	749,8 ± 126	412,6 ± 60	4296 ± 100	942 ± 209

Примечание: * – $p < 0,05$ по сравнению с группой крыс WKY, критерий Краскела–Уоллиса и Манна–Уитни; ** – $p < 0,05$ по сравнению с группой крыс WKY, коэффициент парной корреляции.

Концентрации ферментов энергетического обмена повышаются в плазме крови при цитолизе кардиомиоцитов [7]. Оценка данных показателей является маркером развития процесса гипертрофии миокарда.

В исследовании группы ферментов АСТ, АЛТ было установлено, что у крыс линии SHR в возрасте 20 недель по сравнению с крысами WKY активность АСТ, отношение АСТ/АЛТ статистически значимо увеличивалось при отсутствии достоверных различий показателя АЛТ ($p = 0,028$, $p = 0,009$, $p = 0,175$ соответственно). Наблюдалась тенденция к увеличению АСТ, АЛТ и отношению АСТ/АЛТ у крыс линии SHR в возрасте 22 недель по сравнению с крысами WKY ($p = 0,11$, $p = 0,053$, $p = 0,395$ соответственно). Была установлена статистически значимая связь между показателями АСТ, АЛТ линий крыс SHR и WKY ($r = -0,4$, $p = 0,043$ и $r = -0,5$, $p = 0,028$).

Уровни ЛДГ, ЛДГ-1 у животных линии SHR в возрасте 20 и 22 недель по сравнению с WKY статистически значимо были выше ($p = 0,009$, $p = 0,009$ и $p < 0,001$, $p = 0,004$ соответственно).

Увеличение концентрации ЛДГ, ЛДГ-1 и АСТ в плазме крови наблюдается при запуске анаэробного метаболического пути в условиях гипоксии и при усилении интенсивности окислительного фосфорилирования соответственно, которые происходят в условиях гипертрофии [7].

Наблюдалась тенденция к увеличению уровней КФК, КФК-МБ у крыс линии SHR в возрасте 20 и 22 недель по сравнению с крысами WKY, которая достигла статистической значимости для показателя КФК-МБ крыс линии SHR в возрасте 22 недель ($p = 0,343$, $p = 0,548$ и $p = 0,327$, $p = 0,025$ соответственно). Данные ферменты отвечают за энергетическое обеспечение клеток сердца и регулируют содержание глюкозы в плазме крови, интенсификацию углеводного обмена. Увеличение КФК и КФК-МБ свидетельствует об увеличении энергетической потребности клеток сердца в условиях генетически обусловленной артериальной гипертензии [7]. Таким образом, у крыс линии SHR увеличиваются уровни АСТ, ЛДГ, ЛДГ1 и КФК, КФК-МБ по сравнению с крысами линии WKY.

В условиях артериальной гипертензии происходит активация ангиотензина II и генерирование активных форм кислорода, которые вызывают повреждения клеток и ДНК. При цито-, ДНК-повреждении активация процессов клеточного деления вызывает развитие пролиферативных процессов и фиброза или клеточной гибели. Происходит снижение количества клеток в G0/G1 фазе и увеличивается количество клеток в S+G2/M фазе клеточного цикла [8], нарастает уровень ДНК-повреждений в клетках почек с их дальнейшей реализацией в микроядра [9]. В данных условиях можно предположить развитие дефицита субпопуляций стволовых и слабо дифференцированных клеток при клеточной репарации не только в сердечно-сосудистой системе, но и других органах и тканях, что приводит к ускорению процессов старения и гибели.

Результаты исследования цитогенетических показателей крыс линий SHR и WKY представлены в табл. 3.

Таблица 3. Оценка цитогенетических показателей крыс линий SHR и WKY

Линия крыс	Возраст, нед.	ДНК повреждения, %	G0/G1, %	S, %	S+G2/M, %
SHR	22	14,27 ± 1,27*	94,1 ± 0,6*	4,7 ± 0,8*	5,1 ± 0,78*
SHR	20	4,65 ± 0,66	98,4 ± 0,23	1,04 ± 0,28	1,63 ± 0,23
WKY	20	4,18 ± 0,87	97,2 ± 0,7	0,67 ± 0,19	2,83 ± 0,70

Примечание: * – $p < 0,05$ по сравнению с группой крыс WKY, критерий Краскела–Уоллиса и Манна–Уитни.

В периферической крови у крыс линии SHR в возрасте 20 недель по сравнению с крысами WKY отсутствуют статистически значимые изменения цитогенетических показателей.

Наблюдается тенденция к увеличению клеток с ДНК-повреждениями, накоплению клеток в фазах G0/G1 (фаза начального роста) и S клеточного цикла и снижению количества клеток в фазе S+G2/M клеточного цикла, которая не достигает статистической значимости у крыс линии SHR в возрасте 20 недель по сравнению с крысами WKY ($p = 0,465$, $p = 0,175$, $p = 0,465$, $p = 0,175$ соответственно). Было установлено достоверное увеличение клеток с ДНК-повреждениями, накопление клеток в фазах S и S+G2/M клеточного цикла и снижение количества клеток в фазе G0/G1 клеточного цикла у крыс линии SHR в возрасте 22 недель по сравнению с крысами WKY ($p = 0,001$, $p = 0,003$, $p = 0,011$, $p = 0,000$ соответственно). Накопление клеток в S+G2/M-фазе клеточного цикла является показателем подготовки к делению клеток [10], а также возможного их ареста в случае повреждений ДНК. Таким образом, у крыс линии SHR увеличивается количество клеток в S, S+G2/M-фазе клеточного цикла, накопление клеток с ДНК-повреждениями по сравнению с крысами линии WKY.

Результаты исследования гематологических показателей периферической крови крыс линий SHR и WKY представлены в табл. 4.

Таблица 4. Оценка гематологических показателей у крыс линий SHR и WKY

Линия крыс	Возраст, нед.	Количество лейкоцитов, $10^9/л$	Количество лимфоцитов, %	Количество лимфоцитов, $10^9/л$	Количество моноцитов, %	Количество моноцитов, $10^9/л$	Количество гранулоцитов, %	Количество гранулоцитов, $10^9/л$
SHR	22	$10,7 \pm 0,7^{**}$	$65,3 \pm 2,2$	$6,9 \pm 0,5^{**}$	$5,7 \pm 0,7$	$0,58 \pm 0,06$	$29,0 \pm 2,5$	$3,2 \pm 0,4$
SHR	20	$14,6 \pm 1,1$	$67,3 \pm 4,1$	$9,93 \pm 1,1$	$5,94 \pm 1,82$	$0,79 \pm 0,18$	$26,8 \pm 3,5$	$3,96 \pm 0,69$
WKY	20	$14,0 \pm 0,5$	$70,1 \pm 1,9$	$5,96 \pm 1,98$	$9,8 \pm 0,5$	$0,84 \pm 0,28$	$23,9 \pm 1,1$	$3,35 \pm 0,18$

Примечание. * – $p < 0,05$ по сравнению с группой крыс WKY, критерий Краскела–Уоллиса и Манна–Уитни; ** – $p < 0,05$ по сравнению с группой крыс SHR в возрасте 20 недель, критерий Краскела–Уоллиса и Манна–Уитни.

В ходе исследования у крыс линии SHR в возрасте 20 недель по сравнению с крысами WKY отсутствуют статистически значимые изменения лейкоцитарных показателей.

Наблюдается тенденция к увеличению абсолютного числа лимфоцитов, относительного и абсолютного числа гранулоцитов, и снижению относительного и абсолютного числа моноцитов, которая не достигает статистической значимости у крыс линии SHR в возрасте 20 недель по сравнению с крысами WKY ($p = 0,602$, $p = 0,754$, $p = 0,602$, $p = 0,675$, $p = 0,602$ соответственно).

Было установлено достоверное снижение числа лейкоцитов и увеличение абсолютного числа лимфоцитов у крыс линии SHR в возрасте 22 недель по сравнению с крысами линии SHR в возрасте 20 недель и WKY ($p = 0,020$, $p = 0,020$ и $p = 0,020$, $p = 0,005$ соответственно). Установлено влияние клеток иммунной системы на развитие и поддержание артериальной гипертензии у крыс линии SHR [11]. В исследованиях наблюдается снижение пролиферации лейкоцитов и лимфоцитов у крыс SHR с возрастом в результате гиперактивации симпатической нервной системы в условиях развития артериальной гипертензии [12]. Кроме того, в результате нарушения окислительного баланса происходит усиление апоптоза лимфоцитов [13]. С другой стороны, окислительный стресс вызывает активацию регенерации гематопозитических клеток со сдвигом в сторону увеличения числа гранулоцитов, лимфоцитов [14].

Заключение. Таким образом, при сравнении морфологических, биохимических показателей у крыс линии SHR и WKY установлено, что крысы линии SHR в возрасте 20–22 недель могут быть использованы в качестве модели гипертрофии миокарда в условиях генетически обусловленной артериальной гипертензии. Наблюдалось увеличение относительного коэффициента массы сердца, активности ферментов окислительного фосфорилирования, пролиферации и гибели клеток, изменению соотношения гематологических клеток.

Литература

1. Soesanto W. // J. Hypertension. 2009. Vol. 54, N 6. P. 1321–1327.
2. Tran E. D. // J. Vasc Res. 2010. N 47. P. 423–431.
3. Conde M. V. // Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol. 2011. Vol. 3, N 301. P. H1153–H1165.
4. Peng H. // J. Circulation. 2005. N 112. P. 2436–2445.
5. Kolwicz St. C. // Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol. 2009. N 297. P. H1361–H1368.
6. Послый И. М. Принципы анализа ферментемии. М., 2003. С. 75.
7. Ashwell S. // J. Clin. Cancer Res. 2008. N 14. P. 4032–4037.
8. Chen R. // J. of Southern Medical University 2007. Vol. 27, N 2. P. 1806–1809.
9. Аникин В. В. // Российский кардиол. журн. 2001. № 6. С. 11–16.
10. Schmid U. // J. Cancer Res. 2008. N 68. P. 9239–9246.
11. Fannon L. D. // J. Hypertens. 1992. Vol. 10, N 7. P. 629–634.
12. Pursell E. S. // J. The Anatomical record. 1993. N 273. P. 236–242.
13. Kobayashi N. // J. Free radical biology and medicine. 2006. N 41. P. 484–492.
14. Schmid-Schonbein G. W. // J. Hypertension. 1991. Vol. 17, N 3. P. 323–330.

M. V. KAVALEVA, V. Yu. AFONIN

vengeria@tut.by

SPECIFIC FEATURES OF PHYSIOLOGICAL-BIOLOGICAL PROPERTIES OF SHR RATS IN GENETICALLY DETERMINATE ARTERIAL HYPERTENSION

Summary

Morphological, biochemical indices of the 20–22 weeks-old WKY and SHR rats were studied to get the model of heart hypertrophy in genetically determinate arterial hypertension. In the research we got the model of heart hypertrophy in genetically determinate arterial hypertension. It was found that heart mass index, oxidative phosphorylation enzymes, DNA injury increased and hematological changes were found in SHR rats as compared with WKY rats.

УДК 616.127-001-085

П. Ф. ЮШКЕВИЧ, член-корреспондент Ф. И. ВИСМОНТ

ПРОТИВОИШЕМИЧЕСКИЙ И АНТИАРИТМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТЫ ДИСТАНТНОГО ИШЕМИЧЕСКОГО ПРЕ- И ПОСТКОНДИЦИОНИРОВАНИЯ У КРЫС С САХАРНЫМ ДИАБЕТОМ

Белорусский государственный медицинский университет, Минск

Поступило 17.11.2014

Введение. На сегодняшний день заболевания сердечно-сосудистой системы и их осложнения занимают лидирующее положение среди причин потери трудоспособности и смертности населения Республики Беларусь. В структуре данной группы заболеваний одна из ведущих позиций принадлежит ишемической болезни сердца (ИБС), в том числе острому инфаркту миокарда (ОИМ) [1]. Учитывая высокую распространенность ОИМ, а также большую медицинскую и социальную значимость данного заболевания, поиск новых, эффективных методов кардиопротекции при острых нарушениях коронарного кровотока является актуальной задачей современной экспериментальной и клинической медицины. Экспериментальные исследования последних лет продемонстрировали высокую противоишемическую и антиаритмическую эффективность феноменов дистантного ишемического пре- (ДИПК) и посткондиционирования (ДИПостК) [2–4], воспроизводимых при помощи кратковременной ишемии конечности соответственно до и после длительной ишемии миокарда.

В клинической практике необходимость защиты миокарда от острого ишемического и реперфузионного повреждения в основном возникает у пациентов, имеющих различную сопутствующую патологию, в том числе и сахарный диабет (СД). Учитывая тот факт, что наличие СД оказывает существенное негативное влияние на функционирование различных органов и систем организма [5; 6], были основания полагать, что наличие сопутствующего СД может сказываться на способности ДИПК и ДИПостК оказывать противоишемическое и антиаритмическое действие.

Согласно литературным данным, кардиопротекторные эффекты локального ишемического пре- и посткондиционирования у животных с экспериментальной моделью СД не воспроизводятся [6; 8; 10]. Результаты недавно проведенного исследования указывают на то, что у крыс с экспериментальной моделью СД противоишемический эффект дистантного ишемического перкондиционирования (кратковременная дистантная ишемия осуществляется во время острой ишемии миокарда) также не воспроизводится [7]. Однако, X. H. Zhu и соавт. (2011) указывают на то, что при воспроизведении феномена ДИПК у крыс с экспериментальным СД имеет место выраженный противоишемический эффект указанного феномена [11]. В то же время, согласно данным Z. Нао и соавт. (2014), противоишемический эффект ДИПостК у животных с экспериментальной моделью СД не воспроизводится [9].

Цель исследования – выявление воспроизводимости противоишемического и антиаритмического эффектов дистантного ишемического пре- и посткондиционирования миокарда у крыс с сахарным диабетом.

Материалы и методы исследования. Исследование противоишемической и антиаритмической эффективности ДИПК и ДИПостК выполнено на 21 наркотизированной крысе-самце линии Wistar с СД. Масса крыс составляла 200–250 г, а их возраст – 3–4 мес. СД вызывали однократным внутривенным введением (в боковую вену хвоста) животным 1,5 % раствора стрептозоточина, приготовленного на 0,1 М цитратном буфере (рН 4,5), в дозе 30 мг/кг. В качестве контроля использовали 21 крысу с аналогичными характеристиками, которым однократно внутривенно

в том же объеме вводился 0,1 М цитратный буфер (крысы без СД). Цитратный буфер и рабочий раствор стрептозотоцина готовились *ex tempore* [5]. Оптимальная доза стрептозотоцина была подобрана при проведении предварительного исследования, в котором для моделирования СД у крыс использовалось однократное внутривенное введение раствора стрептозотоцина в дозах 30, 40 и 55 мг/кг. Подбор оптимальной дозы стрептозотоцина основывался на данных о выживаемости животных в течение двух недель после его введения. Для подтверждения наличия СД через 2 недели после введения стрептозотоцина у крыс проводилось исследование крови для определения уровня глюкозы с помощью портативного анализатора Accu-Chek Active (Германия) и тест-полосок для определения уровня глюкозы крови Accu-Chek Active (Германия) (крысы с СД, $n = 21$; крысы без СД, $n = 21$). Кроме того, через 4 недели после введения стрептозотоцина крысам выполнялось исследование мочи с помощью тест-полосок Combina (крысы с СД, $n = 21$; крысы без СД, $n = 21$). С этой целью у крыс осуществлялся сбор разовой порции мочи в метаболических клетках. При этом определялись удельный вес мочи, наличие в ней лейкоцитов и эритроцитов, уровень pH, содержание общего белка и глюкозы.

Воспроизведение экспериментальных протоколов на крысах с СД выполнялось через 4 недели после введения стрептозотоцина. Для наркотизации животных использовали этиаминал натрия в дозе 50 мг/кг внутривенно с последующей внутривенной инфузией поддерживающей дозы 10 мг/кг/ч. Крыс переводили на искусственное дыхание атмосферным воздухом при помощи аппарата ИВЛ с частотой дыхания 56–60 в минуту. Наличие проходимости дыхательных путей контролировалось по давлению в трахее, нормальным значением которого на вдохе считалось 10–15 мм рт. ст. В ходе экспериментов непрерывно регистрировались ЭКГ во II стандартном отведении и системное артериальное давление (АД), полученные при этом данные обрабатывались с помощью компьютерной программы Spike 4. Для определения АД крысам канюлировали правую общую сонную артерию. Ректальная температура у крыс (температура в прямой кишке на глубине 3 см) измерялась электротермометром Harvard (Великобритания) и поддерживалась электрогрелкой на уровне $37,0 \pm 0,5$ °С.

Грудную клетку наркотизированного животного вскрывали в четвертом межреберном промежутке слева. В контрольной группе крыс с СД после 15-минутной стабилизации гемодинамики выполняли 30-минутную окклюзию передней нисходящей коронарной артерии (ПНКА) путем механического ее пережатия при помощи фишки (контроль, $n = 7$). Окклюзия артерии подтверждалась цианозом ишемизированной области, снижением АД (на 10–20 мм рт. ст.) и подъемом сегмента ST на ЭКГ. Реперфузия миокарда достигалась удалением фишки и подтверждалась исчезновением цианоза и возвращением сегмента ST к изолинии. Длительность реперфузии составляла 120 мин. Животные опытных групп с СД (ДИПК, $n = 7$ и ДИПостК, $n = 7$) дополнительно подвергались воздействию 15-минутной окклюзии обеих бедренных артерий соответственно за 10 мин до и через 10 мин после 30-минутной острой ишемии миокарда. Через 4 недели после введения цитратного буфера аналогичные протоколы экспериментов выполнялись на крысах без СД (контроль, $n = 7$; ДИПК, $n = 7$; ДИПостК, $n = 7$).

На протяжении эксперимента изучались следующие показатели гемодинамики: среднее АД (АД_{ср}), частота сердечных сокращений (ЧСС), двойное произведение (ДП). АД_{ср} рассчитывали как АД диастолическое + 1/3(АД систолическое – АД диастолическое), ДП – как ЧСС × АД систолическое/100. Показатели гемодинамики регистрировались непрерывно в течение эксперимента и оценивались в конце 15-минутной стабилизации гемодинамики после вскрытия грудной клетки, в начале 30-минутной окклюзии ПНКА, в начале реперфузии, а также каждые 30 мин в течение реперфузии.

Зону риска определяли с помощью внутривенного введения в левую общую яремную вену 0,5 мл 5 %-ного раствора синьки Эванса в конце реперфузии при кратковременной повторной окклюзии ПНКА. Зона риска оценивалась как не окрашенная в синий цвет. Затем сердце извлекали и отделяли правый желудочек. После замораживания в морозильной камере (–20 °С в течение 30 мин) левый желудочек разрезали на 6 поперечных срезов. Срезы взвешивали на торсионных весах, затем их сканировали при помощи сканера HP с обеих сторон. После этого для иден-

тификации зоны некроза срезы помещали в 1 %-ный раствор трифенилтетразолия хлорида на 15 мин при температуре 37 °С. Жизнеспособный миокард (клетки, сохранившие дегидрогеназную активность) окрашивался в кирпично-красный цвет, а некротизированная ткань была белой. После 24-часовой инкубации срезов в 10 %-ном растворе формалина срезы сканировали повторно для определения соотношения площадей зоны риска и зоны некроза. Размеры зон риска и некроза определяли при помощи компьютерной планиметрии с использованием программы Adobe Photoshop 6.0. Результаты исследования заносились в электронную таблицу Excel 7.0 и обрабатывались с помощью стандартного пакета статистических программ Statistica 8.0. Статистическая значимость различий данных оценивалась при помощи ANOVA и теста множественных сравнений Данна. Данные представлены в формате среднее ± стандартная ошибка среднего. Значения $p < 0,05$ рассматривались как достоверные.

Для оценки антиаритмического эффекта ДИПК и ДИПостК подсчитывалась общая длительность нарушений сердечного ритма во время 30-минутной острой коронарной окклюзии – фибрилляции желудочков (ФЖ), пароксизмальной желудочковой тахикардии (ПЖТ), парной желудочковой экстрасистолии, желудочковой экстрасистолии по типу бигеминии, также оценивалось наличие реперфузионных нарушений сердечного ритма. На основе полученных данных рассчитывались медиана (Me) и интерквартильный размах (25-й; 75-й процентиля). При сравнении групп использовали критерий Крускала–Уоллиса и тест множественных сравнений Данна. При сравнении групп по качественным показателям применяли двухсторонний точный метод Фишера (ТМФ).

Критериями исключения животных из опытов являлись ЧСС менее 300 ударов в минуту, АДср. ниже 60 мм рт. ст. и наличие желудочковых экстрасистол до начала эксперимента.

Результаты и их обсуждение. Выживаемость крыс с СД после острой коронарной окклюзии во всех группах животных составила 100 %. Аналогичный показатель во всех группах крыс без СД составил 70 %. Следовательно, данные исследования свидетельствуют о повышении устойчивости миокарда крыс с экспериментальной моделью СД к ишемическому и реперфузионному повреждению. Согласно имеющимся и весьма противоречивым литературным данным, одни экспериментальные исследования указывают на повышение устойчивости миокарда животных с СД к ишемическому и реперфузионному повреждению, другие, напротив, свидетельствуют о ее снижении [6].

Результаты определения уровня глюкозы крови и исследования мочи у крыс с СД и крыс без СД представлены в табл. 1. Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что у крыс с СД по сравнению с животными без СД имеет место статистически значимое повышение содержания глюкозы в крови и моче. Таким образом, представленные данные указывают на наличие СД у крыс, которым внутривенно вводился стрептозотоцин. Стоит отметить, что указанные изменения уровня глюкозы в крови и моче в клинической практике могут отмечаться у больных с различными формами СД.

Таблица 1. Изменение уровня глюкозы крови и показателей анализа мочи у крыс с сахарным диабетом (медиана и интерквартильный размах)

Показатель	Крысы с СД	Крысы без СД
Уровень глюкозы крови, ммоль/л	20,5 (15,8; 26,5)*	5,9 (4,5; 7,2)
Удельный вес мочи	1,013 (1,010; 1,020)	1,025 (1,010; 1,025)
Лейкоциты мочи, лейкоцитов/мкл	0 (0; 0)	0 (0; 0)
Эритроциты мочи, эритроцитов/мкл	10 (0; 10)	10 (0; 10)
Уровень рН мочи	6,0 (5,0; 7,0)	6,5 (6,3; 7,0)
Содержание общего белка в моче, г/л	0,0 (0,0; 0,0)	0,0 (0,0; 0,3)
Содержание глюкозы в моче, ммоль/л	56,0 (28,0; 56,0)**	0,0 (0,0; 0,0)

Примечания: * – статистически значимое увеличение уровня глюкозы крови у крыс с сахарным диабетом по сравнению с крысами без сахарного диабета ($p < 0,05$); ** – статистически значимое увеличение содержания глюкозы в моче у крыс с сахарным диабетом по сравнению с крысами без сахарного диабета ($p < 0,01$).

Показатели гемодинамики во время эксперимента (после вскрытия грудной клетки, в начале 30-минутной ишемии миокарда, в начале реперфузии и далее каждые 30 мин в течение реперфузии) во всех группах крыс с СД и без СД представлены в табл. 2. Статистически значимых отличий между анализируемыми группами крыс с СД по показателям АДср. и ЧСС на протяжении всего эксперимента выявлено не было ($p > 0,05$). Во всех группах крыс с СД в течение первых минут после окклюзии ПНКА отмечалось статистически незначимое кратковременное (3–5 мин) снижение АДср. на 15–20 мм рт. ст. В дальнейшем на протяжении эксперимента показатель АДср. во всех группах крыс с СД оставался относительно стабильным ($p \geq 0,05$ по сравнению с исходным значением). Во всех группах крыс с СД на протяжении всего эксперимента имело место постепенное снижение ЧСС ($p < 0,05$ между показателями ЧСС до начала ОИМ и на 120 мин реперфузии). Кроме того, на протяжении всего эксперимента у крыс с СД отмечалось статистически значимое повышение АДср. и понижение ЧСС по сравнению с соответствующими показателями у крыс без СД ($p < 0,05$).

Таблица 2. Показатели гемодинамики (АДср., мм рт. ст. и ЧСС, уд/мин) в контрольной группе и группах крыс, в которых воспроизводились феномены ДИПК и ДИПостК (крысы с сахарным диабетом и без сахарного диабета)

Группа		Контроль		ДИПК		ДИПостК	
Крысы с СД/без СД		Крысы с СД	Крысы без СД	Крысы с СД	Крысы без СД	Крысы с СД	Крысы без СД
До начала ОИМ	АД ср.	87 ± 7	86 ± 5	105 ± 8*	71 ± 3	99 ± 6*	73 ± 3
	ЧСС	381 ± 23*	417 ± 9	393 ± 19	397 ± 7	373 ± 18*	410 ± 16
Начало ОИМ	АД ср.	74 ± 7	77 ± 8	85 ± 6	74 ± 6	79 ± 4	74 ± 4
	ЧСС	343 ± 13*	439 ± 6	376 ± 23	405 ± 15	363 ± 17*	429 ± 14
Начало реперфузии	АД ср.	79 ± 9	74 ± 2	99 ± 6*	74 ± 4	79 ± 7	74 ± 4
	ЧСС	329 ± 11*	413 ± 16	351 ± 16*	420 ± 18	343 ± 18*	410 ± 23
30' реперфузии	АД ср.	90 ± 5*	74 ± 4	100 ± 6*	78 ± 5	93 ± 4*	75 ± 4
	ЧСС	326 ± 15*	411 ± 12	333 ± 15*	410 ± 19	330 ± 15*	404 ± 22
60' реперфузии	АД ср.	95 ± 5*	73 ± 4	95 ± 9	82 ± 5	92 ± 7*	78 ± 4
	ЧСС	321 ± 17*	413 ± 15	309 ± 18*	414 ± 17	310 ± 13*	410 ± 22
90' реперфузии	АД ср.	97 ± 5*	78 ± 3	96 ± 8*	75 ± 6	95 ± 7*	77 ± 4
	ЧСС	304 ± 15*	433 ± 14	306 ± 17*	411 ± 17	304 ± 13*	396 ± 19
120' реперфузии	АД ср.	95 ± 5	82 ± 5	98 ± 7*	73 ± 4	95 ± 6	85 ± 3
	ЧСС	303 ± 14*	436 ± 20	301 ± 16*	417 ± 14	299 ± 12*	426 ± 16

Примечание. * – статистически значимое повышение АДср. и понижение ЧСС во всех группах крыс с сахарным диабетом по сравнению с аналогичными показателями у крыс без сахарного диабета ($p < 0,05$).

При сравнении ДП, характеризующего потребность миокарда в кислороде, во всех группах крыс с СД и крыс без СД до начала эксперимента статистически значимых различий выявлено не было ($p > 0,05$). В дальнейшем в начале острой ишемии миокарда, в начале реперфузии и на протяжении всего периода реперфузии величина ДП в анализируемых группах крыс с СД и крыс без СД также статистически значимо не отличалась ($p > 0,05$). Кроме того, в начале ОИМ во всех группах животных с СД имело место статистически значимое снижение ДП ($p < 0,05$).

Длительность нарушений сердечного ритма во время 30-минутной окклюзии ПНКА (медиана и интерквартильный размах) у крыс с СД и крыс без СД представлена на рис. 1. В контрольной группе крыс с СД во время острой ишемии миокарда наблюдались нарушения ритма сердца общей длительностью от 3 до 628 с. При этом у 5 из 7 крыс данной группы была выявлена ФЖ, а у 6 из 7 – ПЖТ. Реперфузионные нарушения сердечного ритма отмечались у 5 крыс контрольной группы. В группе крыс с СД, в которой воспроизводился феномен ДИПК, длительность ишемических нарушений ритма сердца составила от 3 до 181 с. ФЖ имела место у 1 из 7 крыс данной группы ($p > 0,05$ по ТМФ), а ПЖТ – у 3 крыс ($p > 0,05$). Реперфузионные нарушения сердечного ритма отмечались у 3 крыс группы ДИПК ($p > 0,05$). В группе крыс с СД, в которой воспроизводился феномен ДИПостК, во время острой ишемии миокарда имели место наруше-

ния ритма сердца продолжительностью от 0 до 634 с. У 3 из 7 крыс была выявлена ФЖ ($p > 0,05$), ПЖТ отмечалась также у 3 крыс данной группы ($p > 0,05$). Реперфузионные нарушения сердечного ритма присутствовали у 4 животных группы ДИПостК ($p > 0,05$). Длительность аритмий в контрольной группе составила 221 (77; 431) с, в группе ДИПК – 56 (4; 165) с ($p < 0,05$), в группе ДИПостК – 218 (61; 289) с (рис. 1).

Таким образом, у крыс с СД выраженность аритмий во время острой коронарной окклюзии в контрольной группе и группе ДИПостК сопоставима, что вполне очевидно, учитывая тот факт, что ДИПостК не может оказывать влияние на нарушения сердечного ритма во время острой ишемии миокарда. В то же время в группе ДИПК имеет место статистически значимое снижение длительности ишемических нарушений сердечного ритма по сравнению с животными контрольной группы. Кроме того, несмотря на отсутствие статистически значимых различий, в группе ДИПК отмечается тенденция к снижению частоты возникновения ФЖ и ПЖТ во время острой ишемии миокарда по сравнению с животными контрольной группы. Следовательно, данные исследования указывают на то, что в группе крыс с СД, в которой воспроизводился феномен ДИПК, имеет место выраженный антиаритмический эффект указанного феномена.

При воспроизведении феноменов ДИПК и ДИПостК у крыс без СД длительность аритмий во время острой коронарной ишемии в контрольной группе составила 198 (14; 239) с, в группе ДИПК – 30 (3; 133) с ($p < 0,05$), в группе ДИПостК – 153 (109; 166) с. Таким образом, у крыс без СД длительность аритмий во время острой коронарной ишемии в контрольной группе и группе ДИПостК также сопоставима. Общая продолжительность ишемических нарушений ритма сердца в группе ДИПК у крыс без СД значительно меньше, чем в контрольной группе, следовательно, у крыс без СД антиаритмический эффект феномена ДИПК также воспроизводится.

Таким образом, у крыс с СД и крыс без СД имеет место выраженный антиаритмический эффект феномена ДИПК.

Так как статистически значимых различий между анализируемыми группами крыс с СД и крыс без СД по показателю размеров зоны риска в миокарде левого желудочка не выявлено ($p > 0,05$), есть основания заключить, что размеры зоны риска во всех группах крыс были сопоставимы (рис. 2).

На рис. 3 представлены размеры зоны некроза в миокарде левого желудочка во всех группах крыс с СД и крыс без СД. Средняя зона некроза в контрольной группе крыс с СД составила $33 \pm 4 \%$ (у крыс без СД – $44 \pm 5 \%$). В группе крыс с СД, в которой воспроизводился феномен ДИПК, формировался менее обширный некроз по сравнению с группой контроля – $23 \pm 3 \%$,

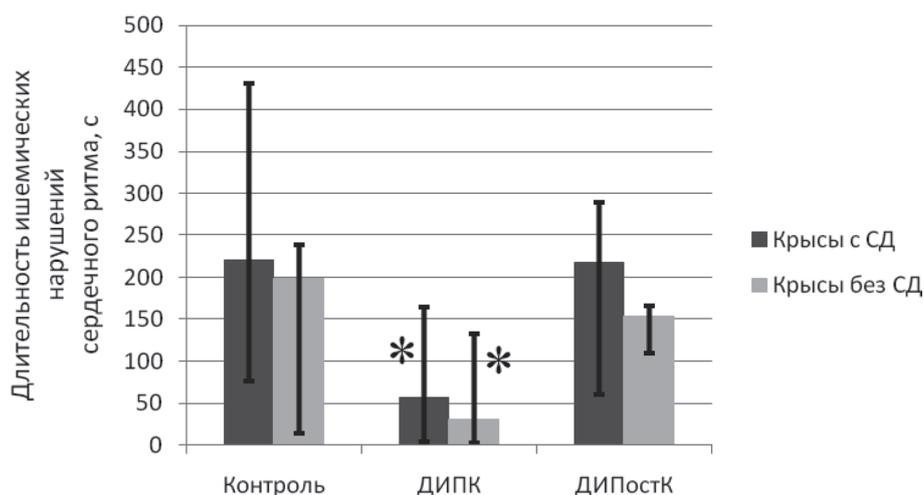


Рис. 1. Длительность нарушений сердечного ритма во время 30-минутной коронарной окклюзии в контрольной группе и группах крыс, в которых воспроизводились феномены ДИПК и ДИПостК (крысы с сахарным диабетом и без сахарного диабета). * – статистически значимые отличия длительности ишемических нарушений сердечного ритма в группе ДИПК у крыс с сахарным диабетом и без сахарного диабета по сравнению с соответствующей контрольной группой ($p < 0,05$)

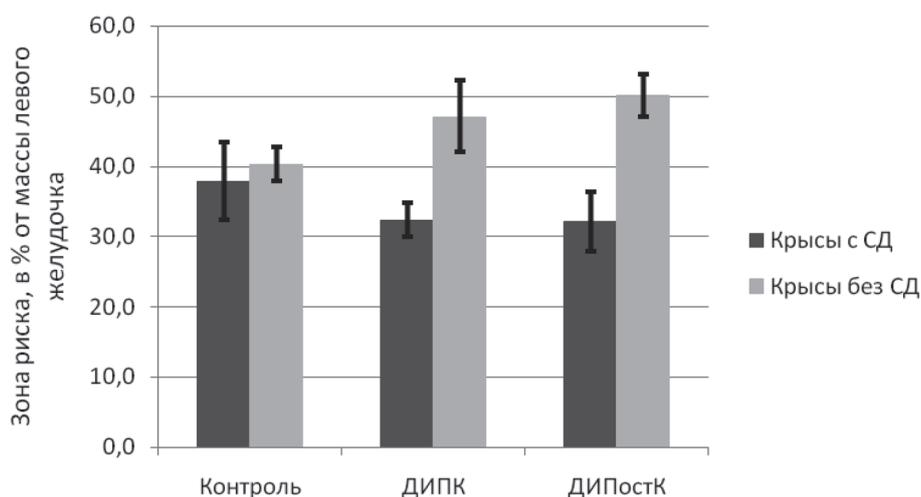


Рис. 2. Размеры зоны риска (в % от массы левого желудочка) в контрольной группе и группах крыс, в которых воспроизводились феномены ДИПК и ДИПостК (крысы с сахарным диабетом и без сахарного диабета)

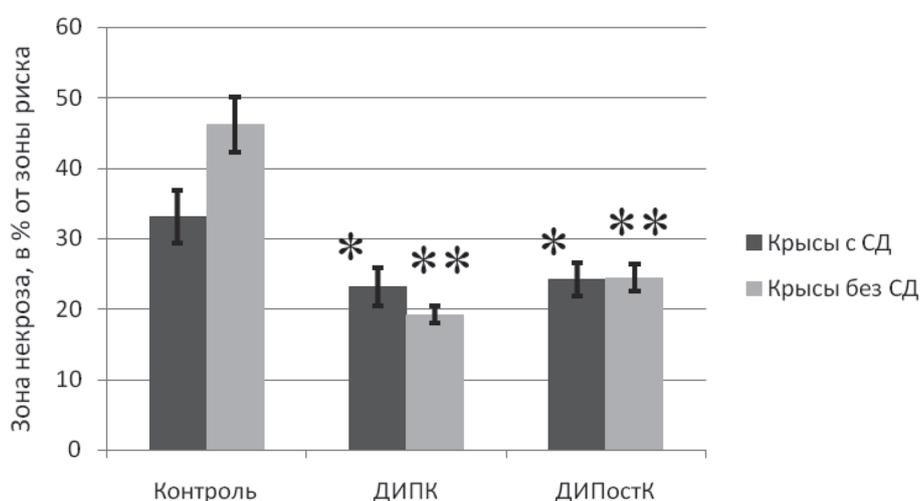


Рис. 3. Размеры зоны некроза (в % от зоны риска) в контрольной группе и группах крыс, в которых воспроизводились феномены ДИПК и ДИПостК (крысы с сахарным диабетом и без сахарного диабета): * – статистически значимые отличия размеров зоны некроза в группах ДИПК и ДИПостК у крыс с сахарным диабетом по сравнению с контрольной группой ($p < 0,05$); ** – статистически значимые отличия размеров зоны некроза в группах ДИПК и ДИПостК у крыс без сахарного диабета по сравнению с контрольной группой ($p < 0,01$)

$p < 0,05$ (у крыс без СД – $19 \pm 2 \%$, $p < 0,01$). В группе крыс с СД, в которой воспроизводился феномен ДИПостК, также отмечались меньшие размеры зоны некроза по сравнению с группой контроля – $24 \pm 2 \%$, $p < 0,05$ (у крыс без СД – $20 \pm 3 \%$, $p < 0,01$).

Таким образом, данные исследования свидетельствуют о наличии противоишемического эффекта ДИПК и ДИПостК как у крыс с СД, так и у животных без СД.

Как известно, действие стрептозотоцина с целью моделирования СД у экспериментальных животных приводит к активации процессов свободнорадикального окисления в β -клетках поджелудочной железы. Интенсификация этих процессов способствует нарушению целостности клеточных мембран β -клеток поджелудочной железы и снижению эффективности окислительного фосфорилирования в митохондриях, а также возникновению точечных мутаций ДНК данных клеток. Процесс репарации поврежденной ДНК энергозависим и протекает с расходом никотинамиддинуклеотида (НАД), что ведет к истощению клеточного пула НАД и некрозу β -клеток поджелудочной железы. Кроме повреждения β -клеток поджелудочной железы, которое приводит к нарушению секреции инсулина, важное значение в механизме повреждающего дей-

ствия стрептозотоцина также имеет развитие периферической инсулинорезистентности (особенно скелетных мышц, печени и жировой ткани). Таким образом, экспериментальная модель СД, воспроизводимая путем однократного внутривенного введения животным стрептозотоцина, характеризуется признаками СД I и II типов (смешанная форма) [5].

Как известно, при СД формируются многочисленные морфологические и функциональные изменения различных органов и систем организма. К ним относятся полинейропатия, ретинопатия, нефропатия, ангиопатия, кардиомиопатия и различные нарушения обмена веществ. В основе механизмов развития кардиомиопатии при СД лежат метаболические факторы, нарушение нервной регуляции сердца, микроангиопатия и, по мере развития атеросклероза коронарных сосудов, ишемия миокарда, что в итоге ведет к снижению сократительной функции левого желудочка [5].

Многочисленные экспериментальные исследования посвящены выявлению возможных причин отсутствия противоишемического эффекта локального ишемического пре- и посткондиционирования у экспериментальных животных с СД. Данные некоторых исследований указывают на то, что отсутствие противоишемического эффекта локального ишемического пре- и посткондиционирования у экспериментальных животных с СД связано со снижением уровня фосфорилирования Akt (протеинкиназы B), ERK1/2 (Extracellular signal-regulated kinases) и киназы гликогенсинтетазы-3 β (GSK-3 β), которые являются ключевыми компонентами RISK-киназного пути (The Reperfusion Injury Salvage Kinase) [6; 8; 10; 12]. Кроме того, при воспроизведении указанных феноменов у животных с экспериментальным СД отсутствие противоишемического эффекта может объясняться снижением активности STAT3 киназы, которая является ключевым компонентом SAFE-киназного пути (Survivor Activating Factor Enhancement) [15]. В свою очередь, RISK- и SAFE-киназные пути имеют важное значение в реализации кардиопротекторных эффектов локального ишемического пре- и посткондиционирования [6].

Кроме того, установлено, что при наличии СД у экспериментальных животных отсутствие противоишемического эффекта локального ишемического пре- и посткондиционирования может быть связано с нарушением синтеза монооксида азота (NO), который также имеет важное значение в реализации кардиопротекторных эффектов указанных феноменов [6; 13; 14]. В частности, M. Sack и соавт. (2011) указывают, что при СД нарастающая митохондриальная дисфункция приводит к повышению оксидации тетрагидробиоптерина (ТГБП), что ведет к снижению его содержания в клетке. Потеря ТГБП, как молекулы-кофактора эндотелиальной NO-синтетазы, приводит к значительному снижению активности данного фермента [13].

Принимая во внимание общность механизмов реализации кардиопротекторных эффектов феноменов локального и дистантного ишемического пре- и посткондиционирования, повреждение RISK- и SAFE-киназных путей, а также нарушения синтеза NO могут также иметь место при воспроизведении феноменов ДИПК и ДИПостК. Кроме того, можно предполагать, что повреждение указанных механизмов может объяснять данные, полученные Z. Nan и соавт. (2014), свидетельствующие об отсутствии противоишемического эффекта феномена ДИПостК у экспериментальных животных с СД [9].

Также стоит отметить, что полученные экспериментальные данные совпадают с результатами исследования X. H. Zhu и соавт. (2011), согласно которым при воспроизведении феномена ДИПК у крыс с экспериментальным СД имеет место выраженный противоишемический эффект указанного феномена [11]. Однако в исследовании X. H. Zhu и соавт. (2011) продолжительность экспериментального СД до моделирования острой ишемии миокарда составляла 1 неделю, что, по нашему мнению, является недостаточным для воздействия экспериментального СД на эндогенные механизмы кардиопротекции у крыс.

Выводы. Полученные экспериментальные данные позволяют заключить, что феномены дистантного ишемического пре- и посткондиционирования эффективны в плане ограничения размеров зоны некроза в миокарде левого желудочка крыс с сахарным диабетом. Феномен дистантного ишемического пре- и посткондиционирования эффективен в плане снижения длительности нарушений сердечного ритма у крыс с сахарным диабетом.

Литература

1. Мрочек А. Г. и др. Сердечно-сосудистые заболевания в Республике Беларусь: анализ ситуации и стратегии контроля. Минск, 2011.
2. Hausenloy D. J., Yellon D. M. // *Diabetes Obes. Metab.* 2008. Vol. 10, N 6. P. 451–459.
3. Li J., Xuan W., Yan R. et al. // *Clin. Sci.* 2011. Vol. 120, N 10. P. 451–462.
4. Basalay M., Barsukevich V., Mastitskaya S. et al. // *Experimental Physiology.* 2012. Vol. 97, N 8. P. 908–917.
5. Миронов А. Н., Бунятян Н. Д., Васильев А. Н. и др. Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств. М., 2012.
6. Ferdinandy P., Hausenloy D., Heusch G. et al. // *Pharmacol. Rev.* 2014. Vol. 66. P. 1142–1174.
7. Kiss A., Tratsiakovich Y., Gonon A. T. et al. // *PLoS One.* 2014. Vol. 9, N 8. P. 24–30.
8. Whittington H. J., Harding I., Stephenson C. I. et al. // *Cardiovasc. Res.* 2013. Vol. 99, N 4. P. 694–704.
9. Han Z., Cao J., Song D. et al. // *PLoS One.* 2014. Vol. 9, N 1. P. 14–20.
10. Przyklenk K., Maynard M., Greiner D. et al. // *Antioxid Redox Signal.* 2011. Vol. 14. P. 781–790.
11. Zhu X. H., Yuan H. J., Wu Y. N. et al. // *Free Radic. Res.* 2011. Vol. 45. P. 201–210.
12. Hausenloy D. J., Yellon D. M. // *Heart Fail. Rev.* 2007. Vol. 12. P. 217–234.
13. Sack M., Murphy E. // *J. Cardiovasc. Pharmacol. Ther.* 2011. Vol. 16. P. 267–272.
14. Mollnau H., Oelze M., Zinßius E. et al. // *Arch. Pharmacol.* 2013. Vol. 386, N 5. P. 405–419.
15. Lecour S. // *J. Mol. Cell. Cardiol.* 2009. Vol. 47. P. 32–40.

P. F. JUSHKEVICH, F. I. VISMONT

jushkevich@tut.by

ANTIISCHEMIC AND ANTIARRHYTHMIC EFFECTS OF REMOTE ISCHEMIC PRE- AND POSTCONDITIONING IN RATS WITH DIABETES

Summary

The aim of this study was to determine the antiischemic and antiarrhythmic effects of remote ischemic pre- and post-conditioning in rats with diabetes. It was found that remote ischemic pre- and post-conditioning equally protects myocardium against irreversible ischemia-reperfusion injury. Remote ischemic pre-conditioning protected myocardium against arrhythmias in rats with diabetes.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 630.86+519.63

Академик В. Е. АГАБЕКОВ¹, академик И. В. ГАЙШУН², М. М. ЧУЙКО²,
А. И. ШНИП³, Д. А. СТРИЖАКОВ¹

**МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА БЫСТРОГО ПИРОЛИЗА
МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ФРАКЦИЙ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ**

¹Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск

²Институт математики НАН Беларуси, Минск

³Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск

Поступило 11.06.2014

Введение. Получение из возобновляемого растительного сырья ценных химических компонентов, альтернативных продуктам нефтяного происхождения, является актуальной проблемой для большинства стран мира.

На сегодняшний день основным направлением исследований в данной области является быстрый пиролиз биомассы с получением «бионефти», которая представляет собой сложную смесь кислородсодержащих органических соединений, включающих карбоновые кислоты, спирты, альдегиды, эфиры, производные фенола и др. [1; 2] и перерабатывается в моторное топливо в процессе парового риформинга [3] и гидрокрекинга [4].

Объектом данного исследования являются сосновые опилки (*Pinus Silvestris*). Интерес представляет исследование влияния исходных характеристик опилок (размер, влажность, начальная температура) и режимных параметров процесса (температура и давление в реакторе) на глубину и необходимое время протекания их быстрого пиролиза.

Цель работы – построить физико-математическую модель быстрого пиролиза сосновых опилок, разработать конечноразностные алгоритмы и провести вычислительные эксперименты по моделированию процесса.

Физико-математическая модель быстрого пиролиза. Термическое разложение древесной частицы с математической точки зрения представляет собой задачу тепломассообмена в пористой среде при наличии химических превращений.

В случае пиролиза древесины, в отсутствие разрушения пористой структуры ее каркаса, целесообразно рассмотреть случай термического разложения сосновых опилок с учетом фильтрации продуктов пиролиза. В этом случае предполагается, что перенос газообразных продуктов термохимической деструкции опилок из зоны термического разложения осуществляется преимущественно фильтрацией в соответствии с законом Дарси. При этом математическая модель должна предусматривать следующие основные физико-химические процессы: перенос энергии и массы в пористой среде с жестким каркасом твердой частицы и переменным объемом пор, химические реакции термического разложения, тепло- и массообмен между каркасом и парогазовой фазой в порах, перенос энергии и массы в парогазовой фазе.

Обзор эволюции математических моделей пиролиза представлен в [5], из которого следует, что они основаны на предположении локального термического равновесия между твердой фазой и движущейся паровой фазой.

В математической модели, предложенной в данной работе, при расчете процесса пиролиза древесных опилок это предположение не используется, т. е. учитывается теплообмен между твердой фазой (каркасом частицы) и движущейся паровой фазой (продуктами пиролиза). Кроме

того, учитывается экспериментально наблюдаемый при пиролизе мелкодисперсных органических продуктов факт, что частицы непрореагировавшего остатка после пиролиза сохраняют практически тот же размер и форму, что и первоначальные частицы. Это означает, что происходит увеличение пористости частицы за счет убыли ее массы при конверсии. Это позволяет моделировать процесс пиролиза в предположении, что частица состоит из трех фаз: неразлагаемая фаза в виде жесткого высокопористого каркаса (твердый остаток), конвертируемая органическая фаза и вода.

Целью моделирования является установление закономерностей протекания быстрого пиролиза в мелких древесных частицах (опилки с характерным размером 0,4 мм), свободно падающих (либо витающих в псевдооживленном слое) в газовой атмосфере разогретого реактора от момента их загрузки в реактор до полной конверсии. Предполагается, что загрузка частиц в реактор производится таким образом, что среднее расстояние между частицами в атмосфере реактора много больше их радиуса, вследствие чего термогидродинамическое взаимодействие между отдельными частицами можно исключить. Это позволяет при построении физико-математической модели рассматривать одну отдельную частицу.

Будем предполагать, что пористая частица сферической формы со связанными порами обтекается газовым потоком с заданной температурой T_{out} (система координат связана с частицей). Предполагается, что первоначально каркас частицы состоит из трех фаз: конвертируемой (лигнин, целлюлоза, гемицеллюлозы) и неконвертируемой фазы, а также воды в количестве, соответствующем начальной влажности частицы. Частица прогревается за счет конвективного теплообмена с газовым потоком и за счет лучистого теплообмена со стенками реактора, имеющего ту же что и газ температуру T_{out} . По мере прогрева частицы начинается испарение воды и в заданном диапазоне температур от T_{ei} до T_{ef} влага полностью испаряется, при этом потребление тепла на испарение влаги моделируется соответствующим выражением для внутренней энергии каркаса частицы, а унос массы каркаса с паром – учетом зависимости плотности частицы от влагосодержания.

По мере дальнейшего прогрева уже абсолютно сухой частицы начинается процесс пиролиза, описываемый уравнениями химической кинетики, возникает газопаровая фаза, которая фильтруется сквозь поры частицы наружу, обмениваясь теплом с каркасом. При этом поровый каркас частицы утоньшается за счет ухода конвертируемой фазы в газопаровую фазу, однако внешняя форма частицы сохраняется, увеличивается лишь ее пористость. Конечной стадией процесса будет полный прогрев частицы и полное разложение ее конвертируемой части. На этой стадии поровый каркас частицы состоит практически из одного углерода (неконвертируемая фаза). Эти процессы описываются на основе представлений о двух взаимнопроникающих континуумах (поровый каркас частицы и газопаровая фаза), между которыми осуществляется тепло- и массообмен.

Введем следующие обозначения: ρ_{0w} , ρ_0 – начальная плотность влажной и абсолютно сухой частицы сосновых опилок соответственно, P_0 – начальная пористость частицы; ρ_c , P_c – плотность и пористость конвертированной частицы; $\rho_l = \rho_0 - \rho_c$, $\rho_w = \rho_{0w} - \rho_0$ – средние по частице начальные плотности конвертируемого вещества и влаги; $\xi = \tilde{\rho}_w / \rho_w$, $\varepsilon = \tilde{\rho}_l / \rho_l$ – доли неиспарившейся влаги и неразложившегося конвертируемого вещества соответственно ($\tilde{\rho}_w$, $\tilde{\rho}_l$ – текущие плотности влаги и конвертируемого вещества в частице). Ниже параметр ε называется степенью реакции.

Зависимость плотности и пористости частицы от доли неразложившегося конвертируемого вещества и доли оставшейся влаги определяется как

$$\rho(\varepsilon, \xi) = \rho_c + \varepsilon \rho_l + \xi \rho_w, \quad P(\varepsilon) = (P_0 - P_c)\varepsilon + P_c.$$

Плотность газовой фазы в элементарном объеме пористой частицы зависит от пористости P и плотности газовой фазы в межпоровом пространстве ρ_v

$$\rho_g(p, T_v, \varepsilon) = \rho_v(p, T_v)P(\varepsilon),$$

где

$$\rho_v(p, T_v) = \frac{\mu p}{R_A T_v}, \quad (1)$$

где p – давление; R_A – универсальная газовая постоянная; μ – молярная масса продуктов термоллиза.

Математическая модель термогазодинамических процессов пиролиза частицы сосновых опилок. Математическая модель процесса пиролиза строится как система уравнений баланса массы газовой фазы с источниковым членом, контролируемым уравнением химической кинетики, самим уравнением химической кинетики и уравнениями баланса энергии для газовой фазы и жесткого каркаса с переменной массой с учетом межфазного (каркас–газ) теплообмена. В результате получается следующая начально-краевая задача:

баланс массы газовой фазы

$$\frac{\partial(\rho_v P(\varepsilon))}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho_v P(\varepsilon) v) = -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \rho_l; \quad (2)$$

уравнение химической кинетики [6]

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -A \exp\left(-\frac{E}{R_A T}\right) \varepsilon^n, \quad (3)$$

где R_A – универсальная газовая постоянная; E – энергия активации; A – предэкспоненциальный множитель; n – порядок реакции;

уравнение фильтрации [6]

$$v = -\beta \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (4)$$

где β – коэффициент фильтрации;

уравнение баланса энергии для газопаровой фазы

$$C_v \rho_v P(\varepsilon) \left(\frac{\partial T_v}{\partial t} + v \frac{\partial T_v}{\partial r} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_g r^2 \frac{\partial T_v}{\partial r} \right) - \rho_l \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} (C_v (T - T_v) + H) + \alpha (T - T_v) - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 p v); \quad (5)$$

уравнение баланса энергии для каркаса частицы

$$\left(\rho_c C_c + \varepsilon \rho_l C_l + C_w \rho_w \xi(T) - Q_w \rho_w \frac{d\xi(T)}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(\varepsilon) r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \alpha (T_v - T). \quad (6)$$

Здесь $T(r, t)$ и $T_v(r, t)$ – температура каркаса и газопаровой фазы соответственно; C_l, C_c – удельные теплоемкости вещества конверсируемой и не конверсируемой частей каркаса; C_w – теплоемкость воды; Q_w – удельная теплота парообразования воды; H – удельная теплота реакции.

Подставив выражения для плотности газовой фазы ρ_v из (1) и скорости газовой фазы v из (4) в уравнение баланса массы (2) получим следующее выражение:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P(\varepsilon) p}{T_v} \right) - \frac{\beta}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{P(\varepsilon) p}{T_v} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = -\frac{R_A}{\mu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \rho_l \quad (7)$$

для нахождения давления $p(r, t)$ в паровой фазе.

Для системы дифференциальных уравнений (3)–(7) в момент времени $t = 0$ задаются начальные условия

$$T = T_{\text{init}}, \quad T_v = T_{\text{init}}, \quad v = 0, \quad \varepsilon = 1, \quad p = p_{\text{out}}; \quad (8)$$

на поверхности частицы при $r = R$ задаются краевые условия:

$$\begin{aligned} -\lambda(\varepsilon) \frac{dT}{dr} &= \alpha_{\text{out}} (T - T_{\text{out}}) + \omega \sigma (T^4 - T_{\text{out}}^4), \\ -\lambda_g \frac{dT_v}{dr} &= \alpha_{\text{out}} (T_v - T_{\text{out}}) + \omega \sigma (T_v^4 - T_{\text{out}}^4), \quad p = p_{\text{out}}, \end{aligned} \quad (9)$$

в центре частицы в силу симметрии краевые условия принимают вид

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T_v}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad v = 0. \quad (10)$$

Здесь T_{init} – начальная температура частицы; T_{out} , p_{out} – температура и давление в реакторе; ω – степень черноты; σ – постоянная Стефана–Больцмана.

Для численного представления уравнений математической модели использовались неявные разностные схемы, которые являются безусловно устойчивыми и не требуют ограничений на временной шаг.

В силу нелинейности построенных разностных схем для их реализации используем метод блочных итераций, который состоит из двух вложенных циклов: внутреннего цикла нахождения параметров газовой фазы и внешнего цикла определения температуры каркаса и степени реакции.

На каждом шаге итерационного процесса системы алгебраических уравнений с трехдиагональными матрицами решались методом прогонки.

Вычислительный эксперимент. Для вычислительных экспериментов при определении динамики процесса и влияния характеристик частицы и входных параметров на время пиролиза сосновых опилок использовались следующие теплофизические параметры [8]: $E = 177$ кДж/моль – энергия активации; $A = 1,9 \cdot 10^{12}$ сек⁻¹ – предэкспоненциальный множитель; $\rho_0 = 520$ кг/м³ – плотность абсолютно сухой частицы; $\rho_c = 120$ кг/м³ – плотность конверсированной частицы; $P_0 = 0,20$ – пористость частицы; $P_c = 0,90$ – пористость конверсированной частицы; $C_0 = 1420$ Дж/(кг · К) – теплоемкость частицы; $C_c = 1210$ Дж/(кг · К) – теплоемкость угля; $C_v = 1800$ Дж/(кг · К) – теплоемкость продуктов; $\lambda = 0,4$ Вт/(м · К) – коэффициент теплопроводности частицы; $\lambda_g = 0,03$ Вт/(м · К) – коэффициент теплопроводности газовой фазы; $\alpha = 5 \cdot 10^9$ Вт/(м³ · К) – коэффициент теплообмена каркас–газ; $\alpha_{\text{out}} = 470$ Вт/(м² · К) – коэффициент теплообмена с внешней средой; $\mu = 0,056$ кг/моль – молярная масса продуктов; $H = 2,38 \cdot 10^6$ Дж/кг – теплота реакции; $\beta = 4,1 \cdot 10^{-9}$ Па · с/м² – коэффициент фильтрации; $T_{\text{ei}} = 100$ °С – температура начала интервала испарения; $\Delta T_e = 20$ °С – ширина интервала испарения.

При проведении вычислительных экспериментов шаг интегрирования по времени варьировался в зависимости от числа итераций, необходимых для достижения заданной точности определения температур газовой фазы и жесткого каркаса.

Основным условием, определяющим возможность протекания быстрого пиролиза древесных опилок с образованием жидких продуктов (выход 70–80 мас. %), является их нагрев до температуры 450–550 °С со скоростью нагрева сырья ~1000 °С/сек [9]. На основании вычислительных экспериментов установлено, что скорость нагрева сосновых опилок существенно зависит от их размера. Так, при попадании сосновых опилок влажностью 10,0 мас. % в реактор разогретый до 500 °С быстрый нагрев (1000 °С/сек) будет наблюдаться лишь для частиц, диаметр которых не превышает 0,45–0,48 мм, при этом скорость разогрева сосновых опилок размером 0,6 и 0,8 мм будет составлять соответственно 724 и 456 °С/сек (рис. 1).

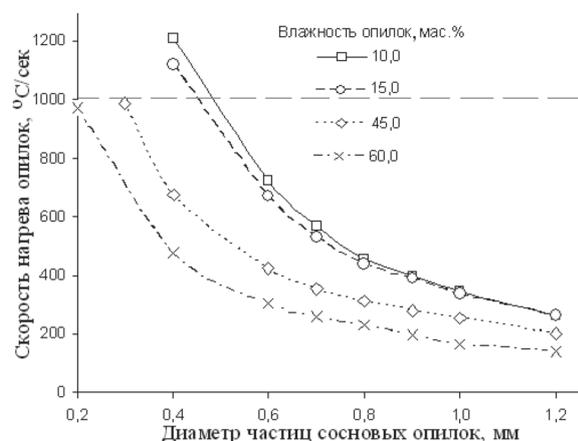


Рис. 1. Зависимость скорости нагрева сосновых опилок с влажностью 10,0; 15,0; 45,0 и 60,0 мас. % от размера их частиц. Температура в реакторе – 500 °С

Скорость нагрева сосновых опилок также уменьшается с увеличением их влажности и достигает 675 и 477 °С/сек для частиц диаметром 0,4 мм при их влагосодержании 45,0 и 60,0 мас. % соответственно. Влияние влажности на скорость разогрева сосновых опилок снижается с ростом размера их частиц (рис. 1).

На основании вычислительных экспериментов установлено, что скорость разогрева сосновых опилок значительно увеличивается с ростом температуры процесса пиролиза и при 520 °С составляет 1602 °С/сек для опилок размером 0,4 мм и влажностью 10,0 мас. %. В свою очередь быстрый пиролиз вышеуказанных опилок, поступающих порциями в разогретый реактор, не возможен при температуре процесса ниже 490 °С (рис. 2).

Показано (рис. 3), что время, затраченное непосредственно на разложение опилок до жидких и газообразных продуктов в процессе быстрого пиролиза при 500 °С, практически не зависит от размера их частиц и происходит в течение 0,1 сек. В свою очередь, с ростом диаметра частиц сосновых опилок увеличивается продолжительность разогрева образцов до температуры, необходимой для их термодеструкции, и составляет 0,3; 0,6 и 1,0 сек для опилок размером 0,4; 0,6 и 0,8 мм соответственно.

При проведении вычислительного эксперимента имеется возможность исследования изменения термогазодинамических параметров процесса быстрого пиролиза опилок во времени и их распределение по радиусу частицы. Так, расчеты показывают, что процесс нагрева частицы до температуры реакции происходит при небольшом перепаде температуры между поверхностью и центром частицы, в то время как процесс пиролиза осуществляется в виде сравнительно узкого фронта реакции распространяющегося от периферии частицы к ее центру. Например, при пиролизе сосновых опилок размером 0,4 мм в момент времени $t = 0,241$ сек от попадания в реактор фронт реакции находится примерно на половине радиуса частицы, а в результате выделения тепла за счет термодеструкции их основных компонентов в зоне фронта реакции происходит разогрев каркаса до температуры 1500 °С, при этом степень разложения опилок $1 - \epsilon$ в процентах составляет 100 % за фронтом, в то время как в центре частицы только 30 % (рис. 4).

Заключение. Построена физико-математическая модель процесса быстрого пиролиза сосновых опилок, позволяющая по заданным параметрам поступающих в реактор опилок (размер частиц, их влажность и температура) и режимным параметрам процесса (температура и давление в реакторе) определять глубину протекания пиролиза, распределение термогазодинамических параметров в частице. Приведены результаты вычислительного эксперимента по моделированию процесса быстрого пиролиза опилок.

Предложенные физико-математическая модель и вычислительный алгоритм могут быть использованы для расчета конструктивных параметров реактора быстрого пиролиза древесных опилок, а также оптимизации режимов проведения процесса.

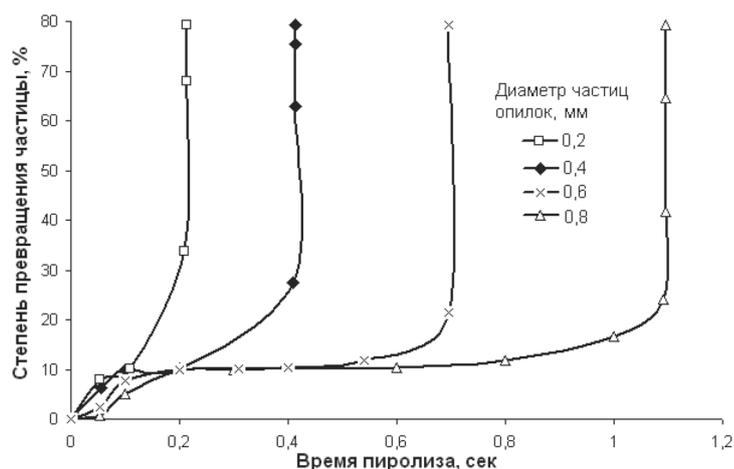


Рис. 3. Зависимость степени превращения сосновых опилок от продолжительности их пиролиза. Температура в реакторе – 500 °С, влажность опилок – 10,0 мас. %

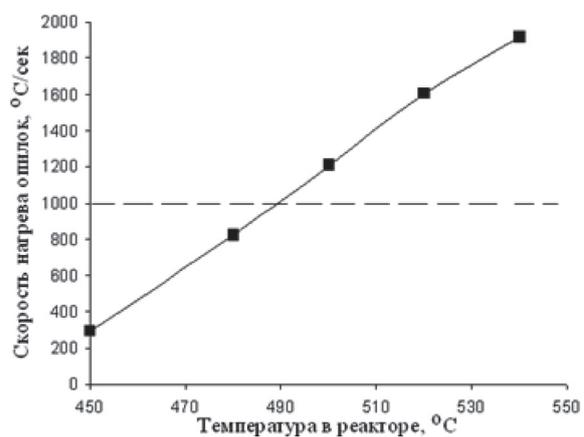


Рис. 2. Зависимость скорости нагрева сосновых опилок размером 0,4 мм и влажностью 10,0 мас. % от температуры в реакторе

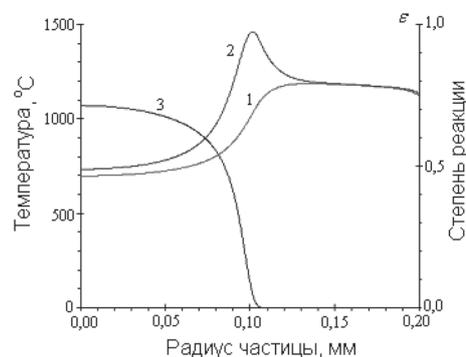


Рис. 4. Распределение термогазодинамических параметров по сечению частицы (1 – $T(r, t)$, 2 – $T_2(r, t)$, 3 – $\epsilon(r, t)$, диаметр – 0,4 мм, $t = 0,241$ сек

На основании вычислительных экспериментов установлено, что быстрый пиролиз сосновых опилок, поступающих в разогретый реактор, возможен при размере их частиц, не превышающем 0,45 мм, влажности 10–15 мас. % и при температуре пиролиза выше 490 °С.

Литература

1. Aho A., Kumar H., Eranen K. et al. // Fuel. 2008. Vol. 87. P. 2493–2501.
2. Aho A., Kumar H., Eranen K. et al. // Process Saf. Environ. Prot. 2007. Vol. 85. P. 473–480.
3. Czernik S., French R., Feick C., Chornet E. // Ind. Eng. Chem. Res. 2002. Vol. 41. P. 4209–4215.
4. Elliott D. C. // Energy Fuels. 2007. Vol. 21, N 3. P. 1792–1815.
5. Prakash N., Karunanithi T. // Asian J. Sci. Res. 2009. Vol. 2. P. 1–27.
6. Hagge M. J., Bryden K. M. // Chem. Eng. Sci. 2005. Vol. 57. P. 2811–2823.
7. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1989.
8. Peters B., Bruch C. // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2003. Vol. 70, N 2. P. 233–250.
9. Mohan D., Pittman C. U., Steele P. H. // Energy and Fuels. 2006. Vol. 20. P. 848–889.

V. E. AGABEKOV, I. V. GAISHUN, M. M. CHUIKO, A. I. SHNIP, D. A. STRIZHAKOV

ichnm@ichnm.basnet.by; chuiko@im.bas-net.by; shnip@hmti.ac.by

MODEL OF THE PROCESS OF FAST PYROLYSIS OF PINE SAWDUST

Summary

The mathematical model of the fast pyrolysis of wood particles is presented. The implicit finite difference algorithm for solving the obtained heat and mass transfer equations is constructed. Based on the computational experiments it was found that the fast pyrolysis of pine sawdust entering a heated reactor is possible when the size of their particles does not exceed 0.45 mm, humidity – 10–15 wt. % and at a pyrolysis temperature of above 490 °C.

УДК 532.516; 620.9

В. Д. ТЮТЮМА

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ МОДЕЛИ
ЛОКАЛЬНО-НЕРАВНОВЕСНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ***(Представлено академиком А. А. Михалевичем)**Институт энергетики НАН Беларуси, Минск**Поступило 03.12.2014*

Введение. Многие проблемы теории вязких течений носят концептуальный характер и не могут быть решены в рамках существующего подхода к описанию тепловых и механических процессов в потоках вязкой жидкости. Существенный недостаток современной теории движения вязкой среды заключается в том, что в ней не учитываются некоторые важные физические особенности взаимовлияния различных процессов в движущемся элементарном объеме. Это характерно, прежде всего, для напорных течений при отсутствии массовых сил, где движущийся поток порождает звуковые волны, которые, распространяясь и взаимодействуя друг с другом, оказывают обратное влияние на параметры течения. В этом случае движущаяся среда уже не может рассматриваться как единая термодинамическая система, подчиняющаяся одним и тем же закономерностям [1].

В настоящее время для описания течения вязкой сжимаемой среды построены две теоретические модели – система уравнений Навье–Стокса [2–4] и предложенная в [5] замкнутая система дифференциальных уравнений, учитывающая волновой механизм передачи упругих взаимодействий в движущейся среде.

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. Концептуальная сторона постановки такого решающего эксперимента рассматривалась в [6]. В основу эксперимента было предложено положить характерные для каждой модели особенности развития тепловых процессов при выделении тепла диссипации в сдвиговом течении Куэтта между двумя плоскими параллельными стенками. Уникальность постановки такого эксперимента заключается в том, что в нем различия между двумя теоретическими моделями проявляются наиболее ярко, так как разные подходы предсказывают совершенно противоположные результаты, взаимно исключающие друг друга.

Теоретическое обоснование эксперимента. Проведение эксперимента с использованием плоского течения Куэтта между двумя параллельными плоскостями сопряжено с определенными техническими трудностями его реализации. Практически сдвиговое течение более просто осуществить в зазоре между двумя вращающимися коаксиальными цилиндрами. Приведем некоторые результаты анализа такого течения в зазоре между внешним неподвижным и внутренним вращающимся цилиндром с учетом тепла диссипации на основе двух указанных выше теоретических моделей течения вязкой жидкости.

Выражение для распределения давления в щелевом зазоре, на основе уравнений Навье–Стокса, в плоском случае получено в [6]. Распределение давления в зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами конечной длины b , один из которых внутренний вращается с угловой скоростью Ω_1 , имеет более сложный вид

$$p_2 = p_0 \exp \frac{Q}{RT(z)}; \quad Q = \frac{r_1^4 \Omega_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{4r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_2^2}{r_1^2} \right).$$

Анализ этой зависимости показал, что при малой ширине зазора между цилиндрами величина избыточного давления, возникающего за счет центробежной силы, является пренебрежимо малой и составляет по порядку величины 10^{-3} Па. Поэтому давление в узком зазоре с большой степенью точности можно принять постоянным, равным давлению окружающей среды и независимым от распределения температуры. Таким образом, на основании полученного решения можно сделать вывод о том, что движение жидкости в зазоре между цилиндрами является баротропным.

Решение этой же задачи в приближении локально-неравновесного течения [5] приводит к зависимости

$$\rho_2 = \rho_0 = \text{const}, \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность окружающей среды.

Интегрирование уравнения энергии с учетом тепла диссипации при граничных условиях

$$T|_{z=0} = T_0; T|_{z=b} = T_0$$

для распределения температуры дает решение

$$T(z) = T_0 + \frac{4k\mu b^2}{\lambda r_1^2 r_2^2} \left(\frac{r_1^2 r_2^2 \Omega_1}{r_2^2 - r_1^2} \right)^2 \frac{z}{b} \left(1 - \frac{z}{b} \right). \quad (2)$$

В этой формуле коэффициент k – неизвестный эмпирический параметр задачи, учитывающий влияние потерь тепла через стенки цилиндрических поверхностей.

Подставив выражения (1) и (2) в уравнение состояния

$$p = \rho RT,$$

для распределения давления внутри щелевого зазора получим выражение

$$p(z) = p_0 \left(1 + \frac{4k\mu b^2}{\lambda r_1^2 r_2^2 T_0} \left(\frac{r_1^2 r_2^2 \Omega_1}{r_2^2 - r_1^2} \right)^2 \frac{z}{b} \left(1 - \frac{z}{b} \right) \right), \quad (3)$$

где p_0 – давление окружающей среды.

Таким образом, в локально-неравновесном случае течение в зазоре между цилиндрами носит изохорный характер, а температура и давление внутри зазора из-за диссипации механической энергии увеличиваются и превышают значения температуры и давления в окружающей среде. Причем давление и температура растут с увеличением скорости вращения цилиндра по параболическому закону.

Методика проведения эксперимента и результаты измерений. Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Она включает в себя неподвижный цилиндр 2, который одновременно является и корпусом, в котором посредством фланца 5 закреплен электродвигатель 3. На выходном валу электродвигателя насажен вращающийся цилиндр 1. В точках А, В, С, расположенных через 120° по длине окружности внешнего цилиндра, вдоль образующих просверлены по три дренажных отверстия $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3$, которые предназначены для замера давления в зазоре между цилиндрами. Отверстия от верхнего среза просверлены на расстояниях, которые составляют 0,25; 0,5 и 0,75 высоты внутреннего цилиндра. Для подсоединения соединительных шлангов отверстия снабжены штуцерами, которые на схеме не показаны. Юстировка соосности цилиндров осуществляется тремя регулировочными винтами 4, которые установлены через 120° по длине окружности корпуса установки. Диаметр вращающегося цилиндра по результатам замеров составлял $D_1 = 60,05^{\pm 0,01}$ мм, высота равнялась $40^{\pm 0,1}$ мм. Внутренний диаметр неподвижного цилиндра равен $60,1^{\pm 0,01}$ мм. Ширина зазора между цилиндрами равнялась $h = 75^{\pm 5}$ мкм. Внутренняя поверхность неподвижного цилиндра и наружная поверхность вращающегося цилиндра полировались. При этом среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости задавалось на уровне $Ra = 0,8$. Биения вращающегося цилиндра не превышали 0,01 мм. Размеры выбирались из условия, чтобы во всем диапазоне угловых скоростей

вращения внутреннего цилиндра соблюдался ламинарный режим течения. Для указанных размеров при максимальной скорости вращения внутреннего цилиндра 40000 об/мин максимальное значение числа Тейлора составляет $Ta_{\max} = 31,3$, что меньше критического значения $Ta_{кр} = 41,3$, а максимальное значение числа Рейнольдса – 626, что намного меньше критического числа Рейнольдса $Re_{кр} = 3960$ перехода ламинарного течения в турбулентное [3]. Давление измерялось микроманометром ММН-2400 (5)-1,0. В процессе измерений скорость вращения внутреннего цилиндра варьировалась в диапазоне 100–33000 об/мин. Частота вращения регистрировалась цифровым стробоскопическим тахометром Testo 465 с диапазоном измерений от 1 до 100000 об/мин, систематическая погрешность измерения которого составляет $\pm 0,02\%$ от измеренного значения.

Замеры проводились в следующей последовательности. С помощью электронной системы управления устанавливались определенные обороты электродвигателя, которые замерялись цифровым стробоскопическим тахометром. После чего с помощью микроманометра измерялись давления в точках А, В, С, расположенных на одной высоте. По измеренным значениям давления, вращая юстировочные винты 4, добивались совпадения его в трех точках. Это давление и фиксировалось вместе с оборотами цилиндра.

Результаты измерений представлены на рис. 2. Как видно из представленных данных, избыточное давление в щелевом зазоре вопреки предсказаниям теории Навье–Стокса не равно нулю, а растет с увеличением угловой скорости вращения внутреннего цилиндра по квадратичному закону. Результат находится в хорошем согласии с выводами теории, учитывающей волновой механизм распространения упругих взаимодействий. Следует отметить высокую степень достоверности аппроксимации полученных экспериментальных данных. Обращает на себя внимание также наличие в уравнениях аппроксимирующих кривых членов первого порядка, что может быть объяснено наличием незначительного эксцентриситета соосности цилиндров из-за зазора в подшипниках электродвигателя. В этом случае в зависимости давления от угловой скорости присутствуют члены первой степени от Ω_1 .

Следует указать также на отсутствие симметрии в расположении экспериментальных точек при $z = 0,25$ и $z = 0,75$ относительно середины высоты цилиндра, что связано с особенностями конструкции установки. В верхней части щелевой зазор контактирует с окружающим воздухом. Нижняя часть щелевого зазора находится внутри корпуса, где температура из-за тепловыделения электродвигателя в процессе эксперимента повышается. Поэтому температура окружающего воздуха при $z = 0$ и $z = 1$ не совпадает. При этом плотность в щелевом канале становится уже не постоянной, а изменяется по высоте цилиндра, убывая от верхней точки к нижней.

На рис. 3 приведено сравнение экспериментальных и теоретических кривых, рассчитанных по формуле (3) при $k = 1,12 \cdot 10^{-7}$. Как видно из графиков при $z = 0,5$ совпадение теоретической и экспериментальной кривой, учитывая одномерность теории и приближенный характер описания тепловой задачи, достаточно хорошее. Совпадение же теоретических кривых при $z = 0,25$ и $z = 0,75$ с экспериментальными данными в силу указанных выше причин и влияния краевых эффектов значительно хуже.

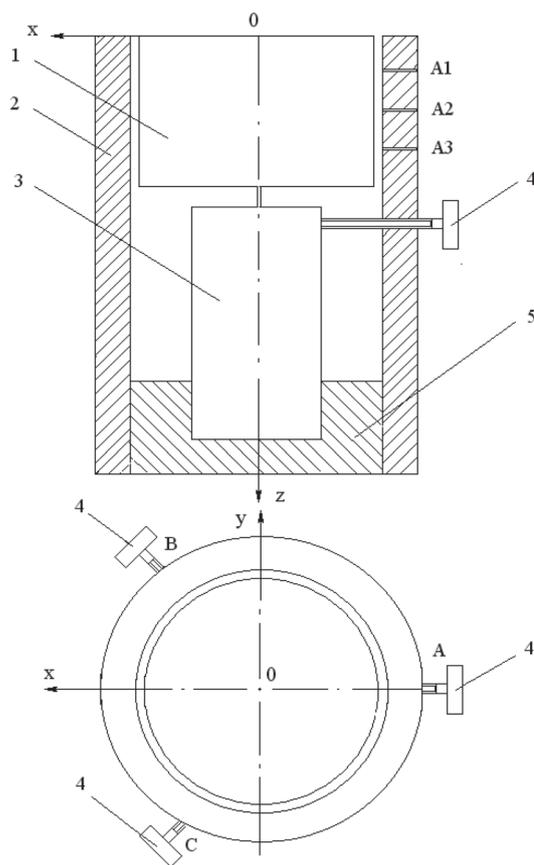


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – вращающийся цилиндр; 2 – неподвижный цилиндр; 3 – электродвигатель; 4 – регулировочные винты; А, В, С – места расположения дренажных отверстий для замера давления в зазоре между цилиндрами; А₁, А₂, А₃ – дренажные отверстия в корпусе установки

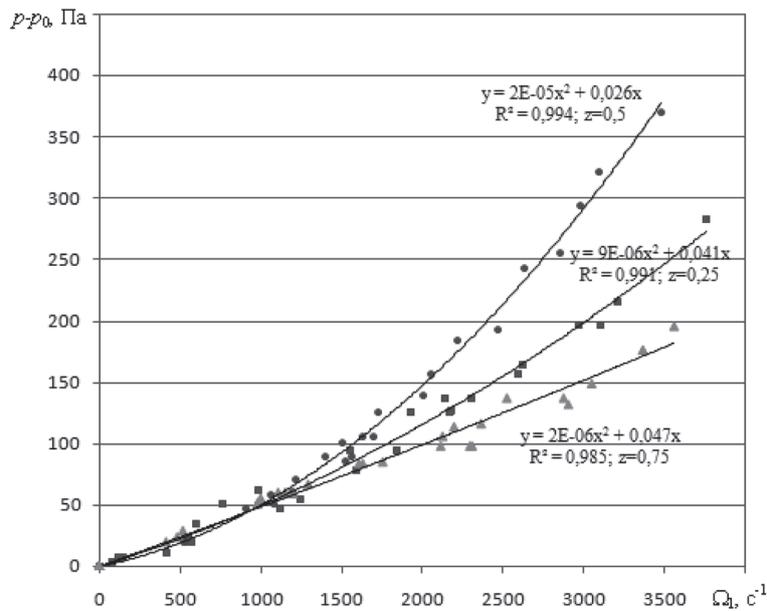


Рис. 2. Измеренные значения избыточного давления в зазоре между цилиндрами в зависимости от угловой скорости вращения внутреннего цилиндра

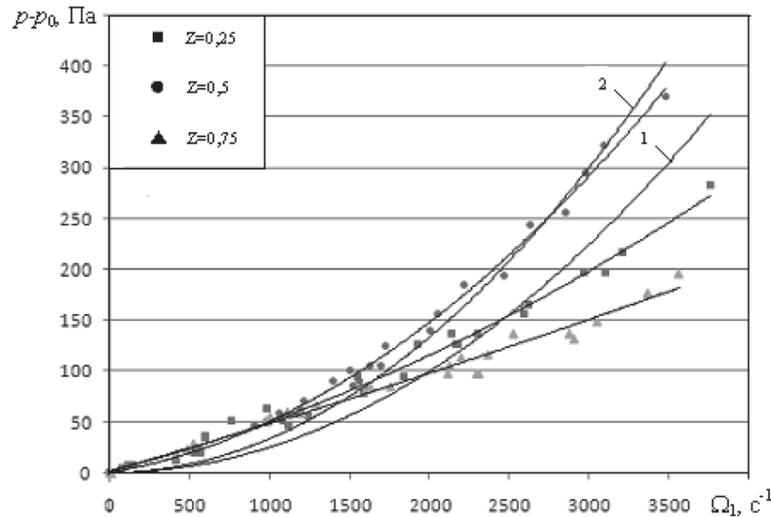


Рис. 3. Сравнение теоретических зависимостей, рассчитанных по формуле (3), с экспериментальными данными ($k = 1,12 \cdot 10^{-7}$): 1 – теоретические кривые $z = 0,25$ и $z = 0,75$; 2 – $z = 0,5$

Заключение. Проведенное экспериментальное исследование подтверждает, что полученные на основе теоретической модели локально-неравновесного течения зависимости не только качественно, но и количественно совпадают с экспериментом. Это указывает на то, что концептуально теория течения вязкой сжимаемой среды должна строиться с учетом волнового принципа распространения малых возмущений, согласно которому единственным источником формирования полей гидродинамических параметров в отсутствие массовых сил являются звуковые волны. Следует заметить, что однозначный вывод о форме представления уравнений, описывающих движение вязкой среды, касается только уравнения импульсов. Так как в ходе теоретического обоснования эксперимента обе модели включали одно и то же упрощенное уравнение энергии, то вопрос о его структуре остается открытым. Основываясь на анализе развития тепловых и механических процессов в потоках вязкой среды можно полагать, что уравнение энергии должно сохранять свою традиционную форму и преобразовываться к другому виду с заменой искомых функций на основе уравнения состояния. Хотя окончательный вывод остается за экспериментом.

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. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. М., 1963. Ч. 2. – 727 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.
6. Тютюма В. Д. // Докл. НАН Беларусі. 2014. Т. 58, № 4. С. 106–109.

V. D. TYUTYUMA

tvd@hmti.ac.by

EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF THE MODEL OF LOCALLY NONEQUILIBRIUM VISCOUS FLUID FLOW

Summary

Results of experimental verification of a new concept of the development of thermal and mechanical processes in viscous compressible flow medium are presented.

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

УДК 811.161.3'255.2=161.1+821.161.3.09(092)Мележ

Н. В. ЯКАВЕНКА

**СПЕЦИФИКА МАСТАЦКАГА МАДЭЛЯВАННЯ ТВОРА СРОДКАМІ ІНШАЙ МОВЫ
(НА ПРЫКЛАДЗЕ ПЕРАКЛАДАЎ РАМАНА І. МЕЛЕЖА «МІНСКІ НАПРАМАК»)**

(Прадстаўлена акадэмікам У. В. Гніламёдавым)

Цэнтр даследаванняў беларускай культуры, мовы і літаратуры НАН Беларусі, Мінск

Паступіла 04.08.2014

Мастацкі пераклад «лічыцца творчасцю на мяжы мастацтва і даследавання» [1, с. 79], ён узбагачае мову, актывізуе яе ўласныя лексічныя, формаўтваральныя, сінтаксічныя магчымасці, павышае культуру роднага слова, а часам нават садзейнічае ўдасканаленню арыгінальнага твора. У беларускай літаратуры ёсць выключны выпадак, калі праца над перакладамі працягвалася не адно дзесяцігоддзе і садзейнічала пастаяннай шліфоўцы арыгінала. Маецца на ўвазе раман Івана Мележа «Мінскі напрамак», які прыносіў пісьменніку шмат турбот на працягу дваццаці пяці гадоў.

Раман пісаўся з 1947 па 1952 г., але пазней І. Мележ неаднаразова перапрацоўваў яго. Такім чынам, пры жыцці пісьменніка «Мінскі напрамак» з пэўнымі ўдакладненнямі выдаваўся ў 1950, 1952, 1958, 1970, 1973 і 1974 гг. Акрамя таго, выходзілі з друку яшчэ і аўтарызаваныя пераклады гэтага твора на рускую мову: у 1954 г. (перакладчык Л. Шапіра), у 1961 і 1963 гг. (перакладчык Л. Ракоўскі).

Галоўнай прычынай шматразовай перапрацоўкі рамана з'яўлялася жаданне І. Мележа давесці свой твор да належнага мастацкага ўзроўню. «Мінскі напрамак» пісаўся на пачатку творчай дзейнасці пісьменніка, калі ён не меў яшчэ значнага вопыту ў эпічным жанры, і вялікая патрабавальнасць да сябе, адчуванне адказнасці перад чытачамі вымушалі Мележа неаднаразова вяртацца да працы над сваім творам. Разам з тым на пісьменніка і яго творчую працу над раманам аказалі ўплыў заўвагі крытыкаў.

Як толькі першая кніга «Мінскага напрамку» (са скарачэннямі) была апублікавана ў «Полымі» (1950, № 1–3), у друку з'явіўся рэзкі артыкул І. Кудраўцава. Крытык абвінаваціў І. Мележа ў скажэнні жыццёвай праўды, няўдалым і хібным адлюстраванні партызанскай барацьбы, сурова раскрытыкаваў мову твора і вызначыў, што раман І. Мележа па-мастацку недасканалы. «Пісьменнік не ўвасобіў у поўнакроўныя літаратурныя вобразы велізарнейшыя жыццёвыя матэрыялы, не раскрыў велічы падзей недалёкага мінулага. Многае ў рамане аўтар творча не асэнсаваў, не вынасіў, а наспех занатаваў пэўныя думкі, не зрабіўшы іх мастацкай праўдай» [2, с. 2]. У дыскусію з Кудраўцавым на старонках ЛіМа ўступіў Янка Маўр [3], які, падкрэсліўшы, што недахопы рамана – гэта «толькі недаробкі, якія зусім лёгка выправіць, не закранаючы ні сутнасці, ні структуры твора» [3, с. 3], падтрымаў маладога пісьменніка, адзначыўшы яго таленавітасць. Як сцвярджае М. Мушыньскі, «да канца дзён сваіх успрымаў пісьменнік водгук І. Кудраўцава на першую частку рамана «Мінскі напрамак» як асабістую крыўду. Тым не менш шэраг істотных заўваг рэцэнзента ... быў улічаны раманістам. Мележ прыняў заўвагі не таму, што ў працэсе перапрацоўкі першапачатковай рэдакцыі пераканаўся ў іх справядлівасці. Не! Ён прыняў заўвагі толькі пасля таго, як яны з літаратурна-крытычнага ўзроўню, з сістэмы літаратурнай крытыкі перайшлі ў іншую сістэму – сістэму мастацкага, эстэтычнага ўспрымання самім пісьменнікам з'яў рэчаіснасці і чалавечых характараў, якія крытычна ацэньваліся І. Кудраўцавым» [4, с. 67].

Вялікае значэнне для І. Мележа мелі заўвагі выдатнага расійскага пісьменніка А. Фадзеева, зробленыя на рускамоўнае выданне «Мінскага напрамку» 1954 г. Вопытны пісьменнік увогуле станоўча ацаніў твор, даў шмат заўваг, парад і рэкамендаваў значна перапрацаваць раман. Парады аказаліся вельмі дзейнымі. «Яны супалі з уласным жаданнем прэзаіка, у якога была ўнутраная, душэўная гатоўнасць зноў і зноў шліфаваць свой твор, удасканальваючы яго пры кожным наступным выданні» [5, с. 212]. Акрамя таго, як заўважыла даследчыца творчасці І. Мележа Л. Мазанік у каментарыях да 3 тома Збору твораў пісьменніка [6, т. 3, с. 412], ён з вялікай адказнасцю паставіўся да заўваг іншых крытыкаў (І. Навуменкі, Е. Войніч, Ф. Куляшова, А. Адамовіча) наконт недасканаласці мовы твора і выправіў многія хібы.

Такім чынам, праца над раманам вялася на ўзроўні макра- і мікраструктуры: узбагачаліся партрэтныя характарыстыкі і паглыблялася псіхалогія герояў твора; з мэтай удасканалення мовы і стылю рамана перапрацоўваліся і замяняліся як асобныя словы, спалучэнні слоў, сказы, так і цэлыя абзацы тэксту; мяняліся некаторыя імёны і прозвішчы герояў; апускалася тое, што пісьменнік лічыў лішнім, і дадаваліся новыя звесткі.

Што датычыць аўтарызаваных перакладаў, то яны з'яўляліся магчымасцю пазнаёміць з твораў усесаюзнага чытача і дазвалялі пісьменніку яшчэ раз папрацаваць над сваім твораў. Наконт гэтага Мележ зазначаў: «Вельмі шмат часу, сіл і нерваў прыйшлося мне патраціць на аўтарызацыю першых перакладаў, а потым і на іх перавыданні. Для мяне працэс аўтарызацыі перакладу – адзін з важных і цяжкіх этапаў перад сустрэчай з чытачом. І першы, і другі пераклады рамана патрабавалі вялікай работы, на іх патрачана некалькі месяцаў штодзённай, напружанай працы» [6, т. 8, с. 516].

Эстэтычна адукаваны чытач спасцігае мастацкі твор комплексна: ён адначасова разумее сам твор, яго змест і асобу пісьменніка, яго адносіны да жыцця і глыбока схаваныя, падчас нават не да канца ўсвядомленыя самім аўтарам, прычыны, якія вызначылі ідэйны кірунак твора. Аўтарызаваны пераклад павінен пазбавіць перакладны тэкст ад рознага віду скажэнняў арыгінальнага матэрыялу і забяспечыць найбольш дасканалы з мастацкага боку іншамоўны варыянт твора. Як адзначыў В. Рагойша, «аўтарызаваны пераклад – гэта, як правіла, самае дакладнае, дасканалае ўзнаўленне твора сродкамі іншай, даступнай аўтару, мовы» [7, с. 46].

Першую, даволі значную дапрацоўку «Мінскага напрамку» Мележ зрабіў пры падрыхтоўцы рускага перакладу Л. Шапіры ў 1954 г. Гэта выданне рамана выйшла са шматлікімі моўнымі і стылёвымі праўкамі. У каментарыях да 4 тома Збору твораў І. Мележа А. Атаева, між іншым, заўважыла: «Перакладчык паставіўся да тэксту рамана безадказна, дапусціў адвольныя скарачэнні...» [6, т. 4, с. 535].

Пры супастаўленні тэкстаў названага перакладу і адпаведнага яму арыгінальнага выдання «Мінскага напрамку» 1952 г. відаць, што пэўныя скарачэнні сапраўды мелі месца. Некаторыя з іх з'яўляюцца перакладчыцкай інтэрпрэтацыяй арыгінала, а іншыя, і іх большасць, з упэўненасцю можна лічыць праяўленнем волі аўтара. Вось наступны прыклад.

Арыгінал:

Дрэвы, трава весела наблісквалі кроплямі вады. На дарогах там і тут віднеліся мутныя запененыя лужы і ручайкі. Аляксею мімаволі ўспомнілася, як ён калісьці любіў, падкасаўшы зрэбныя штаны, бегаць па такіх лужынах пасля дажджу і плёскацца...

Выглянула з-за хмар сонца і ўсё навокал зазіхацела. І камбінезон Аляксея і гімнасцёркі аўтаматчыкаў, якія ўшчэнт прамоклі, запаравалі...

Адышоў яшчэ дзесятак кіламетраў, і Аляксею давялося ўбачыць такое, што дзень для яго адразу пацягнуў. Сяло было спалена ўшчэнт – спалена, мусіць, даўно, бо каля папалішчаў усюды былі ўжо норы-зямлянкі. Уцалела толькі нейкім чынам калгасная вежа...

Каля вежы танкісты і ўбачылі гэта.

Шырокая яма была ўся напоўнена трупамі. На тварах людзей былі відаць застылыя разы перадсмяротнай пакуты і страху. Некаторыя трупы былі жахліва пасечаны, – мусіць, гітлераўцы кідалі сюды гранаты... [8, с. 420].

Пераклад:

Половина села была сожжена! Еще кое-где курился дым. Возле силосной башни танкисты увидели яму, полную трупов. На лицах убитых застыло выражение предсмертной муки и ужаса.

Некоторые трупы были изуродованы, иссечены – вероятно, гитлеровцы бросали в яму гранаты [9, с. 428].

У арыгінале аўтар дае разгорнутае апісанне прыгожага сонечнага дня, каб пасля на фоне яго паказаць кантрастную, жажлівую карціну спаленай вёскі і забітых людзей. У перакладзе засталася толькі сціслае апісанне знішчанага вёскі і яе жыхароў. Адрозна можна падумаць, што гэта і ёсць тое самае «адвольнае скарачэнне» перакладчыка. Аднак і ў арыгінале пазнейшага часу мы бачым той жа кароткі малюнак жудаснай расправы фашыстаў. Значыць скарачэнне зрабіў сам аўтар, магчыма таму, што пейзажная замалёўка сваёю святочнасцю кантраставала з далейшым апісаннем трагічных падзей.

У перакладзе Л. Шапіры ў першым раздзеле трэцяй часткі рамана ёсць вялікі лірычны ўступ, якога не існуе ў арыгінальным выданні 1952 г. Безумоўна, гэта таксама творчае рашэнне аўтара, бо ў выданні «Мінскага напрамку» 1958 г. ужо ёсць гэты ўступ, які ў пазнейшых выданнях ператварыўся ў тры самастойныя лірыка-публіцыстычныя звароты.

Такім чынам, аўтарызацыя сведчыла аб няспыннай працы І. Мележа над сваім раманам, таму што «мяжы ўдасканальванню няма і ніколі не будзе. З гадамі, з узростам пісьменніка расце патрабавальнасць да кожнага свайго слова. Тое, што ўчора здавалася бездакорным, сёння аказваецца зусім непрымальным для самога ж сябе. Значыць, мяняецца яно і для чытача, які таксама разумнее. Пісьменнік не мае права не ўлічваць гэтага...» [10, с. 287].

Але вернемся да перакладу. Месцамі ён вельмі блізка да тэксту ўзнаўляе арыгінал, напрыклад:

Тое, што здавалася раней непарушным, усталяваным назаўсёды, цяпер паліў, руйнаваў, захопліваў вораг. Упершыню Аляксей пабачыў, што ішчасце, якое ён спазнаў з маленства і якое прымаў, як належнае, наважваюцца адабраць, растаптаць, што над усім нависла смяротная пагроза, пра якую раней ён не раз чуў і нават гаварыў сам і якая неяк уяўлялася далёкай і нерэальнай [8, с. 69].

То, что раньше казалось нерушимым, навсегда устоявшимся, теперь разрушал, жег, захватывал враг. Впервые Алексей увидел, что счастье, которое он узнал с детства и которое принимал, как должное, стремятся отобрать, растоптать, что над всем нависла смертельная опасность, о которой раньше он не раз слышал и даже сам говорил и которая все же казалась далекой и нереальной [9, с. 68].

У гэтым выпадку пераклад цалкам адпавядае арыгіналу, але каб ацаніць яго мастацкую вартасць дастаткова ўзяць адзін прыклад, дзе паказваюцца вялікія душэўныя перажыванні героя, момант вышэйшага псіхалагічнага напружання. У такім выпадку пісьменнік звычайна канцэнтруе ўсе свае пачуцці і мастацкія здольнасці, каб перадаць глыбіню і праўдзівасць перажыванняў. Перакладчык жа павінен адчуць не толькі эпізод у цэлым, але і кожны радок, кожнае слова і згодзець не менш дасканала з мастацкага боку, чым у арыгінале, перадаць гэта сродкамі іншай мовы. І чым вышэй гэта мастацкае чуццё перакладчыка, тым вышэй узровень яго майстэрства.

«Яе няма! Ніны няма!!» Той, каго больш за ўсё ён хацеў бачыць, няма. Няма і ніколі ўжо не будзе.

Ніколі ўжо не ўбачыць ён яе любых, нібы зацягнутых смугою, вачэй, не пачуе яе голасу, не адчуе поціску яе рук. Ніколі больш яна не скажа тых слоў, якія некалі гаварыла і аб якіх ён марыў, ірвучыся сюды. Ніколі, ніколі... [8, с. 674].

«Нины нет!» Та, которую он любил и больше всего хотел видеть, мертва. Ее нет и никогда не будет.

Никогда он не увидит ее любимых глаз, не услышит голоса, не почувствует пожатия ее руки. Никогда не услышит он слов, которые когда-то она говорила ему и о которых он мечтал, когда рвался сюда, в Минск.

Пусто, пусто... [9, с. 672].

Нібыта перакладчык недалёка адышоў ад тэксту арыгінала, змяніў усяго некалькі слоў. Але далёка ад арыгінальнага псіхалагічнага малюнка аказалася яго копія, дзе перажыванні героя не перадаюцца, а канстатуюцца, пераказваюцца. Акрамя таго, перакладчык, відаць, не зразумеў, што нездарма аўтар у такім невялікім урыўку пяць разоў, як лейтматыў, паўтарае гэта страшнае для героя слова «ніколі» і ў канцы ўрыўка замяніў яго іншым – «пусто». Гэты выпадак сведчыць

пра няўважлівых адносіны Л. Шапіры да рамана і да сваёй працы. Часам перакладчык неадэкватна перадае канатыўныя значэнні слоў:

Нязвычайна пасля фронту салдатам было гэтакі мірнае жыццё. Усё чамусьці незразумелым і зманлівым здавалася: і цішыня, і бяспечны спакой, ад якіх адвыклі даўно [8, с. 672].

Непрывычнай пасля фронту была мірная жыццё. Непонятнымі і прадатальскімі казаліся тишина і покой, от которых давно отвыкли [9, с. 674].

Тут мае месца недакладнасць словаўжывання пры перакладзе: беларускаму слову «зманлівае» адпавядае рускае «обманчивое», а не «предательское», якое нясе іншую сэнсавую нагрузку. Такім чынам, няўважлівасць перакладчыка адмоўна сказваецца на мастацкай дасканаласці твора.

Тое ж можна сказаць і пра наступны прыклад:

У тую хвіліну да іх падышоў паліцай [8, с. 117].

Из-за кустарника вышел полицейский [9, с. 112].

Мост быў разбураны [8, с. 377].

Мост был разобран [9, с. 390].

На першы погляд тут няма вялікай памылкі, аднак перакладчык, відавочна, не адчуў канатыўных нюансаў падкрэсленых намі слоў: нямецкіх прыслужнікаў у час Вялікай Айчыннай вайны называлі паліцаямі, а не паліцэйскімі; разбурыць – значыць паламаць, раскідаць па частках. У час вайны масты звычайна былі ўзарваныя, разбураныя дашчэнт, а не разабраныя.

Каштоўнасць любога перакладу залежыць ад таленту перакладчыка. Ад яго мастацкага густу, такту, ад яго здольнасці пранікнуць у светаўспрыняцце аўтара, манеру і стыль арыгінала. Памылкі і недахопы, дапушчаныя Л. Шапірам, выкліканы хутчэй за ўсё няўважлівасцю, неахайнасцю пры перакладзе і, магчыма, непатрабавальнасцю да сябе і сваёй працы.

Атрымліваецца, што і аўтарызаваны пераклад не пазбаўляе ад пралікаў і памылак. Колькі б ні працаваў аўтар з перакладчыкам свайго твора, калі ў апошняга не хапае мастацкага густу, цяргення і ўважлівасці, каб да канца разабрацца ва ўсіх тонкасцях твора, вынік будзе непрымальным. «Пераклад абумоўлены не толькі аб'ектыўнымі фактарамі – канкрэтна-гістарычным літаратурным канонам, нарматыўным аб'ёдам, але і суб'ектыўнымі – паэтыкай самога перакладчыка» [11, с. 159].

Наступным быў пераклад «Мінскага напрамку», ажыццёўлены Л. Ракоўскім ў 1961 г., адпаведны яму – арыгінал 1958 г. Гэты перакладчык аказаўся больш уважлівым і пазбегнуў памылак свайго папярэдніка:

У тую хвіліну да іх падышоў паліцай [12, т. 1, с. 112].

В эту минуту к ним подошел полицай [13, с. 104].

Мост быў разбураны [12, т. 2, с. 85].

Мост был разрушен [13, с. 391].

Л. Ракоўскі пераклаў адэкватна, не змяняючы сэнсавых адценняў слоў. У выпадку з душэўнымі перажываннямі героя твора наконт смерці жонкі ён таксама пастараўся перакласці максімальна дакладна, не дапускаючы асаблівай вольнасці, і тым самым захваў у перакладзе глыбіню перажыванняў і настраёнасць арыгінала:

«Яе няма! Ніны няма!!» Той, каго больш за ўсё ён хацеў бачыць, няма. Няма і ніколі ўжо не будзе.

Ніколі ўжо не ўбачыць ён яе любых, нібы зацягнутых смугою, вачэй, не пачуе яе голасу, не адчуе поціску яе рук. Ніколі больш яна не скажа тых слоў, якія некалі гаварыла і аб якіх ён марыў, ірвучыся сюды. Ніколі, ніколі... [12, т. 2, с. 401].

«Ее нет! Нины нет!» Той, которую он больше всего хотел видеть, нет. Нет, и уже никогда не будет!

Никогда уже не увидит ее дорогих, словно подернутых дымкою глаз, не услышит ее голоса, не ощутит пожатия ее рук. Никогда больше она не скажет тех слов, которые когда-то говорил и которые он всегда помнил. Никогда, никогда... [13, с. 663].

Увогуле, для перакладчыцкай манеры Л. Ракоўскага характэрна імкненне да большай блізкасці, адпаведнасці арыгіналу:

Снарады і міны са свістам лажыліся спераду, ззаду, збоку. Здрыгалася зямля. Шыбалі ўгару цёмныя стаўбуры дыму, бліскала полымя.

То ў адным месцы, то ў другім узяталі маладыя сасонкі, вырваныя з карэннем, кружачыся, падалі з павольна асядаючым пяском; з гары сыпаліся ссечаныя асколкамі галінкі [12, т. 1, с. 8–9].

Снаряды і мины ложыліся со свистом впереди, сзади, сбоку. Сотрясалась земля. Вздымались вверх темные столбы дыма, сверкало пламя. То здесь, то там взлетали молодые сосенки, вырванные с корнем, кружась, падали с медленно оседавшим песком, сверху сыпались сбитые осколками ветки [13, с. 10].

Пры ўсёй блізкасці да арыгінала гэты пераклад нельга назваць літаральным. Перадаючы дакладна сэнс слоў, Л. Ракоўскі ўзнаўляе і ўсю канкрэтнасць, што стаіць за гэтымі словамі – думку, вобраз, эмоцыю. Такім чынам, твор не губляе сваіх мастацкіх якасцей. Часам у некаторых выпадках перакладчык дазваляе сабе невялікую вольнасць, але ўсё ж у пэўных межах:

Па ціхіх, стрыманых галасах, што адразу пажавелі, Ніна Лагуновіч адчувала, як палягчэла на душы ў людзей. Их мала непакоіла тое, што будзе заўтра, яны ведалі, што перабылі дзень, пражылі як трэба, па-салдацку, а цяпер пойдучь – і не будзе зараз трывогі такой і смерці [12, т. 1, с. 16].

По тихим, сдержанным голосам, которые сразу ожили, Нина Лагунович почувствовала, как полегчало на душе у людей. Их мало беспокоило то, что будет завтра; они знали, что прожили день как следует, по-солдатски, и вот наконец уйдут, оставив позади тревоги трудного дня, смерть [13, с. 17].

Падобнае адступленне ад арыгінала ніколі не шкодзіла яго мастацкай вартасці і не з'яўляецца грубым парушэннем. Увогуле, трэба адзначыць, што Л. Ракоўскі аказаўся больш чуйным і добрасумленным перакладчыкам, чым Л. Шапіра.

Кожны рускамоўны варыянт «Мінскага напрамку» рабіўся з новай рэдакцыі арыгінала, і калі аўтар канчаткова ўдасканаліў яго, то вырашыў сам заняцца перакладам уласнага твора. Рыхтуючы раман да перавыдання ў зборы твораў 1974 г., І. Мележ істотна дапоўніў яго і перапрацаваў. У гэты час ён зрабіў і аўтапераклад, што быў выдадзены ў 1973 г. і поўнасю адпавядаў гэтай апошняй рэдакцыі. У першую чаргу паўстае пытанне: чаму пісьменнік сам узяўся за пераклад свайго твора? Па-першае, як ужо адзначалася вышэй, «Мінскі напрамак» быў у чарговы раз перапрацаваны, І. Мележ з уласцівым яму пачуццём адказнасці за свой твор перад чытачамі не мог дапусціць, каб і на рускай мове раман быў недасканалым з мастацкага боку. Таму наспела неабходнасць адпаведнай перапрацоўкі перакладу. Па-другое, вядомыя неаднаразова выказванні пісьменніка наконт мастацкага перакладу ў цэлым і аўтарызаванага ў прыватнасці. Вось адно з іх: «Аўтарызацыя ў тым выглядзе, у якім яна цяпер існуе, не гарантуе ад дрэнных перакладаў, але, па сутнасці, стварае безадказнасць: хто ж адказвае за якасць перакладаў? Пры цяперашняй форме аўтарызацыі за якасць перакладу, як быццам, больш адказны аўтар: ён жа адобрыў, аўтарызаваў... Аўтар няхай глядзіць і правіць, але адказнасць за пераклад няхай нясе аўтар перакладу» [6, т. 8, с. 234].

Падобныя выказванні наводзяць на думку, што І. Мележ быў незадаволены аўтарызаванымі перакладамі «Мінскага напрамку» і гэта таксама абумовіла зварот да аўтаперакладу. У чым жа яго адметнасць?

Першае, што адразу кідаецца ў вочы, – максімальная адпаведнасць і адэкватнасць аўтаперакладу арыгіналу. Празаік, крыху ўдакладняючы, нязначна папраўляючы свой твор у перакладзе, застаўся верным сабе: сваёй мастацкай задуме, свайму стылю, канкрэтнаму эпізоду, псіхалагічнаму малюнку. Мележу добра ўдалося перадаць сродкамі рускай мовы ўласціваю яму мяккасць, дакладнасць і пачуццёвасць апавядання. Напрыклад, партрэтны малюнак Ніны Лагуновіч захоўвае ў перакладзе ўласціваю яму пластычнасць, няяркія фарбы, перадае някідку прыгажосць дзяўчыны і аўтарскую замілаванасць гэтым вобразам:

З люстэрка глядзелі на яе шэрыя, стомленыя вочы. У чатырохкутніку былі яшчэ відаць роўны, крыху кірпаты нос, заклапочаны лоб і русявыя, спераду крыху выгаралыя на сонцы, валасы. Ніна была прыгожая няяркім, сціплым характам. Асабліва прываблівыя былі яе вочы – шэрыя, часам блакітныя, як бы засмужаныя: яны пазіралі з нейкай светлай удумлівасцю і сардэчнасцю. Прыгожа акрэсліваліся мяккія, нібы прыпухлыя вусны [6, т. 3, с. 262].

Из зеркала смотрели на нее серые усталые глаза. В четырехугольнике были видны ровный, немного курносый нос, озабоченный лоб и русые волосы. Нина была красива неяркой, скромной

красотой. Особенно привлекательны были ее глаза: серые, голубоватые, словно подернутые дымкой, они смотрели с какой-то светлой задумчивостью и сердечностью. Красиво очерчивались мягкие, будто припухшие губы [14, с. 223].

Д. Бугаёў заўважыў: «Пры перапрацоўках твора ў апошнія гады пісьменнік яўна паслабіў ранейшыя абмежаванні і стаў больш свабодна выкарыстоўваць лірычныя «рэгістры» свайго таленту, прыкметна ўзмацняючы адкрытую эмацыянальную насычанасць мастацкай тканіны. Дасягалася гэта за кошт высокай пачуццёвай напоўненасці як некаторых адкрытых, выказаных героямі твора ўголас, так і за кошт унутраных маналогаў многіх персанажаў, асабліва Ніны Лагуновіч» [15, с. 62]. Паколькі, як адзначалася вышэй, да гэтага часу рамана быў ужо некалькі разоў перапрацаваны, і на апошнім варыянце пісьменнік нарэшце спыніўся, кожны радок быў дакладна вывераны, выкарастаны ўсе неабходныя мастацкія сродкі, Мележ не меў патрэбы пры перакладзе рабіць кардынальныя змены. Галоўнай задачай было адэкватна перадаць твор сродкамі рускай мовы, захаваўшы пры гэтым усе яго мастацкія асаблівасці.

На падставе аналізу аўтаперакладу рамана «Мінскі напрамак» і супастаўлення яго з арыгіналам можна зрабіць выснову, што ў дадзеным выпадку аўтарскі пераклад з'яўляецца не новай рэдакцыяй твора, а яго рускамоўным варыянтам.

Праца І. Мележа над раманам на працягу 25 гадоў, у тым ліку і ўдасканаленне твора ў час працы над аўтарызаванымі і аўтарскім перакладамі, можа служыць цікавым прыкладам для вывучэння псіхалогіі літаратурнай творчасці. Справа ў тым, што сярод літаратуразнаўцаў, крытыкаў і саміх пісьменнікаў бытуюць розныя погляды адносна мэтазгоднасці перапрацоўкі і дапрацоўкі аўтарам свайго твора пасля таго, як з часу яго выхаду ў свет праходзіць не адзін год, а нават, як у выпадку з Мележам, дзесяцігоддзі.

М. Арнаудаў сцвярджае: ёсць пісьменнікі, якія не перапрацоўваюць свае творы, магчыма, таму, што перш чым пачаць пісаць, доўга і дасканала абдумваюць, выношваюць свае ідэі, а, магчыма, таму, што проста не жадаюць уносіць нейкія змены, паколькі лічаць іх нязначнымі. Акрамя таго, кожны твор адлюстроўвае пэўны перыяд у творчай эвалюцыі пісьменніка і з'яўляецца яе сведчаннем [16].

І. Мележ прытрымліваўся іншай думкі: «Я ж перакананы, што перад кожным перавыданнем твор, калі ён у чым-небудзь не задавальняе, пісьменнік абавязаны правіць... Я бачу ў гэтым асабістую аўтарскую адказнасць за літаратурны лёс свайго рамана» [6, т. 8, с. 515].

Гісторыя напісання «Мінскага напрамку» – яскравае таму сведчанне. Пісьменнік не толькі папраўляў гэты твор, але і перапрацоўваў. Паміж гэтымі дзвюма паняццямі (папраўкі і перапрацоўкі) ёсць істотная розніца. «Першыя з'яўляюцца пераважна справай крытыкі, густу; другія – новага ўжывання, блізкага да першаснага натхнення» [16, с. 521].

Папраўкі не ўплываюць на задуму твора, на яго агульны эмест. Гэта часцей за ўсё нейкія апушчэнні ці замена асобных слоў або словазлучэнняў, якія не закранаюць у цэлым думкі, ідэі ці вобразы. Такія змены маюць месца і ў варыянтах арыгінальнага тэксту, і ў вялікай колькасці ў аўтарызаваных перакладах і аўтаперакладзе «Мінскага напрамку».

Перапрацоўкі цягнуць за сабой парушэнне пачатковай цэласнасці твора, патрабуюць больш глыбокага пранікнення ў яго змест і мастацкую структуру, у выніку чаго твор можа істотна змяніцца. Аўтарызуючы свой твор, Мележ змяняў структуру рамана, уводзіў новыя эпізоды і героі, дыялогі і пейзажныя замалёўкі, апускаў тое, што лічыў непатрэбным. Змены, якія назіраюцца ў першым аўтарызаваным перакладзе, маюць месца ў пазнейшым арыгінальным выданні гэтага твора. Перапрацоўка рамана была абумоўлена творчай эвалюцыяй І. Мележа і стала для яго сапраўднай школай пісьменніцкага, ды і перакладчыцкага майстэрства.

Літаратура

1. Яскевіч А. Сумежжа: мова, пераклад, вытокі прозы. Мінск, 1994. – 253 с.
2. Кудраўцаў І. // ЛіМ. 1950. 3 чэрв. С. 2–3.
3. Маўр Я. // ЛіМ. 1950. 12 жн. С. 3.
4. Мушыньскі М. І. Беларуская крытыка і літаратуразнаўства: 40-я – першая палавіна 60-х гадоў. Мінск, 1985. – 342 с.
5. Бугаёў Д. // Польша. 1975. № 1. С. 194–228.

6. *Мележ І.* Збор твораў: у 10 т. Мінск: Мастац. літ., 1980–1984. Т. 3: Мінскі напрамак: Раман у трох кнігах. Кніга першая: Хмары на світанні / Рэд. С. А. Андраюк. 1980. – 413 с.; Т. 4: Мінскі напрамак: раман у трох кнігах. Кніга другая: Мінск за небакраем. Кніга трэцяя: Будучыня з намі / Рэд. С. А. Андраюк. 1981. – 559 с.; Т. 8: Жыццёвыя клопаты: арт., эсэ, інтэрв’ю / Рэд. А. С. Яскевіч. 1983. – 686 с.
7. *Рагойша В.* Тэорыя літаратуры ў тэрмінах. Мінск, 2001. – 384 с.
8. *Мележ І.* Мінскі напрамак. Мінск, 1952. – 727 с.
9. *Мележ ІІ.* Минское направление. М., 1954. – 719 с.
10. *Матукоўскі М.* Апошняе інтэрв’ю: Успаміны пра Івана Мележа. Мінск, 1982. – 254 с.
11. *Дзюрішин Д.* Теория сравнительного изучения литературы / пер. со словацк. И. А. Богдановой. М., 1979. – 320 с.
12. *Мележ І.* Мінскі напрамак: раман у 2 т. Мінск, 1958. Т. 1: Хмары на світанні. – 349 с.; Т. 2: Мінск за небакраем. Будучыня з намі. – 455 с.
13. *Мележ ІІ.* Минское направление. М.; Л., 1961. – 716 с.
14. *Мележ ІІ.* Минское направление. М., 1973. – 760 с.
15. *Бугаёў Д. Я.* Вернасць прызнанню: Творчая індывідуальнасць І. Мележа. Мінск, 1977. – 239 с.
16. *Арнаутов М.* Психология литературного творчества / пер. с болг. Д. Д. Николаев. М., 1970. – 654 с.

N. V. YAKOVENKO

natayakavenka@tut.by

**SPECIFICITY OF FICTION MODELING DURING THE TRANSLATION
OF AN ARTWORK BY MEANS OF ANOTHER LANGUAGE (BY THE EXAMPLE OF TRANSLATIONS
OF THE NOVEL “MINSK DIRECTION” BY I. MELEZH)**

Summary

The translations of the novel “Minsk direction” by the classic author of the Belarusian literature Ivan Melezh into the Russian language are comprehended theoretically and analyzed. The analysis is made by comparing the texts of translations made by L. Shapiro and L. Rakovsky together with the authors’ editorial boards of the novel organized by I. Melezh during twenty five years.

АГРАРНЫЕ НАУКИ

УДК 636.92.033(476)

*А. Ю. НОРЕЙКО, Ю. И. ГЕРМАН***ИЗУЧЕНИЕ ПРОДУКТИВНЫХ КАЧЕСТВ КРОЛИКОВ
ЗАРУБЕЖНОГО ГЕНОФОНДА, РАЗВОДИМЫХ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ***(Представлено академиком И. П. Шейко)**Научно-практический центр НАН Беларуси по животноводству, Жодино**Поступило 05.11.2014*

Введение. Первостепенной задачей животноводства, в том числе и кролиководства, является производство продуктов питания высокого качества. В настоящее время в Беларуси фактическое потребление мяса и мясных продуктов составляет около 48 кг на душу населения, при норме потребления не менее 90 кг. Кролиководство является одной из самых перспективных отраслей животноводства, позволяющей получать продукцию высокого качества и в самый короткий срок. В мире складывается тенденция к повышению производства мяса кроликов, в связи с нестабильностью производства других видов животноводческой продукции и эпизоотической обстановкой отдельных стран [1; 2].

Крольчатина относится к белому мясу, которое всегда считалось деликатесным. При определении его пищевой ценности главное внимание уделяют содержанию белка как главного компонента в мясе кролика, полностью отвечающего требованиям полноценного белкового питания для человека. Белки мышечной ткани имеют сложный состав, разнообразны по строению, физико-химическим свойствам и биологическим функциям. В кроличьем мясе имеются незаменимые аминокислоты, которые играют важную роль в обмене веществ человека. С возрастом кроликов уровень триптофана в мышцах повышается (наиболее интенсивно до 120-дневного возраста), но снижается уровень оксипролина. Отмечается также тенденция к уменьшению содержания аргинина, лейцина, аланина, глицина, пролина и увеличению содержания гистидина, фенилаланина, норлейцина, тирозина и аспарагиновой кислоты. Соединительнотканых белков – коллагена и эластина в крольчатине значительно меньше, чем в мясе крупного рогатого скота и свинины [3].

В тушке кролика содержится мало костей и хрящей (12–16 %), тогда как у крупного рогатого скота – до 30 %. На долю съедобных частей приходится 84–88 % от массы мяса на кости. По мере роста кроликов выход мякотных частей увеличивается в результате нарастания мышечной и жировой ткани и уменьшения выхода кости. Мясо кролика имеет более нежный вкус, чем куриное, оно почти без привкуса, мягкое по консистенции, является легкоусвояемым, в нем содержится наименьшее количество холестерина и оно мелковолокнистое [4].

Мясо кроликов – полноценный источник минеральных веществ и витаминов. Витаминов В₆, В₁₂ и РР в нем содержится значительно больше, чем в говядине, баранине и свинине. Мясо кролика богато минеральными веществами: в нем много Fe, P, Co, а также Mg, K и мало солей Na, что делает его незаменимым в диетическом питании [5].

В мясе кролика мало жира, который имеет белый цвет и твердую консистенцию. Жировые включения равномерно откладываются между пучками мышечных волокон, между самими волокнами и, особенно, между мускулами, в соединительных прослойках. Жировые отложения располагаются на тушке, главным образом вокруг почек, сердца, а также в области паха и лопаток. В мясе бройлеров содержится жира – 16,8 %, свинины – 33,3, баранины – 27,9, индюшатины – 22,9 и говядины – 11,4 %, по сравнению с 5 % в крольчатине. Крольчатина является низкокало-

рийным продуктом с температурой плавления жира около 42 °С, застывания 39 °С. В 100 г. содержится 699 кДж, тогда как в баранине – 1337, говядине – 1148, свинине – 1630 кДж [6].

По химическому составу и усвояемости лучшим считают мясо крольчат, забиваемых в возрасте до 77 дней, при средней убойной массе 1,5 кг. В нем содержится 21,5–22,5 % белка. Учитывая высокую биологическую ценность, мясо кроликов рекомендуют включать в меню для людей всех возрастов, а также широко использовать для диетического питания [7].

Литературные данные свидетельствуют, что наиболее экономически выгодны для убоя молодые животные в возрасте 120–140 дней, после окончания первой возрастной линьки. По данным В. Г. Плотникова и Н. М. Фирсовой [8], возраст и живая масса кроликов при убое тесно связаны с мясными качествами. Жирность тушки увеличивается после достижения ими живой массы 1,2–1,5 кг – это улучшает качество мяса и его калорийность. Мясные качества кроликов оценивают по типу телосложения, развитию животных, убойной массе, убойному выходу, индексу мясности, дегустационным качествам.

Мясная продуктивность тесно взаимосвязана с возрастом животных, технологией содержания и кормления, а также с породной принадлежностью. В настоящее время известно много мясных пород кроликов, но в последние годы большое распространение у производителей получили такие как новозеландская белая и калифорнийская [9]. Наряду с ними разводят и бургундских, венских, чешских альбиносов и др. Изучение потенциала продуктивных качеств кроликов различных генотипов, с целью выбора наиболее пригодных для получения дешевой мясной продукции высокого качества, этих пород в Республике Беларусь не проводилось.

Цель исследований – изучение мясной продуктивности кроликов пород калифорнийская, новозеландская белая, бургундская, чешский альбинос и влияние эффекта гетерозиса при реципрокном скрещивании.

Материалы и методы исследования. Мясную продуктивность молодняка подопытных групп кроликов изучали путем проведения контрольного убоя в возрасте 120 дней. Контрольный убой и определение упитанности кроликов проводили согласно требованиям ГОСТа 7686–88 [10].

Всего за время исследований было убито 36 чистопородных животных и их помесей первого поколения следующих генотипов:

бургундская (Б), бургундская × новозеландская белая (Б × НБ), бургундская × калифорнийская (Б × К);

чешский альбинос (ЧА), чешский альбинос × новозеландская белая (ЧА × НБ), чешский альбинос × калифорнийская (ЧА × К);

калифорнийская (К), калифорнийская × чешский альбинос (К × ЧА), калифорнийская × бургундская (К × Б);

новозеландская белая (НБ), новозеландская белая × бургундская (НБ × Б), новозеландская белая × чешский альбинос (НБ × ЧА), принадлежащих ОАО «Межаны» Браславского района Витебской области.

Подопытные животные были разделены на 12 групп по принципу аналогов. Убойные качества кроликов изучали на основании данных, полученных после забоя 3 самцов из каждой подопытной группы и последующего взвешивания тушек на весах (марка МК-15.2-АВ20) с точностью до 10 г. При убое индивидуально по каждому животному учитывали предубойную живую массу после голодной выдержки кроликов в течение 12 ч.

Убойная масса определялась массой тушки с внутренним жиром и почками, без шкуры, головы, хвоста, внутренних органов, конечностей, удаленных по запястному суставу – передних и по скакательному – задних.

Убойный выход определяли как отношение убойной массы к предубойной, выраженное в процентах.

При оценке индекса мясности изучали морфологический состав тушек путем проведения их обвалки. При этом учитывали массу костей и мякотной части по каждой тушке. Коэффициент мясности определяли как процентное отношение массы съедобных частей к массе костей.

$$K_m = M_{сч} / M_k,$$

где K_m – коэффициент мясности; $M_{сч}$ – масса съедобных частей; M_k – масса костей.

После обвалки мясо пропускали через мясорубку два раза, перемешивали и отбирали среднюю пробу для химического анализа. Химический анализ мяса проводили в лаборатории биохимических анализов РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству» по общепринятым методикам (Ю. Ф. Куранов, С. Ф. Хруцкая, 1972 г.). Путем анализа устанавливали процентное содержание в нем воды, белка, жира, минеральных веществ. Содержание указанных компонентов в мясе определяли согласно требованиям государственных стандартов (ГОСТ 25011–81, ГОСТ 23042–86, ГОСТ Р 51479–99, ГОСТ Р 53642–2009) [9–12]. На основании данных химического анализа вычисляли калорийность 1 кг мяса и всей тушки расчетным путем по формуле

$$X = (C - (Ж + З)) \cdot 4,1 + Ж \cdot 9,3,$$

где X – калорийность мяса, калории; C – количество сухого вещества, г; Ж – количество жира, г; З – количество золы, г.

При расчете питательности калорийность химически чистого жира принята нами за 9,3 ккал и белка за 4,1 ккал в 1 г сухого вещества мяса.

Полученные в опытах и лабораторных исследованиях данные обрабатывали методом вариационной статистики по Н. А. Плехинскому с использованием компьютерной программы MS Excel и Statistica 6, разница между группами считалась достоверной при уровне значимости $P \leq 0,05$; $P \leq 0,01$; $P \leq 0,001$ [15].

Результаты и их обсуждение. В нашем опыте убойную массу и выход убойной массы изучали путем проведения контрольных убоев как чистопородных, так и помесных самцов подопытных групп после предварительного их откорма. Результаты данных исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1. Показатели убойных качеств чистопородных и помесных кроликов в возрасте 120 дней ($n = 3$)

Генотип, ♀ x ♂	Показатель				
	Предубойная живая масса, г	% к контрольной группе	Убойная масса, г	% к контрольной группе	Выход убойной массы, %
Б	3963,3 ± 71,3	100	2056,7 ± 53,6	100	51,9
Б × НБ	4256,7 ± 192,4	107,4	2290,0 ± 183,6	111,3	53,6
Б × К	4020,0 ± 68,1	101,4	2186,7 ± 94,0	106,3	54,3
ЧА	4626,7 ± 133,2	100	2316,7 ± 41,0	100	50,1
ЧА × НБ	4896,7 ± 129,1	105,8	2676,7 ± 82,5*	115,5	54,7
ЧА × К	4703,3 ± 71,3	101,7	2443,3 ± 26,0	105,5	52,0
К	3903,3 ± 96,1	100	1950,0 ± 17,3	100	50,0
К × ЧА	4230,0 ± 65,6*	108,4	2156,7 ± 71,3*	110,6	51,0
К × Б	4103,3 ± 26,0	105,1	2110,0 ± 66,6	108,2	51,4
НБ	4186,7 ± 156,7	100	2135,3 ± 67,5	100	51,0
НБ × Б	4456,7 ± 104,0	106,4	2360,0 ± 45,1*	110,5	53,0
НБ × ЧА	4476,7 ± 98,7	106,9	2393,3 ± 51,7*	112,1	53,5

Примечание. Полужирным выделены контрольные группы; * – $P \leq 0,05$.

Из данных табл. 1 видно, что величина убойной массы всех подопытных групп кроликов в 4-месячном возрасте колеблется от 1950,0 до 2676,7 г, что указывает на достижение ими высоких убойных кондиций. Помеси первого поколения от простого промышленного скрещивания имели достоверно большие показатели предубойной (от 1,4 до 8,4 %) и убойной (от 5,5 до 15,5 %) массы в сравнении с чистопородными сверстниками из контрольных групп.

Наилучшие показатели убойной массы имели кролики, полученные от скрещивания самцов породы чешский альбинос с крольчихами породы новозеландская белая 2676,7 г, что на 360 г, или на 15,5 % больше, чем у чистопородных сверстников породы чешский альбинос при достоверной разнице ($P \leq 0,05$) и на 541,4 г, или 20,2 % – в сравнении с молодняком кроликов породы новозеландская белая.

Помеси, полученные от скрещивания самцов породы чешского альбиноса, но уже с крольчихами калифорнийской породы, превосходили по величине убойной массы на 126,6–493,3 г, или 5,5–20,2 % сверстников обеих родительских форм (чистопородный молодняк пород чешский альбинос и калифорнийская). Помесный молодняк, полученный от реципрокного скрещивания самцов породы новозеландская белая с крольчихами породы чешский альбинос, по величине убойной массы достоверно превосходит на 76,6–258,0 г, или на 3,2–12,1 % (при $P < 0,05$ в варианте НБ × ЧА) контрольных сверстников обеих родительских форм.

Величина превосходства у помесей, полученных от скрещивания самцов породы бургундская с крольчихами породы новозеландская белая, в сравнении с чистопородными сверстниками обеих родительских форм составила 154,7–233,3 г, или 6,8–11,3 % в зависимости от их породного происхождения. У помесей остальных вариантов скрещивания величина эффекта гетерозиса по убойной массе была менее значительной и колебалась от 6,3 до 10,6 %, однако заслуживает определенного внимания, так как в вариантах НБ × Б и К × ЧА величина превосходства была достоверной при $P < 0,05$ и составила соответственно 10,5 и 10,6 %.

Помесный молодняк кроликов всех опытных групп при убое в возрасте 120 дней имел более высокие показатели по выходу убойной массы в сравнении с его величиной у чистопородных сверстников из контрольных групп.

Высокие показатели убойного выхода были отмечены у помесного молодняка из опытных групп (51,0–54,7 % против 50,0–51,9 % контрольных), лучшими оказались помеси от скрещивания самцов породы чешский альбинос с крольчихами породы новозеландская белая (54,7 % против 50,1 % у чистопородных сверстников отцовской породы и 51,0 % – материнской породы). Наименьший убойный выход (51,0 %) был у помесного молодняка в варианте К × ЧА. Полученные в нашем опыте результаты по величине убойной массы и убойному выходу указывают на превосходство помесей I поколения от простого промышленного скрещивания пород в сравнении с чистопородными животными.

Среди помесного молодняка от простого промышленного скрещивания лучшими показателями убойной массы и ее выхода отличались помеси от самцов породы чешский альбинос с крольчихами породы новозеландская белая и калифорнийская, а также помеси от реципрокного скрещивания самцов породы новозеландская белая с крольчихами породы чешский альбинос.

Морфологический состав туш. При изучении морфологического состава туш помесных и чистопородных кроликов различного происхождения соотношение съедобной и несъедобной частей в туше определяли путем проведения обвалки туш.

При сравнительно одинаковой величине относительной массы мякотной части туш всех подопытных групп кроликов, которая колебалась при убое в возрасте 120 дней в пределах от 80,4 до 82,8 %, помесный молодняк почти всех вариантов простого промышленного скрещивания, в сравнении с их контрольными чистопородными сверстниками, имел более высокие показатели по абсолютному выходу съедобной мякотной части туш. По величине данного показателя помеси превосходили своих чистопородных сверстников на 100,8–320,9 г, или 6,1–13,0 % (табл. 2).

Наивысшие показатели выхода абсолютной массы мякотной части туш при убое в возрасте 120 дней имел помесный молодняк от скрещивания самцов породы чешского альбиноса с крольчихами породы новозеландская белая (2248,4 г против 1927,5 г в контроле), а в реципрокном варианте этого скрещивания (2058,2 г против 1821,4 г в контрольной группе).

Коэффициент мясности в тушах всех подопытных групп кроликов колебался в пределах 5–6,1. Наибольшей величиной по данному показателю во все возрастные периоды отличались тушки, полученные от убоя помесного молодняка. Исключение составили только тушки, полученные от убоя чистопородных кроликов калифорнийской породы, которые по величине коэффициента мясности (5,8) превосходили своих помесных кроликов в вариантах К × Б и К × ЧА. Данное обстоятельство мы склонны объяснить тем, что калифорнийская порода наиболее соответствовала реализации генетического потенциала мясной продуктивности кроликов данного направления специализации.

Среди помесного молодняка наибольшей величиной коэффициента мясности при убое обладали тушки кроликов от скрещивания самцов новозеландской белой породы с самками чешского альбиноса (6,1 против 5,8 в контроле).

Таблица 2. Морфологический состав туш подопытных кроликов при убое

Генотипы, ♀ × ♂	Результаты обвалки тушек в возрасте 120 дней (n = 3)									
	Масса тушки, г	мякотная часть						Кости		Индекс мясности
		Мясо		Жир кишечный (сырец)		Вся съедобная часть		г	%	
		г	%	г	%	г	%			
Б	2056,7 ± 53,6	1670,0 ± 36,9	81,2	47,3 ± 5,9	2,3	1717,3 ± 42,2	83,5	339,4 ± 7,4	16,5	5,1
Б × НБ	2290,0 ± 183,6	1880,1 ± 34,1*	82,1	59,5 ± 5,0	2,6	1939,6 ± 38,9*	84,7	350,4 ± 7,8	15,3	5,5
Б × К	2186,7 ± 94,0	1806,2 ± 35,4	82,6	52,5 ± 4,5	2,4	1858,7 ± 39,8	85,0	328,0 ± 8,1	15,0	5,7
ЧА	2316,7 ± 41,0	1862,6 ± 31,8	80,4	64,9 ± 6,5	2,8	1927,5 ± 38,2	83,2	389,2 ± 11,2	16,8	5,0
ЧА × НБ	2676,7 ± 82,5*	2170,8 ± 52,1**	81,1	77,6 ± 7,3	2,9	2248,4 ± 59,2**	84,0	428,3 ± 16,7	16,0	5,3
ЧА × К	2443,3 ± 26,0	2003,5 ± 42,0	82,0	68,4 ± 8,1	2,8	2071,9 ± 50,1	84,8	371,4 ± 17,7	15,2	5,6
К	1950,0 ± 17,3	1614,6 ± 25,0	82,8	50,7 ± 6,1	2,6	1665,3 ± 31,0	85,4	284,7 ± 10,4	14,6	5,8
К × ЧА	2156,7 ± 71,3*	1755,6 ± 25,2*	81,4	73,3 ± 6,3	3,4	1828,9 ± 31,5*	84,8	327,8 ± 14,2	15,2	5,6
К × Б	2110,0 ± 66,6	1698,6 ± 25,1	80,5	67,5 ± 6,2	3,2	1766,1 ± 30,8	83,7	343,9 ± 13,5*	16,3	5,1
НБ	2135,3 ± 67,5	1733,9 ± 23,0	81,2	87,5 ± 5,7	4,1	1821,4 ± 28,7	85,3	313,9 ± 7,0	14,7	5,8
НБ × Б	2360,0 ± 45,1*	1925,8 ± 17,5**	81,6	89,7 ± 6,2	3,8	2015,4 ± 23,2**	85,4	344,6 ± 12,2	14,6	5,8
НБ × ЧА	2393,3 ± 51,7*	1945,8 ± 26,5**	81,3	112,5 ± 10,1	4,7	2058,2 ± 35,9**	86,0	335,1 ± 16,1	14	6,1

Примечание. Полу жирным выделены контрольные группы; * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$.

Химический состав мяса кроликов. Для более детального изучения мясной продуктивности кроликов, кроме количественной характеристики мясных показателей, необходимо иметь представление о качестве и питательной ценности крольчатины, которую можно определить путем изучения его химического состава. Для определения породных различий качества мякотной части тушек кроликов чистопородного и помесного происхождения провели химический анализ ее на содержание влаги, белка, жира и золы (табл. 3).

Таблица 3. Химический состав и калорийность мяса подопытных групп кроликов (n = 3)

Генотипы, ♀ × ♂	Химический состав мякоти, %					Калорийность 1 кг мякоти, ккал
	Влага	Сухое вещество	Жир	Зола	Белок	
Б	74,81	25,19	5,33	1,06	18,80	126,6
Б × НБ	70,98	29,02	5,73	1,04	22,25	144,5
Б × К	74,07	25,93	5,60	1,04	19,29	131,2
ЧА	75,13	24,87	5,77	0,99	18,11	127,9
ЧА × НБ	71,78	28,21	5,35	0,99	21,87	139,4
ЧА × К	73,19	26,54	5,12	1,02	20,40	131,3
К	75,53	24,47	5,47	1,01	17,99	124,6
К × ЧА	74,71	25,29	6,31	0,99	17,99	132,4
К × Б	75,39	24,78	5,70	1,11	17,97	126,7
НБ	72,73	27,27	7,28	1,07	18,92	145,3
НБ × Б	70,42	29,57	7,00	0,99	21,58	153,6
НБ × ЧА	73,54	26,47	8,12	1,01	17,34	146,6

Примечание. Полу жирным выделены контрольные группы.

Анализируя данные табл. 3 видно, что в наших исследованиях не получено достоверных различий по химическому составу мякотной части тушек всех подопытных групп кроликов. Необходимо отметить, что в мякоти помесного молодняка кроликов, полученного от простого промышленного скрещивания, содержится несколько большее количество белка и жира и меньше влаги, которые оказывали влияние на повышение калорийности мякоти их тушек на 1,3–17,9 %,

в сравнении с этими показателями в мякоти тушек их чистопородных сверстников из контрольных групп.

Помесный молодняк кроликов в возрасте 120 дней, полученный от всех вариантов реципрокного скрещивания, по общему количеству сухих веществ и белка значительно превосходил (в группе с бургундскими самцами на 0,7–3,8 %, с чешским альбиносом 1,7–3,3 %, с калифорнийскими самцами 0,3–0,8 % и самцами породы новозеландская белая 2,3 %) величину этих показателей в мякоти тушек чистопородных сверстников из их контрольных групп. Исключение составила группа помесного молодняка в варианте НБ × ЧА, которая уступала своим чистопородным сверстникам по белку на 0,8 %, но превосходила все подопытные группы на 0,8–3 % по содержанию в мякотной части жира.

Закключение. На основании анализа полученных нами данных по изучению мясной продуктивности откормочного молодняка кроликов подопытных групп различного происхождения следует сделать вывод, что в условиях специализированного мясного кролиководства можно получить к 4-месячному возрасту сравнительно крупных помесных крольчат с убойной массой тушки от 2110,0 до 2676,7 г в зависимости от породной принадлежности.

Установлено, что абсолютная масса мякоти в тушах молодняка кроликов зависит от его генотипа. Помесный молодняк кроликов всех вариантов, полученный от простого промышленного скрещивания, при убое в возрасте 120 дней по величине этого показателя превосходил на 6,1–13,0 % чистопородных сверстников из контрольных групп. Лучшими в этом возрасте по исследуемому показателю оказались полукровные помеси в варианте ЧА × НБ, а по соотношению мякоти и костей в туше наоборот НБ × ЧА.

Определено, что химический состав мяса помесных кроликов содержит больше питательных веществ, вследствие чего питательность его выше, чем у чистопородных кроликов мясного направления продуктивности.

Литература

1. Андреев Я. П., Игнатенко П. К. // Животноводство России. 2007. № 10. С. 9–11.
2. Горлов И. Ф. // Вестн. мясного скотоводства. 2010. Вып. 63(1). С. 9–15.
3. Кондрахин И. П. и др. Клиническая лабораторная диагностика в ветеринарии. М., 1985. – 287 с.
4. Лесняк А. Н., Добудько А. Н. // Вестн. БУНК. 2006. № 3(18). С. 93–94.
5. Тинаев Н. И., Балакирев Н. А. Разведение кроликов и нутрий. М., 2001. – 254 с.
6. Сауткин А. В. Ветеринарно-санитарная оценка мяса кроликов при использовании в их рационе препарата «Эмисел»: дис. ... канд. биол. наук: 06.02.05. М., 2010. – 129 с.
7. Тихонова М. П. // Вестн. Харьковского ун-та. 1970. № 39(2). С. 46–47.
8. Плотников В. Г., Фирсова Н. М. Разведение, кормление и содержание кроликов. М., 1989. – 223 с.
9. Плотников В. Г. // Кролиководство и звероводство. 1992. № 5. С. 6–7.
10. Кролики для убоя. Технические условия: ГОСТ 7686–1988. Введ. 22.06.88; № 2071. М.: Госагропром СССР, 1988. – 3 с.
11. Мясо и мясные продукты. Методы определения массовой доли влаги: ГОСТ Р 51479–1999. Введ. 22.12.99. М.: ВНИИМП, 1999. – 6 с.
12. Мясо и мясные продукты. Методы определения белка: ГОСТ 25011–1981. Введ. 01.01.83. М.: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Госагропром СССР, 1981. – 7 с.
13. Мясо и мясные продукты. Методы определения жира: ГОСТ 23042–1986. Введ. 01.01.88. М.: Госагропром СССР, 1986. – 5 с.
14. Мясо и мясные продукты. Метод определения массовой доли общей золы: ГОСТ Р 53642–2009. Введ. 01.01.11. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, Рос. Фед. Стандартиформ, 2010. – 7 с.
15. Плохинский Н. А. Руководство по биометрии для зоотехников. М.: Колос, 1969. – 256 с.

A. Y. NOREYKO, Y. I. HERMAN

1983alexnoreyko@mail.ru

STUDY OF THE PRODUCTIVITY QUALITY OF FOREIGN GENE POOL RABBIT BRED IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Summary

The comparative analysis of meat productivity of young purebred and crossbred rabbits at fattening of different origin bred in the Republic of Belarus was carried out. The best breeds and their combinations by slaughter traits, morphological carcass content and chemical composition of meat were determined.

РЕФЕРАТЫ

УДК 517.984

Ерovenko В. А., Гулина О. В., Мартон М. В. **К теореме Гольдмана о возмущении операторов с замкнутой областью значений компактными операторами** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 5–8.

Известно, что согласно теореме Гольдмана, нормально разрешимые операторы, вообще говоря, неустойчивы при возмущении компактными операторами. Сообщение посвящено анализу существенно полурегулярных и существенно регулярных операторов, которые сужают класс нормально разрешимых операторов, но для которых можно рассчитывать на устойчивость при компактных возмущениях.

Библиогр. – 12 назв.

УДК 519.6+517.983.54

Забрейко П. П., Матысик О. В. **Теорема Красносельского и итерационные процедуры решения некорректных задач с самосопряженными операторами** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 9–14.

Получены основные результаты о поведении различных итераций при приближенном решении некорректных уравнений с самосопряженными операторами в гильбертовом пространстве: получены достаточные условия их сходимости, на подпространствах истокообразно представимых функций исследовано поведение невязок и поправок, установлена сходимость приближений в более слабой, чем исходная, норме гильбертова пространства.

Библиогр. – 4 назв.

УДК 517.982.3:517.986.62

Дыба Р. В. **Обобщение теоремы двойственности Фейффермана на случай компактных абелевых групп** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 15–17.

Доказано, что пространство, сопряженное пространству Харди $H^1(G)$ на компактной связной абелевой группе G с линейно упорядоченной группой характеров, топологически изоморфно пространству $BMOA(G)$ функций ограниченной средней осцилляции аналитического типа на группе G .

Библиогр. – 8 назв.

УДК 517.544

Урбанович Т. М. **Особый случай краевой задачи Римана** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 18–21.

Исследована краевая задача Римана в случае, когда коэффициент задачи допускает конечное число нулей и/или полярных особенностей на контуре. Все исследования выполнены в весовых классах Гельдера с комплексным весом. Найдена явная формула решения и условия разрешимости.

Библиогр. – 5 назв.

УДК 621.039+539.21

Комаров Ф. Ф., Константинов С. В., Стрельницкий В. Е. **Радиационная стойкость наноструктурированных покрытий TiN, TiAlN, TiAlYN** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 22–27.

Исследована радиационная стойкость наноструктурированных покрытий TiN, TiAlN, TiAlYN при облучении ионами He^+ с энергией 500 кэВ в диапазоне флюенсов от $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² до $3 \cdot 10^{17}$ ион/см². Изучено изменение фазового состава, структуры, параметров кристаллической решетки, морфологии и механических свойств покрытий под воздействием облучения ионами гелия. Обнаружено отсутствие блистеринга, выявлен факт нелинейного влияния флюенса облучения на прочностные свойства тонких покрытий. Установлено, что наноструктурированные покрытия TiN, TiAlN, TiAlYN являются радиационно-стойкими и не подвержены деградации под воздействием высокофлюенсного ионного облучения.

Табл. 1. Ил. 4. Библиогр. – 16 назв.

УДК 535.51

Афанасьев А. А., Курочкин Ю. А., Рубинов А. Н. **Пондеромоторная сила, действующая на диэлектрическую пластинку** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 28–32.

Рассчитана величина передачи импульса от поля плоской электромагнитной волны, нормально падающей на плоско параллельную диэлектрическую пластинку этой пластинке, а также общая сила, действующая на пластинку, возникающая в результате такой передачи импульса.

Ил. 2. Библиогр. – 6 назв.

УДК 530.145; 538.915; 538.958

Кудряшов В. В., Баран А. В. **Спин-орбитальные взаимодействия в полупроводниковых круговых квантовых точках** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 33–37.

В рамках теории возмущений найдены энергетические уровни и волновые функции для электрона в полупроводниковых круговых квантовых точках при наличии спин-орбитальных взаимодействий Рашбы и Дрессельхауса с реалистичным аксиально-симметричным удерживающим прямоугольным потенциалом конечной глубины.

Ил. 4. Библиогр. – 15 назв.

УДК 530.1

Гончаренко А. М. **Распространение вращающихся световых пучков в отрицательных селфоках** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 38–40.

Исследованы особенности распространения световых вращающихся пучков в селфоках с отрицательным показателем преломления. Показано, что пространственная форма пучка аналогична пучкам обычных сред, а фазовая поверхность распространяется в направлении, обратном направлению распространения самого пучка.

Библиогр. – 20 назв.

УДК 530.12

Толкачев Е. А. **Двойная дуальность уравнений Борна–Инфельда и нелинейный лагранжиан КЭД** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 41–46.

Показано, что произвольные нелинейные лоренц-ковариантные обобщения электродинамики Максвелла дуально инвариантны, если наряду с полями преобразуются параметры моделей, которые в КЭД пропорциональны заряду электрона. Найдены в явном виде трансформационные свойства лагранжианов Борна–Инфельда относительно двух видов дуальных преобразований.

Библиогр. – 17 назв.

УДК 547.792.4+544.15+544.18

Матулис Вадим Э., Григорьев Ю. В., Суханова А. Г., Филиппова Ю. В., Крупнова И. А., Ивашикевич О. А. **Квантовохимическое и экспериментальное исследование реакций нуклеофильного замещения в ряду N-алкил-3-нитро-1,2,4-триазолов** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 47–52.

С использованием современных квантовохимических и экспериментальных методов исследованы процессы нуклеофильного замещения нитрогруппы в ряду N-алкил-3-нитро-1,2,4-триазолов. Проведены расчеты стандартных энтальпий и энергий Гиббса реакций алкоксилирования N-алкил-3-нитро-1,2,4-триазолов в газовой и водной фазах. Согласно выполненным расчетам, реакции нуклеофильного замещения N-алкил-3-нитро-1,2,4-триазолов со спиртами и алкоголят-анионами термодинамически возможны как в газовой фазе, так и в водном растворе. На примере изомерных N-этил-3-нитро-1,2,4-триазолов показано, что расчетные значения энергии Гиббса активации реакций с метиловым спиртом в водном растворе уменьшаются в ряду ΔG^\ddagger_S (для 1-изомера) $\gg \Delta G^\ddagger_S$ (для 4-изомера) $> \Delta G^\ddagger_S$ (для 2-изомера). Результаты расчетов хорошо согласуются с данными экспериментального исследования процессов нуклеофильного замещения нитрогруппы в молекулах N-алкил-3-нитро-1,2,4-триазолов.

Табл. 4. Ил. 2. Библиогр. – 11 назв.

УДК 577.175.1:578.831:615.37

Насонов И. В., Лихачева М. И., Киселев П. А., Бовдей Н. И., Савчук А. Л., Жабинский В. Н., Литвиновская Р. П., Хрипач Н. Б. **Наноструктурированные комплексы стероидного фитогормона: новый подход к защите от вирусной инфекции** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 53–56.

Проведено изучение антивирусной активности комплекса декстрин-24-эпибрассинолид на куриных эмбрионах *in vitro*. Показано, что данный комплекс является ингибитором вируса инфекционного ларинготрахеита птиц.

Табл. 1. Библиогр. – 12 назв.

УДК 547.786

Пашковский Ф. С., Донцу Ю. С., Лахвич Ф. А. **Нитрилоксидный подход к синтезу производных тетрагидробензизоксазолов и тетрагидроиндазолов с дополнительным гетероциклическим фармакофорным фрагментом** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 57–61.

Разработан нитрилоксидный подход к синтезу производных тетрагидробензизоксазолов и тетрагидроиндазолов, содержащих в структуре молекулы дополнительный изоксазольный (изоксазолиновый) фармакофорный фрагмент. Полученные бис-гетероциклические производные и родственные им соединения представляют интерес в качестве веществ с потенциальной противоопухолевой, противовоспалительной, анальгетической и противомикробной активностью.

Библиогр. – 15 назв.

УДК 541.183

Дихтневская Л. В. **Солюбилизация неполярных фторуглеродных и углеводородных соединений в водных растворах ионогенных фторированных и углеводородных поверхностно-активных веществ** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 62–67.

Исследована солюбилизирующая способность водных мицеллярных растворов ионогенных фторированных и углеводородных ПАВ в отношении неполярных фторуглеродных соединений (перфторбензола, перфтороктана) и их нефторированных аналогов (бензола, октана). Показано, что фторорганические неполярные жидкости солюбилизируются как в мицеллярных растворах фтортензидов, так и в растворах мицеллообразующих ПАВ углеводородного типа. Обнаружена абсолютная несовместимость неполярных углеводородных солюбилизаторов (бензола и октана) и ионогенных фторированных ПАВ. Установленные особенности систем, содержащих фторуглеродный компонент, объяснены с позиций сродства молекул фторуглеродов и углеводов к молекулам воды.

Табл. 2. Ил. 4. Библиогр. – 11 назв.

УДК 678.643.42.5:667.6:620.18

Кошевар В. Д. **Стабилизация водной дисперсии эпоксидного олигомера микрочастицами органической природы** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 68–73.

Установлен эффект сильной стабилизации водных дисперсий эпоксидного олигомера гидрофилизированными микрочастицами органической природы. Стабилизирующее действие зависит от химии поверхности микрочастиц, их ξ -потенциала и ξ -потенциала смешанных дисперсий. Реологическое поведение водных эпоксидных дисперсий с введенными микрочастицами латексов также определяется их природой и зарядом: в одних случаях наблюдается сильная пластификация и переход от неньютоновского к ньютоновскому течению, в других – заметное усиление структурообразования. Обсужден вероятный механизм стабилизации ВД ЭО–ПАВ микрочастицами органического происхождения.

Ил. 4. Табл. 3. Библиогр. – 6 назв.

УДК 547.913:543.544.32

Леонтьев В. Н., Коваленко Н. А., Супиченко Г. Н., Шутова А. Г. **Энантимеры монотерпеновых соединений в эфирных маслах растений рода *Thuja*** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 74–76.

Методом газожидкостной хроматографии проанализированы эфирные масла некоторых видов туи из коллекции Центрального ботанического сада НАН Беларуси. Для разделения энантимеров монотерпеновых соединений использовали капиллярную колонку с неподвижной фазой на основе β -циклодекстрина. Для исследованных образцов характерно преобладание правовращающих форм α -пинена, камфена и лимонена. Сабинен и β -пинен представлены только IR-(+)-изомерами.

Ил. 3. Библиогр. – 7 назв.

УДК 633.521:577.21

Галиновский Д. В., Кожемяко Е. Н., Подвицкий Т. А., Анисимова Н. В., Хотылева Л. В., Кильчевский А. В. **ПДРФ-анализ генов целлюлозосинтаз льна (*Linum usitatissimum* L.)** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 77–82.

Идентифицированы гены целлюлозосинтаз, экспрессирующиеся у контрастных по качеству волокна форм льна. Объектом исследования были растения льна-долгунца сорта *Agiane*, которые используют для получения льноволокна, а также растения льна крупносемянного сорта *Endress Olajlen*, которые формируют волокно низкого качества. В стеблях растений обоих сортов установлена экспрессия генов *LusCesA4*, *LusCesA7*, а также генов *LusCesA9* или *LusCesA1*, либо их комбинации. Результаты экспериментов свидетельствуют об экспрессии в стеблях льна-долгунца дополнительных генов целлюлозосинтаз либо целлюлозосинтазоподобных генов (предположительно, *CesA6*, *CesA8*, *CsID*), которые не были обнаружены у льна крупносемянного.

Табл. 3. Ил. 1. Библиогр. – 10 назв.

УДК 582.293.378(476)

Белый П. Н., Цуриков А. Г., Голубков В. В., Сидорович Е. А. **Новые данные о лишайниках рода *Cetrelia* (Lecanorales, Ascomycota) в Беларуси** // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 83–88.

Ревизия гербарного материала по роду *Cetrelia* в Беларуси выявила неполноту опубликованных флористических данных по рассматриваемому роду. Установлено, что большинство гербарных образцов, определенных ранее как *C. cetrarioides*, относится к другому виду – *C. monachorum*. Таким образом, в настоящее время в состав рода *Cetrelia* на территории Беларуси входит три вида: *C. cetrarioides*, *C. monachorum* и *C. olivetorum*. Полученные в ходе исследования данные уточняют представления о таксономических особенностях и ареалах лишайников рода *Cetrelia* в Европе и, кроме того, могут быть использованы при составлении Красной книги Республики Беларусь, а также фундаментального многотомного издания «Флора Беларуси».

Ил. 4. Библиогр. – 15 назв.

УДК 612.084

Ковалева М. В., Афонин В. Ю. Особенности физиолого-биохимических свойств крыс линии SHR в условиях генетически обусловленной артериальной гипертензии // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 89–92.

Сравнивали морфологические, биохимические показатели у крыс линии SHR в возрасте 20–22 недель и WKY для получения модели гипертрофии миокарда в условиях генетически обусловленной артериальной гипертензии. В результате была получена модель гипертрофии миокарда в условиях генетически обусловленной артериальной гипертензии. Было установлено увеличение относительного коэффициента массы сердца, активности ферментов окислительного фосфорилирования, пролиферации и гибели клеток, изменение соотношения гематологических клеток у крыс линии SHR по сравнению с крысами линии WKY.

Табл. 4. Библиогр. – 14 назв.

УДК 616.127-001-085

Юшкевич П. Ф., Висмонт Ф. И. Противоишемический и антиаритмический эффекты дистантного ишемического пре- и посткондиционирования у крыс с сахарным диабетом // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 93–100.

Изучена противоишемическая и антиаритмическая эффективность дистантного ишемического пре- и посткондиционирования миокарда у крыс с сахарным диабетом. Установлено, что у крыс с экспериментальной моделью сахарного диабета имеет место повышение устойчивости миокарда к ишемическому и реперфузионному повреждению. Феномены дистантного ишемического пре- и посткондиционирования эффективны в плане ограничения размеров зоны некроза в миокарде левого желудочка крыс с сахарным диабетом. Феномен дистантного ишемического прекондиционирования эффективен в плане снижения длительности нарушений сердечного ритма у крыс с сахарным диабетом.

Табл. 2. Ил. 3. Библиогр. – 15 назв.

УДК 630.86+519.63

Агабеков В. Е., Гайшун И. В., Чуйко М. М., Шнип А. И., Стрижаков Д. А. Модель процесса быстрого пиролиза мелкодисперсных фракций растительного сырья // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 101–106.

Предложена физико-математическая модель процесса быстрого пиролиза сосновых опилок. Построены неявные конечноразностные вычислительные алгоритмы для решения систем уравнений математической модели. На основании вычислительных экспериментов установлено, что быстрый пиролиз сосновых опилок, поступающих в разогретый реактор, возможен при размере их частиц, не превышающем 0,45 мм, влажности 10–15 мас. % и при температуре пиролиза выше 490 °С.

Ил. 4. Библиогр. – 9 назв.

УДК 532.516; 620.9

Тютюма В. Д. Экспериментальное подтверждение модели локально-неравновесного течения вязкой жидкости // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 107–111.

Приводятся результаты экспериментальной проверки новой концепции развития тепловых и механических процессов в потоках вязкой сжимаемой среды.

Ил. 3. Библиогр. – 6 назв.

УДК 811.161.3'255.2=161.1+821.161.3.09(092)Мележ

Яковенко Н. В. Специфика художественного моделирования при передаче произведения средствами другого языка (на примере переводов романа И. Мележа «Минское направление») (на бел. яз.) // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 112–118.

Теоретически осмысливаются и анализируются переводы на русский язык романа «Минское направление» классика белорусской литературы Ивана Мележа. Осуществляется анализ путем сравнения, сопоставления текстов переводов, сделанных Л. Шапиро и Л. Раковским, с авторскими редакциями произведения, созданными И. Мележем на протяжении двадцати пяти лет.

Библиогр. – 16 назв.

УДК 636.92.033(476)

Норейко А. Ю., Герман Ю. И. Изучение продуктивных качеств кроликов зарубежного генофонда, разводимых в Республике Беларусь // Докл. НАН Беларуси. 2014. Т. 58, № 6. С. 119–124.

Проведен сравнительный анализ мясной продуктивности откормочного молодняка чистопородных и помесных кроликов различного происхождения, разводимых в Республике Беларусь. Выявлены лучшие породы и их сочетания по показателям убойных качеств, морфологическому составу туш и химическому составу мяса.

Табл. 3. Библиогр. – 15 назв.