

ISSN 2415-7058 (Print)
ISSN 2415-7066 (Online)

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ
*Основан
в 1997 году*

Серия А
**Естественные
науки**

6/2025

Редакционная коллегия журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки»

Главный редактор – д-р физ.-мат. наук, проф. **С.В. Беспалова**.

Зам. главного редактора – д-р биол. наук, проф. **О.С. Горецкий**.

Ответственный секретарь – канд. физ.-мат. наук **М.В. Фоменко**.

Члены редколлегии: д-р биол. наук, проф. **В.В. Акатов**, д-р хим. наук, проф. **А.С. Алемасова**; д-р биол. наук, проф. **В.Г. Артюхов**; канд. хим. наук, доц. **О.В. Баранова**; канд. хим. наук, доц. **С.Г. Бахтин**; д-р хим. наук, доц. **Н.И. Белая**; канд. хим. наук, доц. **А.В. Белый**; д-р философии, проф. **С.В. Белый**; д-р пед. наук, доц. **Т.В. Вардун**; д-р физ.-мат. наук, проф. **Вал.В. Волчков**; д-р физ.-мат. наук, проф. **Вит.В. Волчков**; д-р биол. наук, проф. **А.З. Глухов**; д-р физ.-мат. наук, проф. **А.С. Гольцев**; д-р биол. наук, доц. **С.Н. Горбов**; д-р хим. наук, проф. **А.В. Гулевская**; д-р биол. наук, доц. **Т.В. Денисова**; д-р хим. наук, проф. **В.Д. Дяченко**; д-р физ.-мат. наук, доц. **В.П. Заставный**; д-р физ.-мат. наук, доц. **А.В. Зыза**; д-р геогр. наук, проф. **К.Ш. Казеев**; д-р биол. наук, проф. **В.Н. Калаев**; канд. биол. наук, доц. **Е.А. Калаева**; д-р физ.-мат. наук, проф. **С.А. Калоеров**; д-р биол. наук, с.н.с. **О.Е. Клименко**; д-р с-х наук, проф. **С.И. Колесников**; д-р физ.-мат. наук, доц. **Б.И. Коносевич**; канд. биол. наук **В.О. Корниенко**; д-р хим. наук, проф. **Т.П. Кустова**; д-р биол. наук, доц. **Е.В. Лопатина**; д-р физ.-мат. наук, доц. **А.В. Мазнев**; д-р хим. наук, проф. **В.М. Михальчук**; д-р физ.-мат. наук, доц. **И.А. Моисеенко**; д-р биол. наук, проф. **И.В. Мухина**; д-р физ.-мат. наук, доц. **Р.Н. НескорODEV**; д-р биол. наук, проф. **В.Б. Павленко**; д-р биол. наук, доц. **С.В. Погодина**; канд. биол. наук, доц. **А.И. Сафонов**; д-р биол. наук, проф. **В.И. Соболев**; д-р техн. наук, проф. **В.И. Сторожев**; д-р биол. наук, доц. **В.В. Труш**; д-р хим. наук **Т.Г. Тюрина**; д-р биол. наук, доц. **М.Г. Холявка**; д-р хим. наук, доц. **И.Н. Щербakov**.

**The Editorial Board of the journal “Bulletin of Donetsk National University.
Series A: Natural Sciences”**

The Editor-in-Chief – Dr. of phys. and math., prof. **S.V. Bepalova**.

The Deputy of the Editor-in-Chief – Dr. of biol., prof. **O.S. Goretskii**.

Executive Secretary – Cand. of phys. and math. **M.V. Fomenko**.

The Members of the Editorial Board: Dr. of biol., prof. **V.V. Akatov**; Dr. of chem., prof. **A.S. Alemasova**; Dr. of biol., prof. **V.G. Artyukhov**; Cand. of chem., docent **O.V. Baranova**; Cand. of chem., docent **S.G. Bahtin**; Dr. of chem., docent **N.I. Belaya**; Cand. of chem., docent **A.V. Belyj**; Dr. of philosophy, prof. **S.V. Belyi**; Dr. of Ped. docent **T.V. Varduni**; Dr. of phys. and math., prof. **Val.V. Volchkov**; Dr. of phys. and math., prof. **Vit.V. Volchkov**; Dr. of biol., prof. **A.Z. Glukhov**; Dr. of phys. and math., prof. **A.S. Goltsev**; Dr. of biol., docent **S.N. Gorbov**; Dr. of chem., prof. **A.V. Gulevskaya**; Dr. of biol., docent **T.V. Denisova**; Dr. of chem., prof. **V.D. Dyachenko**; Dr. of phys. and math., docent **V.P. Zastavnyi**; Dr. of phys. and math., docent **A.V. Zyza**; Dr. of geogr, prof. **K.Sh. Kazeev**; Dr. of biol., prof. **V.N. Kalaev**; Cand. of biol., docent **E.A. Kalaeva**; Dr. of phys. and math., prof. **S.A. Kaloerov**; Dr. of biol., s.r. **O.E. Klimenko**; Dr. of Agric. prof. **S.I. Kolesnikov**; Dr. of phys. and math., docent **B.I. Konosevich**; Cand. of biol. **V.O. Kornienko**; Dr. of chem., prof. **T.P. Kustova**; Dr. of biol., docent **E.V. Lopatina**; Dr. of phys. and math., docent **A.V. Mazniev**; Dr. of chem., prof. **V.M. Mikhal'chuk**; Dr. of phys. and math., docent **I.A. Moiseyenko**; Dr. of biol., prof. **I.V. Muhina**; Dr. of phys. and math., docent **R.N. Neskorodev**; Dr. of biol., prof. **V.B. Pavlenko**; Dr. of biol., docent **S.V. Pogodina**; Cand. of biol., docent **A.I. Safonov**; Dr. of biol., prof. **V.I. Sobolev**; Dr. of tech., prof. **V.I. Storozhev**; Dr. of biol., docent **V.V. Trush**; Dr. of chem. **T.G. Tyurina**, Dr. of biol., docent **M.G. Holyavka**, Dr. of chem., docent **I.N. Shcherbakov**.

Адрес редакции: ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
ул. Университетская, 24, г. Донецк, ДНР, РФ.

Тел: +7 (856) 302-92-56, 302-09-92. **E-mail:** vestnikdonnu_a@mail.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikA>, <http://dongu-vestnik01.ru>

С 09.04.2024 г. научный журнал «Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки» (далее – Журнал) включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (**Перечень ВАК РФ**) (категория **K2** с 30.05.2025 г.) по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

физико-математические науки: 1.1.1. Вещественный, комплексный и функциональный анализ, 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин, 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела;
химические науки: 1.4.3. Органическая химия, 1.4.4. Физическая химия;
биологические науки: 1.5.2. Биофизика, 1.5.5. Физиология человека и животных, 1.5.15. Экология, 1.5.19. Почвоведение.

Журнал включен в перечень **РИНЦ** (Лицензионный договор № 230-11/2025 от 17 ноября 2025 г.). Информация о статьях отражается в Реферативном журнале и Базах данных **ВИНИТИ РАН** (договор о сотрудничестве от 11.04.2011 г.).

*Издается по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Протокол № 16 от 29.12.2025 г.*

© ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 2025

Вестник Донецкого национального университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Серия А. Естественные науки

№ 6

Донецк 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Механика

<i>Бондаренко Н. С., Гольцев А. С.</i> Исследование влияния длины разреза на коэффициенты интенсивности температурных напряжений в трансверсально-изотропной пластине при одностороннем теплообмене	3
<i>Глушанков Е. С.</i> Решение задачи о действии линейного потока тепла в сплошной пластинке из пьезоэлектрического материала	14
<i>Канарейкин А. И.</i> Определение термоупругого состояния поверхности стержня эллиптической формы с внутренним источником тепла при граничных условиях первого рода	22
<i>Сторожев В. И., Сторожев С. В., Фоменко М. В.</i> Однородные решения для модели динамического термоупругого деформирования функционально-градиентных трансверсально-изотропных плит с двухфакторной экспоненциальной неоднородностью	28

Биологические науки

<i>Антонов А. А., Ванькова А. А., Баранова Е. Н., Гулевич А. А., Куренина Л. В., Платонова Е. В.</i> Анализ структуры микробного комплекса ризосферы трансгенных растений томата с геном холиноксидазы	36
<i>Балакирева Г. А., Балакирева Е. А.</i> Влияние кофеина на некоторые поведенческие показатели алкоголизованных самцов белых крыс с разным уровнем тревожности	48
<i>Губарев А. А., Павлов В. Н., Легенький Ю. А., Беспалова С. В.</i> О разделении по диаметру магнитомаркированных клеток при помощи пленок с полосовой доменной структурой	58
<i>Демченко С. И.</i> Технология получения биопрепарата для защиты сосновых насаждений от корневой гнили	70
<i>Лурье Г. В.</i> Особенности адаптации студентов разного морфо-функционального статуса к физическим нагрузкам различной направленности	81
<i>Сирюк Ю. А., Кононенко В. В., Капиуков Р. А.</i> Влияние фазовых переходов в доменной структуре пленки феррита-граната на особенности движения магнитомакированных клеток	89
<i>Штирц Ю. А.</i> Оценка подобия гумусо-аккумулятивного горизонта почв южной части Шахтерского района Донецкой Народной Республики	100

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997

Series A. Natural Sciences

No 6

Donetsk 2025

CONTENTS

Mechanics

<i>Bondarenko N. S., Goltsev A. S.</i> Investigation of the influence of the cut length on the intensity factors of thermal stresses in a transversely isotropic plate with one-sided heat exchange	3
<i>Glushankov E. S.</i> Solution of the problem of the linear heat flux acting in the continuous plate made of piezoelectric material	14
<i>Kanareykin A. I.</i> Determination of the thermoelastic state of the surface of an elliptical rod with an internal heat source under boundary conditions of the first kind	22
<i>Storozhev V. I., Storozhev S. V., Fomenko M. V.</i> Homogeneous solutions for a model of dynamic thermoelastic deformation of functionally graded transversely isotropic plates with two-factor exponential heterogeneity	28

Biological sciences

<i>Antonov A. A., Vankova A. A., Baranova E. N., Gulevich A. A., Kurenina L. V., Platonova E. V.</i> Analysis of rhizosphere microbial complex structure of transgenic tomato plants with the choline oxidase gene	36
<i>Balakireva G. A., Balakireva E. A.</i> Effect of caffeine on some behavioral indicators of alcoholized male white rats with different levels of anxiety	48
<i>Gubarev A.A., Pavlov V. N., Legenkiy Yu. A., Besspalova S. V.</i> On the separation of magnetically marked cells by diameter using films with a strip domain structure	58
<i>Demchenko S. I.</i> The technology for obtaining a biological product to protect pine plantations from root rot	70
<i>Lurye G. V.</i> Peculiarities of adaptation of students of different morphological and functional status to physical activities of different orientation	81
<i>Siryuk Yu. A., Kononenko V. V., Kapshukov R. A.</i> Influence of phase transitions in the ferrite-garnet film domain structure on the motion features of magnetically activated cells	89
<i>Shtirts Yu. A.</i> Assessment of the similarity of the humus-accumulative horizon in soils of the southern part of the Shakhtersky district of the Donetsk People's Republic	100

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ РАЗРЕЗА НА КОЭФФИЦИЕНТЫ
ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОЙ ПЛАСТИНЕ
ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ ТЕПЛООБМЕНЕ**

© 2025. *Н. С. Бондаренко, А. С. Гольцев*

На базе обобщённой теории в варианте $\{1,0\}$ -аппроксимации решена задача термоупругости для трансверсально-изотропной пластины с теплоизолированным разрезом. Исследована зависимость коэффициентов интенсивности напряжений от длины разреза и параметра сдвиговой податливости. Предполагался случай верхнего одностороннего теплообмена с внешней средой и действие градиента средней температуры основного температурного поля на линии разреза.

Ключевые слова: $\{1,0\}$ -аппроксимация; трансверсально-изотропная пластина; теплоизолированный разрез; коэффициенты интенсивности напряжений; верхний односторонний теплообмен; параметр сдвиговой податливости.

Введение. Концентрация температурных напряжений, в том числе возникающих вследствие геометрических неоднородностей, является одним из основных факторов, приводящих к снижению термической прочности тонкостенных элементов конструкций. Учёт этого фактора крайне важен для конструкций, работающих в экстремальных температурных условиях, например, в аэрокосмической и металлургической отраслях.

Механика разрушения трансверсально-изотропных пластин изучает процессы разрушения элементов конструкций с учётом анизотропии их упругих свойств в поперечном направлении. Такие пластины могут быть ослаблены концентраторами напряжений (в частности, трещинами). Существенный вклад в фундаментальные исследования в области механики разрушения трансверсально-изотропных пластин внесла монография Л. П. Мазурака, Л. Т. Бережницкого [1]. Актуальность данной тематики в настоящее время подтверждается также публикациями И. П. Бокова, Е. А. Стрельниковой [2], Н. П. Лазарева с соавторами [3], Д. А. Пожарского [4], Е. А. Артамоновой, Д. А. Пожарского [5].

В классической теории пластин изменение упругих свойств в направлении, ортогональном к плоскости изотропии, не может быть учтено, поэтому актуальным является построение и развитие уточнённых теорий, учитывающих явления, связанные с поперечными сдвигами и обжатием.

При исследовании напряжённо-деформированного состояния трансверсально-изотропных пластин в работе И. Ю. Хомы, О. Г. Дашко, И. Г. Коваленко [6] использовалась обобщённая теория пластин, предполагающая разложение искомых функций по полиномам А. М. Лежандра (не $\{m, n\}$ -аппроксимация).

Следует заметить, что в области механики разрушения трансверсально-изотропных пластин исследования проведены для случаев силового нагружения. Рассмотрение задач термоупругости в этой области отсутствует. Об актуальности

решения задач термоупругости свидетельствуют публикации [7–9]. В. А. Киричек, В. И. Жорник [7] рассмотрели несвязанную задачу термоупругости для случая нагревания детали в форме сплошного цилиндра с поперечным дискообразным микродефектом. Статья А. И. Канарейкина [8] посвящена вопросам стационарной теплопроводности в шаре при граничных условиях первого рода. При нахождении решения используется метод разложения в ряд, содержащий полиномы А. М. Лежандра. А. А. Киреев, Е. Ю. Михайлова, Г. В. Федотенков [9] рассмотрели контактную задачу для сферической оболочки, опирающейся на абсолютно твёрдую плоскую поверхность. Для оболочки используется система уравнений равновесия в перемещениях, основанная на гипотезах С. П. Тимошенко, учитывающая влияние деформации сдвига. Функция влияния построена с применением разложений в ряды по полиномам А. М. Лежандра и Л. Б. Гегенбауэра.

Целью настоящей работы является решение задачи термоупругости для трансверсально-изотропной пластины с теплоизолированным разрезом на базе обобщённой теории в варианте $\{1,0\}$ -аппроксимации.

Постановка задачи. Рассмотрим трансверсально-изотропную пластину толщины $2h$ с теплоизолированным разрезом L . На лицевых поверхностях пластины происходит конвективный теплообмен по закону И. Ньютона с внешней средой нулевой температуры. Отнесём пластину к безразмерной системе координат x_1, x_2, x_3 , определённой с точностью до полутолщины пластины h , причём x_1, x_2 – координаты точки в срединной плоскости (плоскости изотропии), x_3 – толщинная координата.

В рамках обобщённой теории в варианте $\{1,0\}$ -аппроксимации имеют место такие разложения в ряды Ж. Фурье по полиномам А. М. Лежандра от поперечной координаты $P_k = P_k(x_3)$ [10]:

– компоненты вектора перемещений:

$$\begin{aligned} u_1(x_1, x_2, x_3) &= u(x_1, x_2)P_0(x_3) + \gamma_1(x_1, x_2)P_1(x_3); \\ u_2(x_1, x_2, x_3) &= v(x_1, x_2)P_0(x_3) + \gamma_2(x_1, x_2)P_1(x_3); \quad u_3(x_1, x_2, x_3) = w_0(x_1, x_2)P_0(x_3), \end{aligned}$$

где $u, v, w_0, \gamma_1, \gamma_2$ – обобщённые перемещения пластины, причём u, v, w_0 – аналоги перемещений точек срединной поверхности, а γ_1, γ_2 – аналоги углов поворота нормали;

– компоненты тензора напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_k(x_1, x_2, x_3) &= \frac{1}{2}N_k(x_1, x_2)P_0(x_3) + \frac{3}{2}M_k(x_1, x_2)P_1(x_3) \quad (k=1, 2); \\ \tau_{12}(x_1, x_2, x_3) &= \frac{1}{2}S(x_1, x_2)P_0(x_3) + \frac{3}{2}H(x_1, x_2)P_1(x_3); \\ \tau_{k3}(x_1, x_2, x_3) &= \frac{1}{2}Q_{k0}(x_1, x_2)\{P_0(x_3) - P_2(x_3)\} \quad (k=1, 2); \\ \sigma_3(x_1, x_2, x_3) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где N_k, M_k, Q_{k0} ($k=1, 2$), S, H – обобщённые усилия и моменты, причём N_1, N_2, S – аналоги мембранных усилий; M_1, M_2, H – аналоги изгибающих и крутящего моментов; Q_{10}, Q_{20} – аналоги перерезывающих сил;

– температура:

$$T(x_1, x_2, x_3) = T_0(x_1, x_2)P_0(x_3) + T_1(x_1, x_2)P_1(x_3),$$

где T_0 – аналог средней температуры; T_1 – аналог температурного момента.

Система уравнений термоупругости для обобщённой теории в варианте {1,0}-аппроксимации для трансверсально-изотропных пластин включает в себя [10, 11]:

– первое приближение трёхмерного уравнения теплопроводности

$$\lambda^* \Delta T_k + A_{k0}T_0 + A_{k1}T_1 = 0 \quad (k = 0, 1), \quad (2)$$

где

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{\lambda'}; \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2};$$

λ, λ' – коэффициенты теплопроводности в плоскости изотропии и в направлении, перпендикулярном к ней; элементы матрицы $A = \|A_{kj}\|_{k,j=0,1}$ имеют вид:

$$\begin{aligned} A_{00} &= -\frac{6}{\Delta_1} \left\{ Bi^+ Bi^- + 3(Bi^+ + Bi^-) \right\}; \quad A_{01} = \frac{A_{10}}{3} = -\frac{15}{\Delta_1} (Bi^+ - Bi^-); \\ A_{11} &= -\frac{30}{\Delta_1} \left\{ Bi^+ Bi^- + 2(Bi^+ + Bi^-) + 3 \right\}; \quad \Delta_1 = 2Bi^+ Bi^- + 9(Bi^+ + Bi^-) + 36; \end{aligned}$$

Bi^\pm – критерий М. Э. Био на лицевых поверхностях пластины $x_3 = \pm 1$;

– уравнения Ж.-М. Дюамеля – Д. Неймана в перемещениях

$$\begin{aligned} N_1 &= B_0 \left\{ \frac{\partial u}{\partial x_1} + \nu \frac{\partial v}{\partial x_2} - \alpha(1+\nu)T_0 \right\}; \quad N_2 = B_0 \left\{ \frac{\partial v}{\partial x_2} + \nu \frac{\partial u}{\partial x_1} - \alpha(1+\nu)T_0 \right\}; \\ S &= \frac{1-\nu}{2} B_0 \left(\frac{\partial u}{\partial x_2} + \frac{\partial v}{\partial x_1} \right); \quad H = \frac{1-\nu}{2} D_0 \left(\frac{\partial \gamma_1}{\partial x_2} + \frac{\partial \gamma_2}{\partial x_1} \right); \\ M_1 &= D_0 \left\{ \frac{\partial \gamma_1}{\partial x_1} + \nu \frac{\partial \gamma_2}{\partial x_2} - \alpha(1+\nu)T_1 \right\}; \quad M_2 = D_0 \left\{ \frac{\partial \gamma_2}{\partial x_2} + \nu \frac{\partial \gamma_1}{\partial x_1} - \alpha(1+\nu)T_1 \right\}; \\ Q_{k0} &= \Lambda_0 \left(\gamma_k + \frac{\partial w_0}{\partial x_k} \right) \quad (k = 1, 2), \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$B_0 = 3D_0 = \frac{2}{1-\nu^2}; \quad \Lambda_0 = \frac{5}{3E/G'};$$

α, E, ν – температурный коэффициент линейного расширения, модуль Т. Юнга и коэффициент С. Д. Пуассона в плоскости изотропии соответственно; G' – модуль сдвига в плоскостях, перпендикулярных к плоскости изотропии.

Мембранные усилия и перерезывающие силы в (3) определены с точностью до значения Eh , а моменты – с точностью до значения Eh^2 .

– Уравнения равновесия

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial x_1} + \frac{\partial S}{\partial x_2} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial x_1} + \frac{\partial N_2}{\partial x_2} = 0; \quad \frac{\partial M_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_2} - Q_{10} = 0; \\ \frac{\partial H}{\partial x_1} + \frac{\partial M_2}{\partial x_2} - Q_{20} = 0; \quad \frac{\partial Q_{10}}{\partial x_1} + \frac{\partial Q_{20}}{\partial x_2} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Компоненты термоупругого состояния пластины с разрезом G^* представим в виде суммы [12]

$$G^* = G^o + G, \quad (5)$$

где G^o – компоненты основного термоупругого состояния, т. е. термоупругого состояния в сплошной пластине; G – компоненты возмущённого термоупругого состояния, вызванного наличием разреза. Величины G^o и G в (5) определяются из системы дифференциальных уравнений вида (2)–(4).

Граничные условия для компонент возмущённого термоупругого состояния G имеют вид:

– для температуры

$$\left. \frac{\partial T_k}{\partial n} \right|_L = - \left. \frac{\partial T_k^o}{\partial n} \right|_L \quad (k = 0, 1); \quad (6)$$

– для обобщённых внутренних силовых факторов

$$\begin{aligned} N_n|_L = -N_n^o|_L; \quad S_{nt}|_L = -S_{nt}^o|_L; \quad M_n|_L = -M_n^o|_L; \\ H_{nt}|_L = -H_{nt}^o|_L; \quad Q_n|_L = -Q_n^o|_L, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$N_n = n_1^2 N_1 + 2n_1 n_2 S + n_2^2 N_2; \quad S_{nt} = n_1 n_2 (N_1 - N_2) + (n_2^2 - n_1^2) S;$$

$$M_n = n_1^2 M_1 + 2n_1 n_2 H + n_2^2 M_2; \quad H_{nt} = n_1 n_2 (M_1 - M_2) + (n_2^2 - n_1^2) H; \quad Q_n = n_1 Q_{10} + n_2 Q_{20};$$

N_n , S_{nt} – нормальное и касательное усилие; M_n , H_{nt} – изгибающий и крутящий момент; Q_n – перерезывающая сила; \vec{t} – касательная; $\vec{n} = (n_1, n_2)$ – нормаль к линии разреза.

Первые два граничных условия (7) задаются для компонент безмоментного термоупругого состояния, а последние три – для компонент состояния термоупругого изгиба пластин.

Методика решения задачи. Задачу термоупругости (2)–(4) решим с использованием двумерного интегрального преобразования Ж. Фурье [13]

$$F[G(x_1, x_2)] = \tilde{G}(\xi_1, \xi_2) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x_1, x_2) e^{i(\xi_1 x_1 + \xi_2 x_2)} dx_1 dx_2, \quad (8)$$

где $\tilde{G}(\xi_1, \xi_2)$ – трансформанта функции $G(x_1, x_2)$; $\vec{\xi} = (\xi_1, \xi_2)$ – координаты текущей точки в пространстве трансформант.

Поскольку компоненты возмущённого термоупругого состояния $G = G(x_1, x_2)$, вызванного наличием разреза, претерпевают скачки своих значений на линии L , то их производные определяются с позиции теории обобщённых функций [14]:

$$\frac{\partial G}{\partial x_k} = \left\{ \frac{\partial G}{\partial x_k} \right\} + n_k \delta_L [G] \quad (k = 1, 2), \quad (9)$$

где выражение в фигурных скобках обозначает классическую производную функции G ; $[G] = G^+ - G^-$ – скачок функции G при переходе через линию L (G^\pm – граничные значения функции G в соответствии с направлением нормали \vec{n}); δ_L – двумерная дельта-функция П. Дирака, сосредоточенная на линии L :

$$(\delta_L, G(x_1, x_2)) = \int_L G(x'_1, x'_2) dL;$$

$\vec{x}' = (x'_1, x'_2)$ – координаты точки на линии L . Направление интегрирования образует прямой угол с нормалью \vec{n} при вращении против часовой стрелки.

Из (9) следует выражение для двумерного оператора П.-С. Лапласа

$$\Delta G = \{\Delta G\} + \left[\frac{\partial G}{\partial n} \right] \delta_L + \frac{\partial}{\partial n} ([G] \delta_L). \quad (10)$$

Тогда с учётом формулы (8) трансформанты частных производных первого порядка разрывной функции G равны [12]

$$F\left(\frac{\partial G}{\partial x_k}\right) = (-i\xi_k) \tilde{G} + \frac{1}{2\pi} \int_L n_k [G] e^{i(\xi_1 x'_1 + \xi_2 x'_2)} dL \quad (k = 1, 2),$$

а трансформанта оператора П.-С. Лапласа (10) есть

$$F[\Delta G] = -p^2 \tilde{G} - \frac{1}{2\pi} \int_L \left\{ i(\xi_1 n_1 + \xi_2 n_2) [G] - \left[\frac{\partial G}{\partial n} \right] \right\} e^{i(\xi_1 x'_1 + \xi_2 x'_2)} dL; \quad p^2 = \xi_1^2 + \xi_2^2.$$

Применяя двумерное интегральное преобразование Ж. Фурье к первому приближению трёхмерного уравнения теплопроводности (2), получим интегральные представления трансформант компонент возмущённой температуры \tilde{T}_k [15, 16]:

$$\tilde{T}_k = \frac{1}{2\pi} \int_L (\tilde{B}_{k0} [T_0] + \tilde{B}_{k1} [T_1]) e^{i(\xi_1 x'_1 + \xi_2 x'_2)} dL \quad (k = 0, 1),$$

где

$$\tilde{B}_{km} = \frac{\lambda^* M_{mk} (\lambda^* p^2)}{\Delta_2 (\lambda^* p^2)} i(\xi_1 n_1 + \xi_2 n_2) \quad (k, m = 0, 1); \quad \Delta_2 (\mu) = (\mu + \rho_0^2) (\mu + \rho_1^2);$$

$M_{mk} (\mu)$ – алгебраическое дополнение элемента m -ой строки и k -го столбца матрицы $A - \mu E$; E – единичная матрица второго порядка; μ – переменная в характеристическом

уравнении для матрицы A ; $\Delta_2(\mu) = \det(A - \mu E)$ – характеристический многочлен матрицы A ; ρ_0^2, ρ_1^2 – характеристические корни матрицы A , взятые со знаком «–».

Оригиналы искомых функций находятся с помощью формулы обращения для двумерного интегрального преобразования Ж. Фурье [13]

$$F^{-1}[\tilde{G}(\xi_1, \xi_2)] = G(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{G}(\xi_1, \xi_2) e^{i(\xi_1 x_1 + \xi_2 x_2)} d\xi_1 d\xi_2.$$

При обращении трансформант компонент возмущённого термоупругого состояния используется методика, применяющая специальную G -функцию $G_{n,v}$, интегральное представление которой имеет вид [17]

$$G_{n,v}(rz) = (-1)^n \left(\frac{r}{2}\right)^{v-n} \int_0^{\infty} \frac{\rho^{v-n+1} J_{v+n}(r\rho)}{\rho^2 + z^2} d\rho; \quad r > 0; \quad \operatorname{Re} z > 0; \quad -1 < \operatorname{Re} v < n + \frac{3}{2},$$

где $J_v(x)$ – функция Ф. В. Бесселя первого рода порядка v .

Рассмотрим прямолинейный теплоизолированный разрез длины $2l$, расположенный вдоль оси абсцисс симметрично относительно начала координат:

$$L = \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 : |x_1| \leq l, x_2 = 0\}. \quad (11)$$

Применяя к уравнениям (3), (4) вышеописанную методику, найдём интегральные представления компонент возмущённого термоупругого состояния:

$$P_k^j(x_1, x_2) = -\frac{l}{2\pi} \int_{-1}^1 \sum_{m=1}^{\kappa} K_{km}^j(x_1 - ls, x_2) \psi_m^j(s) ds, \quad (12)$$

где:

– для безмоментного термоупругого состояния

$$j = 0; \quad \kappa = 4; \quad P_k^0 = N_k \quad (k = 1, 2); \quad P_3^0 = S; \\ \psi_1^0 = \frac{d[u]}{ds}; \quad \psi_2^0 = \frac{d[v]}{ds}; \quad \psi_{k+3}^0 = [T_k] \quad (k = 0, 1);$$

– для состояния термоупругого изгиба

$$j = 1; \quad \kappa = 7 \quad \text{для} \quad P_k^1 = M_k \quad (k = 1, 2); \quad P_3^1 = H; \quad \kappa = 5 \quad \text{для} \quad P_{k+3}^1 = Q_{k0} \quad (k = 1, 2); \\ \psi_k^1(s) = \frac{d[\gamma_k]}{ds}; \quad \psi_{k+3}^1(s) = [\gamma_k] \quad (k = 1, 2); \quad \psi_3^1(s) = \frac{d[w_0]}{ds}; \quad \psi_{k+6}^1(s) = [T_k] \quad (k = 0, 1).$$

Приведём примеры ядер K_{km}^j из интегральных представлений (12):

– для безмоментного термоупругого состояния

$$K_{23}^0 = -\frac{\alpha \sin \varphi \cos 2\varphi}{r} + \frac{\alpha r}{4} \left\{ \sin \varphi g_{100}^0(r) + \sin 3\varphi g_{210}^0(r) \right\};$$

$$g_{jkm}^0(r) = C_{0m0} G_{j,k} \left(\frac{\rho_0}{\sqrt{\lambda^*}} r \right) + C_{0m1} G_{j,k} \left(\frac{\rho_1}{\sqrt{\lambda^*}} r \right); \quad C_{0mj} = \frac{1}{\lambda^*} \left\{ \frac{\mu M_{m0}(\mu)}{2\mu + \rho_0^2 + \rho_1^2} \right\} \Big|_{\mu = -\rho_j^2};$$

$$r = \sqrt{(x_1 - ls)^2 + x_2^2}; \quad \cos \varphi = \frac{x_1 - ls}{r}; \quad \sin \varphi = \frac{x_2}{r};$$

– для состояния термоупругого изгиба

$$K_{23}^1 = -\Lambda_0 \sin 2\varphi G_{1,1}(ar); \quad a = \sqrt{3\Lambda_0(1+\nu)}.$$

С использованием интегральных представлений (12) и граничных условий (6), (7) получим системы сингулярных интегральных уравнений (СИУ), из которых определяются искомые функции $\psi_m^j(s)$:

– для безмоментного термоупругого состояния

$$\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{\psi_k^0(s) ds}{s - \zeta} = F_k^0(\zeta) \quad (k = 1, 2); \quad (13)$$

– для состояния термоупругого изгиба

– СИУ, из которого находится $\psi_2^1(s)$:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \frac{\psi_2^1(s) ds}{s - \zeta} + \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 E_{22}^1(\zeta - s) \psi_2^1(s) ds = F_2^1(\zeta); \quad (14)$$

– два СИУ, из которых находятся $\psi_1^1(s)$, $\psi_3^1(s)$:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \frac{\psi_k^1(s) ds}{s - \zeta} + \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1,3} \int_{-1}^1 E_{km}^1(\zeta - s) \psi_m^1(s) ds = F_k^1(\zeta) \quad (k = 1, 3), \quad (15)$$

где $E_{km}^1(\zeta - s)$ – разностные ядра, представляющие собой линейные комбинации специальной G -функции и её первообразной, например

$$E_{13}^1(\zeta - s) = 3\Lambda_0 l G_{1,1}(al|\zeta - s|).$$

Правые части систем СИУ (13)–(15) являются линейными комбинациями компонент основного термоупругого состояния на линии разреза (11) и интегралов от скачков компонент температуры $[T_k]$ с разностными ядрами, содержащими специальные G -функции, например

$$F_1^0(\zeta) = -2S^0 \Big|_{x_2=0} + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 D_1^0(\zeta - s) [T_0] ds + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 D_2^0(\zeta - s) [T_1] ds;$$

$$D_1^0(\zeta - s) = \frac{\alpha}{s - \zeta} + \frac{\alpha l^2(\zeta - s)}{2} g_{200}^0(l|\zeta - s|); \quad D_2^0 = \frac{\alpha l^2(\zeta - s)}{2} g_{201}^0(l|\zeta - s|).$$

Дополнительные ограничения на искомые функции наложим с учётом того, что обобщённые перемещения непрерывны на концах линии разреза (11):

$$\int_{-1}^1 \psi_k^j(s) ds = 0 \quad (k=1, 2 \text{ для } j=0; k=\overline{1, 3} \text{ для } j=1). \quad (16)$$

После численного решения систем СИУ (13)–(15) при ограничениях (16) внутренние силовые факторы найдём из интегральных представлений (12).

Коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) для поперечного и продольного сдвига получим, сравнивая коэффициенты при особенности $r^{-1/2}$ в ненулевых компонентах тензора напряжений (1) с известными асимптотическими представлениями напряжений [18]:

$$K_{II}^{\pm} = \mp \frac{\sqrt{\pi h l E}}{4} \left\{ P_0(z) \lim_{s \rightarrow \pm 1} \left[\psi_1^0(s) \sqrt{1-s^2} \right] + P_1(z) \lim_{s \rightarrow \pm 1} \left[\psi_1^1(s) \sqrt{1-s^2} \right] \right\};$$

$$K_{III}^{\pm} = \mp \frac{\sqrt{\pi h l E} \Lambda_0}{4} \{ P_0(z) - P_2(z) \} \lim_{s \rightarrow \pm 1} \left\{ \psi_3^1(s) \sqrt{1-s^2} \right\}. \quad (17)$$

Здесь выражения для КИН записаны в размерной системе координат ($z = hx_3$).

Заметим, что КИН K_{II}^{\pm} , K_{III}^{\pm} изменяются по толщине пластины ($-h \leq z \leq h$), поскольку в выражениях (17) присутствуют полиномы А. М. Лежандра. При этом K_{II}^{\pm} достигает максимального по модулю значения K_{II}^{\max} на одной из лицевых поверхностей пластины ($z = -h$ или $z = h$), а K_{III}^{\pm} – в срединной плоскости пластины ($z = 0$), причём

$$K_{II}^{\max} = \frac{\sqrt{\pi h l E}}{4} \left\{ \left| \lim_{s \rightarrow 1} \left[\psi_1^0(s) \sqrt{1-s^2} \right] \right| + \left| \lim_{s \rightarrow 1} \left[\psi_1^1(s) \sqrt{1-s^2} \right] \right| \right\};$$

$$K_{III}^{\max} = \frac{3\sqrt{\pi h l E} \Lambda_0}{8} \left| \lim_{s \rightarrow 1} \left\{ \psi_3^1(s) \sqrt{1-s^2} \right\} \right|. \quad (18)$$

Анализ результатов численных исследований. Численные исследования посвящены оценке влияния длины разреза и трансверсальных механических характеристик материала, а именно параметра сдвиговой податливости E/G' , на коэффициенты интенсивности температурных напряжений для поперечного и продольного сдвига (18). Рассматривался случай верхнего одностороннего теплообмена с окружающей средой слабой интенсивности ($Bi^+ = 0,001$; $Bi^- = 0$). Расчёты проведены при значении коэффициента С. Д. Пуассона $\nu = 0,3$.

Чтобы исследовать поведение коэффициентов интенсивности температурных напряжений, обусловленных лишь возмущённым температурным полем, предполагалась линейная зависимость основного температурного поля в пластине при отсутствии внутренних силовых факторов основного термоупругого состояния [19]. Рассматривался случай распространения однородного теплового потока перпендикулярно линии разреза (11), т. е. действие следующего градиента средней температуры основного температурного поля на линии разреза:

$$\left. \frac{\partial T_0^o}{\partial x_2} \right|_{x_2=0} = q_0 = \text{const} \neq 0; \quad \left. \frac{\partial T_1^o}{\partial x_2} \right|_{x_2=0} = 0. \quad (19)$$

Результаты численных исследований представлены на рис. 1 и рис. 2 в виде графиков зависимостей максимальных относительных значений КИН от длины разреза при различных значениях параметра сдвиговой податливости E/G' .

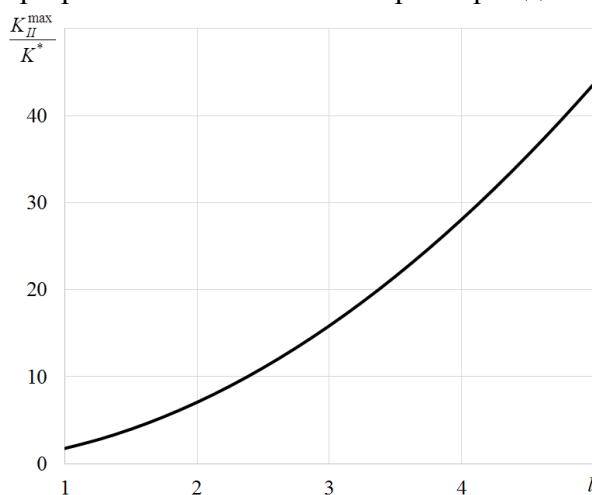


Рис. 1

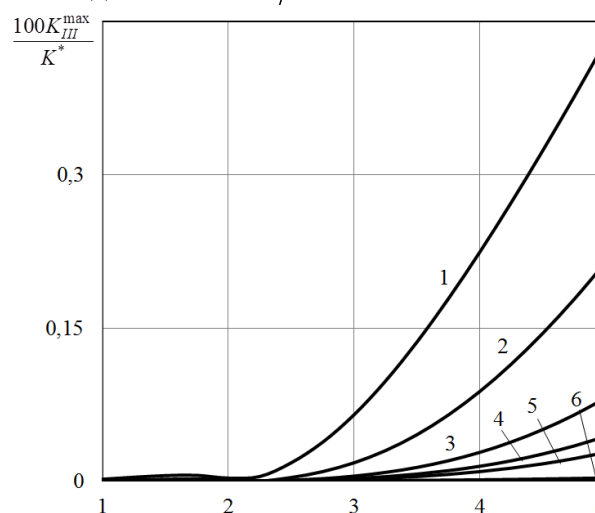


Рис. 2

На рис. 1 представлен график максимальных относительных значений КИН для поперечного сдвига K_{II}^{\max} , а на рис. 2 – графики максимальных относительных значений КИН для продольного сдвига K_{III}^{\max} . Значения КИН даны с точностью до величины $K^* = \alpha q_0 E \sqrt{lh} / 4$, которая соответствует значению КИН в изотропной пластине без теплообмена при действии однородного потока тепла интенсивности q_0 перпендикулярно линии разреза [20]. Кривые 1–6 на рис. 2 отвечают следующим значениям параметра сдвиговой податливости E/G' : 2,6; 5; 10; 15; 20; 100 соответственно.

Из полученных результатов следует, что увеличение длины разреза приводит к увеличению КИН для поперечного и продольного сдвига. Такая зависимость полностью соответствует физической картине процесса.

Полученные результаты наглядно демонстрируют также тот факт, что анизотропные свойства трансверсально-изотропных пластин проявляются лишь для внутренних силовых факторов, характеризующих состояние изгиба. КИН для поперечного сдвига определяются касательными усилиями в плоскости изотропии и не будут зависеть от модуля сдвига в плоскостях, перпендикулярных к плоскости изотропии (G'). Поэтому на рис. 1 представлен один график, соответствующий всем рассмотренным случаям изменения параметра сдвиговой податливости.

Вследствие одностороннего теплообмена возмущённое температурное поле, обусловленное наличием разреза, приводит к возникновению термоупругих изгибающих моментов и, как следствие, к КИН для продольного сдвига. В этом случае параметр сдвиговой податливости будет оказывать существенное влияние на соответствующий коэффициент интенсивности.

Кривая 1 на рис. 2, соответствующая значению параметра сдвиговой податливости 2,6, описывает поведение изотропной пластины по теории типа С. П. Тимошенко ($\{1,0\}$ -аппроксимация). Эта кривая совпадает с аналогичным графиком с нулевым значением параметра сдвиговой податливости, который относится к случаю пластины с бесконечной сдвиговой жёсткостью (классическая теория

Г. Кирхгофа). Таким образом, можно утверждать, что классическая теория изотропных пластин даёт сопоставимые по точности результаты с теорией типа С. П. Тимошенко при термоупругом изгибе изотропных пластин.

С увеличением податливости материала трансверсально-изотропной пластины на сдвиг значения КИН для продольного сдвига уменьшаются, что соответствует физической картине процесса. Увеличение параметра сдвиговой податливости связано с уменьшением модуля сдвига в плоскостях, перпендикулярных к плоскости изотропии (G'), и касательных напряжений в этих плоскостях. При $E/G' \rightarrow \infty$ касательные напряжения исчезают и КИН для продольного сдвига равен нулю.

Следует заметить, что максимальные относительные значения КИН для продольного сдвига K_{III}^{\max} на несколько порядков меньше чем аналогичные значения для поперечного сдвига K_{II}^{\max} . Однако это относится к рассмотренному случаю слабой интенсивности теплообмена с окружающей средой. С увеличением уровня теплообмена КИН для продольного сдвига будут возрастать.

Выводы. При наличии однородных тепловых потоков в трансверсально-изотропных пластинах с трещинами при несимметричном теплообмене с окружающей средой кроме КИН для поперечного сдвига будут также возникать КИН для продольного сдвига. Их величина существенно зависит от длины трещин, а КИН для продольного сдвига зависят также и от параметра сдвиговой податливости материала пластин.

Исследования проводились в ФГБОУ ВО «ДонГУ» в рамках государственного задания (№ госрегистрации 124012400353-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мазурак Л. П. Изгиб трансверсально-изотропных пластин с дефектами типа трещин / Л. П. Мазурак, Л. Т. Бережницкий. – Киев : Наукова думка, 1990. – 254 с.
2. Боков И. П. Коэффициенты интенсивности напряжений трещин для трансверсально-изотропной пластины при изгибе / И. П. Боков, Е. А. Стрельникова // Вісник ХНТУ. – 2016. – № 3 (58). – С. 181–186.
3. О регулярности решения в задаче о равновесии пластины Тимошенко, содержащей наклонную трещину / Н. П. Лазарев, Х. Итоу, П. В. Сивцев, И. М. Тихонова // Математические заметки СВФУ. – 2018. – Т. 25, № 1. – С. 38–49.
4. Пожарский Д. А. Периодические системы трещин в трансверсально изотропном теле / Д. А. Пожарский // Известия Российской Академии наук. Механика твердого тела. – 2019. – № 3. – С. 54–63.
5. Артамонова Е. А. Плоские трещины в трансверсально изотропном слое / Е. А. Артамонова, Д. А. Пожарский // Прикладная математика и механика. – 2020. – Т. 84, № 4. – С. 500–510.
6. Хома И. Ю. Напряженное состояние трансверсально-изотропной пластины с круговой цилиндрической полостью при заданной расщепляющей силе / И. Ю. Хома, О. Г. Дашко, И. Г. Коваленко // Теоретическая и прикладная механика. – 2014. – № 8 (54). – С. 3–10.
7. Киричек В. А. Влияние нанесенного покрытия на развитие внутреннего микродефекта в детали цилиндрической формы при ее нагревании / В. А. Киричек, В. И. Жорник // Актуальные вопросы машиноведения. – 2024. – Т. 13. – С. 238–243.
8. Канарейкин А. И. Определение стационарного температурного поля сфероид при граничных условиях первого рода / А. И. Канарейкин // Инженерная физика. – 2024. – № 10. – С. 28–33.
9. Киреенков А. А. Метод сведения контактных задач для сферических оболочек типа Тимошенко к парным рядам-уравнениям / А. А. Киреенков, Е. Ю. Михайлова, Г. В. Федотенков / Механика композиционных материалов и конструкций. – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 390–401.
10. Пелех Б. Л. Слоистые анизотропные пластины и оболочки с концентраторами напряжений / Б. Л. Пелех, В. А. Лазько. – Киев : Наукова думка, 1982. – 296 с.
11. Пелех Б. Л. Контактные задачи теории упругих анизотропных оболочек / Б. Л. Пелех, М. А. Сухорольский. – Киев : Наукова думка, 1980. – 216 с.

12. Шевченко В. П. Задачи термоупругости тонких оболочек с разрезами : учебное пособие / В. П. Шевченко, А. С. Гольцев. – Киев : УМК ВО, 1988. – 84 с.
13. Снеддон И. Преобразования Фурье / И. Снеддон. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1955. – 668 с.
14. Владимиров В. С. Уравнения математической физики / В. С. Владимиров. – Москва : Наука, 1967. – 436 с.
15. Бондаренко Н. С. Влияние теплообмена на возмущённое температурное поле в анизотропной пластине с теплоизолированным разрезом / Н. С. Бондаренко, А. С. Гольцев // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: Зб. наук. праць; Дніпропетр. нац ун-т ім. Олеся Гончара. – 2012. – Вип. 19. – С. 20–26.
16. Bondarenko N. S. Solution of the heat conduction problem for anisotropic plates under concentrated thermal loading using Legendre polynomials / N. S. Bondarenko, A. S. Gol'tsev // Journal of Mathematical Sciences. – 2011. – Vol. 174, No. 3. – P. 400–414.
17. Хижняк В. К. Смешанные задачи теории пластин и оболочек : учебное пособие / В. К. Хижняк, В. П. Шевченко. – Донецк : ДонГУ, 1980. – 128 с.
18. Партон В. З. Механика упругопластического разрушения / В. З. Партон, Е. М. Морозов. – Москва : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 504 с.
19. Коваленко А. Д. Основы термоупругости / А. Д. Коваленко. – Киев : Наукова думка, 1970. – 308 с.
20. Панасюк В. В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках / В. В. Панасюк, М. П. Саврук, А. П. Дацышин. – Киев : Наукова думка, 1976. – 444 с.

Поступила в редакцию 01.12.2025 г.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE CUT LENGTH ON THE INTENSITY FACTORS OF THERMAL STRESSES IN A TRANSVERSELY ISOTROPIC PLATE WITH ONE-SIDED HEAT EXCHANGE

N. S. Bondarenko, A. S. Goltsev

The thermoelasticity problem for a transversely isotropic plate with a heat-insulated cut was solved on the base of generalized theory in the $\{1,0\}$ -approximation version. The dependence of stress intensity factors on the cut length and shear compliance parameter was investigated. The case of upper one-sided heat exchange with the external environment and the action of the gradient of average temperature of the base temperature field on the line of cut was assumed.

Keywords: $\{1,0\}$ -approximation; transversely isotropic plate; heat-insulated cut; stress intensity factors; upper one-sided heat exchange; shear compliance parameter.

Бондаренко Наталья Сергеевна

кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры прикладной механики и
компьютерных технологий, старший научный
сотрудник ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: n.bondarenko123@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5254-5545
AuthorID: 1223868

Bondarenko Natalya Sergeevna

Candidate of Phisico-Mathematical Sciences, Docent,
Associate Professor of the Chair of Applied
Mechanics and Computer Technologies,
Senior Researcher,
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

Гольцев Аркадий Сергеевич

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой прикладной механики и
компьютерных технологий, ведущий научный
сотрудник ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, РФ.
E-mail: asgoltsev@mail.ru
ORCID: 0009-0007-7340-6270
AuthorID: 1130355

Goltsev Arkady Sergeevich

Doctor of Phisico-Mathematical Sciences, Professor,
Head of the Chair of Applied Mechanics and
Computer Technologies,
Leading Research Fellow,
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ДЕЙСТВИИ ЛИНЕЙНОГО ПОТОКА ТЕПЛА В СПЛОШНОЙ ПЛАСТИНКЕ ИЗ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

© 2025. *Е. С. Глушанков*

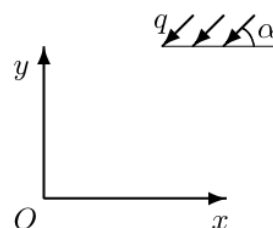
Предоставлено решение задачи определения термоэлектродупругого состояния бесконечной сплошной пластинки из пьезоэлектрического материала под действием линейного потока тепла, в котором учитывается фактор порождения потенциального электрического поля вследствие пьезоэлектрического эффекта. Выражения для компонентов электрического поля получены как в виде функций двух действительных переменных, так и функций комплексной переменной.

Ключевые слова: линейный поток тепла, термоэлектродупругое состояние, потенциальное электрическое поле, пьезоэлектрический эффект.

Введение. В современных отраслях науки, техники и промышленности в качестве элементов различных конструкций широкое применение находят тонкие пластинки из пьезоматериалов. При действии внешних температурных, силовых, электромагнитных полей в этих пластинках могут возникать значительные концентрации напряжений. Это следует учитывать на этапах проектирования и эксплуатации конструкций. В настоящее время известны решения множества задач определения напряженного состояния пластинок при действии различных физических полей [1–7], в т.ч. различных температурных [8–11]. В работах [8, 9] впервые поднят вопрос потенциальности электрического и магнитного полей, порождаемых при действии линейного потока тепла, а в работе [12] получено условие, накладываемое на угол действия потока тепла, при котором линейный поток тепла порождает электромагнитное поле с нулевыми индукциями. При этом, в работе [13] авторы указывают на порождение потенциального электрического поля с ненулевой индукцией при произвольном угле действия потока тепла в квадратной пластинке из пьезоэлектрического материала, а в работе [14] отмечают связь между направлением поляризации материала пластинки и направлением действия потока тепла, причем, не приводя выражений для компонентов электрического поля. В работе [15] получено решение задачи определения термоэлектродупругого состояния бесконечной сплошной пластинки из пьезоматериала при действии линейного потока тепла.

В данной работе решена задача определения значений основных характеристик термоэлектродупругого состояния, возникающего в бесконечной сплошной пластинке при действии произвольно направленного линейного потока тепла для случаев, когда материал обладает пьезоэлектрическим эффектом (при отсутствии пьезомагнитного). Решение поставленной задачи построено с предположением, что в отсутствие внешних электрических воздействий в пластинке может возникать потенциальное электрическое поле с ненулевой индукцией вследствие проявления пьезоэлектрического эффекта.

1. Постановка задачи. Рассмотрим бесконечную сплошную пластинку, изготовленную из пьезоэлектрического материала, отнесенную к декартовой системе координат Oxy (рисунок). В пластинке действует линейный поток тепла плотности q под углом α (рисунок). Механические и электрические воздействия на бесконечности отсутствуют.



Решение задачи определения термоэлектроупругого состояния пластинки сводится к последовательному решению двух задач: сперва – задачи теплопроводности, затем – задачи термоэлектроупругости.

Решение задачи теплопроводности, т.е. определения функции относительной температуры T , сводится к интегрированию уравнения теплопроводности [16]

$$k_{11} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 2k_{12} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y} + k_{22} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0, \quad (1.1)$$

где k_{ij} – коэффициенты теплопроводности материала пластинки. После определения температуры T становится возможным определять плотности потока тепла q_x , q_y в направлениях осей координат по формулам

$$q_x = -\left(k_{11} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{12} \frac{\partial T}{\partial y}\right), \quad q_y = -\left(k_{12} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{22} \frac{\partial T}{\partial y}\right), \quad (1.2)$$

а также плотности потока тепла q_n по направлению нормали n по формуле

$$q_n = -\left((k_{11} \cos(nx) + k_{12} \cos(ny)) \frac{\partial T}{\partial x} + (k_{12} \cos(nx) + k_{22} \cos(ny)) \frac{\partial T}{\partial y}\right). \quad (1.3)$$

Решением уравнения теплопроводности (1.1) при заданных условиях на бесконечности является функция [12, 15]

$$T^*(x, y) = q(t_x x + t_y y), \quad (1.4)$$

в которой

$$t_x = \frac{k_{22} \cos \alpha - k_{12} \sin \alpha}{\kappa^2}, \quad t_y = \frac{k_{11} \sin \alpha - k_{12} \cos \alpha}{\kappa^2},$$

где $\kappa^2 = k_{11}k_{22} - k_{12}^2$. В формуле (1.4) и далее знак «*» в верхнем индексе относится к компонентам решения поставленной задачи для бесконечной пластинки.

Решение задачи термоэлектроупругости сводится к определению основных характеристик термоэлектроупругого состояния (напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} , деформаций ε_x , ε_y , γ_{xy} , индукций электрического поля D_x , D_y , напряженностей электрического поля E_x , E_y , перемещений u , v , потенциала электрического поля φ) через интегрирование системы уравнений, состоящей из:

– уравнений равновесия

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0; \quad (1.5)$$

– уравнений вынужденной электростатики

$$\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = 0; \quad (1.6)$$

– уравнений электроупругого состояния

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= s_{11}\sigma_x + s_{12}\sigma_y + s_{16}\tau_{xy} + g_{11}D_x + g_{21}D_y + \alpha_1 T, \\ \varepsilon_y &= s_{12}\sigma_x + s_{22}\sigma_y + s_{26}\tau_{xy} + g_{12}D_x + g_{22}D_y + \alpha_2 T, \\ \tau_{xy} &= s_{16}\sigma_x + s_{26}\sigma_y + s_{66}\tau_{xy} + g_{16}D_x + g_{26}D_y + \alpha_6 T, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_x &= -g_{11}\sigma_x - g_{12}\sigma_y - g_{16}\tau_{xy} + \beta_{11}D_x + \beta_{12}D_y + t_1T, \\ E_y &= -g_{21}\sigma_x - g_{22}\sigma_y - g_{26}\tau_{xy} + \beta_{21}D_x + \beta_{22}D_y + t_2T; \end{aligned} \quad (1.7)$$

– соотношений Коши для малых деформаций

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \quad (1.8)$$

– соотношений потенциальности электрического поля

$$E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}. \quad (1.9)$$

Здесь s_{ij} – коэффициенты деформации материала; g_{ij} – пьезоэлектрические модули материала; β_{ij} – коэффициенты диэлектрической проницаемости материала; α_i – коэффициенты линейного теплового расширения материала; t_i – пьезоэлектрические модули материала.

Кроме того, должно выполняться условие совместности Сен-Венана

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = 0. \quad (1.10)$$

2. Решение задачи. Для решения задачи воспользуемся идеями, представленными в работе [15]. Так, из (1.4) видно, что изотермы в пластинке являются прямыми линиями с уравнениями вида $t_x x + t_y y = \text{const}$. И т.к. пластинка является бесконечной, то термоэлектростатическое состояние в пластинке можно считать периодическим, при котором значения напряжений, индукций и напряженностей электрического поля, входящих в уравнения состояния (1.7) наравне с температурой, должны быть одинаковыми вдоль изотерм.

Будем полагать, что напряжения в пластинке не возникают, как и в случае пластинки, не обладающей пьезоэффектом [17], однако вследствие пьезоэлектрического эффекта индуцируется электрическое поле с вышеописанным характером периодичности. При этом, как и температура T^* , деформации и компоненты электрического поля также должны быть линейными функциями координат. Тогда получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_x^* &= q s_x (t_x x + t_y y), \quad \varepsilon_y^* = q s_y (t_x x + t_y y), \quad \gamma_{xy}^* = q s_{xy} (t_x x + t_y y) \\ D_x^* &= q d_x (t_x x + t_y y), \quad D_y^* = q d_y (t_x x + t_y y), \\ E_x^* &= q e_x (t_x x + t_y y), \quad E_y^* = q e_y (t_x x + t_y y), \end{aligned} \quad (2.1)$$

где d_x, d_y, e_x, e_y – неизвестные постоянные.

При этом, условие Сен-Венана (1.10) удовлетворяется тождественно, а после подстановки (2.1) в уравнения состояния (1.7) получим

$$\begin{aligned} s_x &= g_{11}d_x + g_{21}d_y + \alpha_1, \\ s_y &= g_{12}d_x + g_{22}d_y + \alpha_2, \\ s_{xy} &= g_{16}d_x + g_{26}d_y + \alpha_6, \\ e_x &= q(\beta_{11}d_x + \beta_{12}d_y + t_1), \\ e_y &= q(\beta_{12}d_x + \beta_{22}d_y + t_2), \end{aligned}$$

а также

$$\begin{aligned}\varepsilon_x^* &= q(g_{11}d_x + g_{21}d_y + \alpha_1)(t_x x + t_y y), \\ \varepsilon_y^* &= q(g_{12}d_x + g_{22}d_y + \alpha_2)(t_x x + t_y y), \\ \gamma_{xy}^* &= q(g_{16}d_x + g_{26}d_y + \alpha_6)(t_x x + t_y y), \\ E_x^* &= q(\beta_{11}d_x + \beta_{12}d_y + t_1)(t_x x + t_y y), \\ E_y^* &= q(\beta_{12}d_x + \beta_{22}d_y + t_2)(t_x x + t_y y).\end{aligned}\quad (2.2)$$

Тогда после подстановки 3-го, 4-го соотношений (2.1) и 4-го, 5-го соотношений (2.2) в уравнения вынужденной электростатики (1.6) получим систему линейных уравнений относительно неизвестных d_x, d_y :

$$\begin{aligned}t_x d_x + t_y d_y &= 0, \\ (\beta_{12}t_x - \beta_{11}t_y)d_x + (\beta_{22}t_x - \beta_{12}t_y)d_y &= t_1 t_y - t_2 t_x.\end{aligned}\quad (2.3)$$

После решения этой системы постоянные d_x, d_y , а следовательно, и e_x, e_y становятся известными, и становится возможным определять значения деформаций, индукций и напряженностей электрического поля в любой точке бесконечной сплошной пластинки по формулам (2.1).

Нетрудно показать, что перемещения и потенциал электрического поля могут быть определены по формулам [15]

$$\begin{aligned}u^* &= q\left(\frac{s_x t_x}{2}x^2 + s_x t_y xy + \frac{s_{xy} t_x - s_y t_x}{2}y^2\right) - \omega_3 y + u_0, \\ v^* &= q\left(\frac{s_{xy} t_x - s_x t_y}{2}x^2 + s_y t_x xy + \frac{s_y t_y}{2}y^2\right) + \omega_3 x + v_0, \\ \varphi^* &= -q\left(\frac{e_x t_x}{2}x^2 + e_x t_y xy + \frac{e_y t_y}{2}y^2\right) + \varphi_0,\end{aligned}$$

где $-\omega_3 y + u_0, \omega_3 x + v_0$ – перемещения пластинки как целого, не порождающие напряженного состояния; φ_0 – нулевой уровень потенциала.

3. Использование построенного решения в задаче о действии линейного потока тепла в многосвязной пластинке. Полученное решение можно использовать для решения задачи определения термоэлектроупругого состояния бесконечных многосвязных пластинок с отверстиями, трещинами и включениями методом суперпозиции. Тогда значения основных характеристик температурного поля и термоэлектроупругого состояния в точках пластинки могут быть вычислены по формулам [8, 9, 15]

$$T = T^* + 2\operatorname{Re} F_4(z_4), \quad (3.1)$$

$$(q_x, q_y) = (q_x^*, q_y^*) + 2\operatorname{Re} i\kappa(\mu_4, -1)F_4'(z_4), \quad (3.2)$$

$$(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}) = 2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (\mu_k^2, 1, -\mu_k)\Phi_k'(z_k); \quad (3.3)$$

$$(D_x, D_y) = (D_x^*, D_y^*) + 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (v_k \mu_k, -v_k) \Phi'_k(z_k); \quad (3.4)$$

$$(E_x, E_y) = (E_x^*, E_y^*) - 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (r_k^0, \mu_k r_k^0) \Phi'_k(z_k); \quad (3.5)$$

$$(u, v, \varphi) = (u^*, v^*, \varphi^*) + 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (p_k, q_k, r_k^0) \Phi_k(z_k); \quad (3.6)$$

Здесь $F_4(z_4)$, $\Phi_k(z_k)$ – комплексные потенциалы теплопроводности и термоэлектроупругости, определяемые из граничных условий соответствующих задач на контурах пластинки [8, 9]. Комплексные потенциалы являются функциями обобщенных комплексных переменных вида

$$z_k = x + \mu_k y \quad (k = \overline{1, 4});$$

μ_4 – корень характеристического уравнения задачи теплопроводности

$$k_{22}\mu^2 + 2k_{12}\mu + k_{11} = 0;$$

$\mu_k \quad (k = \overline{1, 3})$ – корни характеристического уравнения задачи термоэлектроупругости

$$l_6(\mu) = 0,$$

где

$$l_6(\mu) = l_{4s}(\mu)l_{2\beta}(\mu) - l_{3g}^2(\mu);$$

$$l_{4s}(\mu) = s_{11}\mu^4 + 2s_{16}\mu^3 + (2s_{12} + s_{66})\mu^2 + 2s_{26}\mu + s_{22},$$

$$l_{3g}(\mu) = g_{11}\mu^3 - (g_{21} + g_{16})\mu^2 + (g_{12} + g_{26})\mu + g_{22},$$

$$l_{2\beta}(\mu) = -\beta_{11}\mu^2 + 2\beta_{12}\mu - \beta_{22};$$

$$v_k = \frac{l_{3g}(\mu_k)}{l_{2\beta}(\mu_k)} \quad (k = \overline{1, 3}), \quad v_4 = \frac{r_\chi}{r_4};$$

$$r_4 = \frac{l_4(\mu_4)}{l_6(\mu_4)}, \quad r_\chi = \frac{l_\chi(\mu_4)}{l_6(\mu_4)},$$

$$l_4(\mu_4) = l_{2\alpha}(\mu_4)l_{2\beta}(\mu_4) - l_{3g}(\mu_4)l_{1t}(\mu_4),$$

$$l_\chi(\mu_4) = l_{4s}(\mu_4)l_{1t}(\mu_4) - l_{3g}(\mu_4)l_{2\alpha}(\mu_4);$$

$$l_{2\alpha}(\mu_4) = -\alpha_1\mu_4^2 + \alpha_6\mu_4 - \alpha_2, \quad l_{1t}(\mu_4) = t_1\mu_4 - t_2;$$

$$p_k = s_{11}\mu_k^2 - s_{16}\mu_k + s_{12} - (g_{11}\mu_k - g_{12})v_k + \frac{\delta_{k4}\alpha_1}{r_4},$$

$$q_k = s_{12}\mu_k - s_{26} + \frac{s_{22}}{\mu_k} - \left(g_{21} - \frac{g_{22}}{\mu_k} \right) v_k + \frac{\delta_{k4}\alpha_2}{r_4\mu_4},$$

$$r_k^0 = g_{11}\mu_k^2 - g_{16}\mu_k + g_{12} - (\beta_{11}\mu_k - \beta_{12})v_k + \frac{\delta_{k4}t_1}{r_4},$$

δ_{ij} – дельта-символ Кронекера;

$$\Phi_4(z_4) = r_4 \int F_4(z_4) dz_4.$$

4. Решение задачи для бесконечной сплошной пластинки с помощью функций комплексной переменной. Поставленную задачу для бесконечной пластинки можно решить также с использованием функций комплексной переменной. Тогда получаемые комплексные потенциалы $F_4^*(z_4)$, $\Phi_k^*(z_k)$ могут быть добавлены как слагаемые в «классические» комплексные потенциалы $F_4(z_4)$, $\Phi_k(z_k)$, а для определения значений основных характеристик температурного поля и термоэлектродупругого состояния могут быть использованы формулы (3.1)–(3.6) без слагаемых с верхним индексом «*».

Функция $F_4^*(z_4)$ будет иметь вид [15]

$$F_4^*(z_4) = \gamma_4 z_4, \quad (4.1)$$

где

$$\gamma_4 = q \frac{\bar{\mu}_4 t_x - t_y}{\bar{\mu}_4 - \mu_4}.$$

Определим теперь функции $\Phi_k^*(z_k)$. Так,

$$\Phi_4^*(z_4) = r_4 \int F_4^*(z_4) dz_4 = \frac{r_4 \gamma_4}{2} z_4^2 = \Lambda_4 z_4^2,$$

где $\Lambda_4 = r_4 \gamma_4 / 2$. Тогда функции $\Phi_k^*(z_k)$ ($k = \overline{1, 3}$) будем искать в виде [15]

$$\Phi_k^*(z_k) = \Lambda_k z_k^2, \quad (4.2)$$

а для производных этих функций будут справедливы выражения

$$\Phi_k^{*'}(z_k) = 2\Lambda_k z_k.$$

Определять постоянные Λ_k будем на основе формул (3.1)–(3.6):

$$2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (\mu_k^2, 1, -\mu_k) \cdot 2\Lambda_k z_k = (0, 0, 0),$$

$$2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (\mu_k v_k, -v_k) \cdot 2\Lambda_k z_k = (D_x^*, D_y^*),$$

$$2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (r_k^0, \mu_k r_k^0) \cdot 2\Lambda_k z_k = -(E_x^*, E_y^*),$$

или

$$2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (\mu_k^2, 1, -\mu_k) \cdot 2\Lambda_k (x + \mu_k y) = (0, 0, 0), \quad (4.3)$$

$$2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (\mu_k v_k, -v_k) \cdot 2\Lambda_k (x + \mu_k y) = q(d_x, d_y)(t_x x + t_y y), \quad (4.4)$$

$$2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (r_k^0, \mu_k r_k^0) \cdot 2\Lambda_k (x + \mu_k y) = -q(e_x, e_y)(t_x x + t_y y). \quad (4.5)$$

Приравнивая коэффициенты при x и y , из формул (4.3) получаем

$$2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (\mu_k^2, 1, \mu_k, \mu_k^3) \cdot 2\Lambda_k = (0, 0, 0, 0), \quad (4.6)$$

а из формул (4.4) и (4.5), с учетом уравнений (2.3), –

$$2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (\mu_k v_k, -v_k, \mu_k^2 v_k) \cdot 2\Lambda_k = q(d_x t_x, d_y t_x, d_x t_y); \quad (4.7)$$

$$2\operatorname{Re} \sum_{k=1}^4 (r_k^0, \mu_k r_k^0, \mu_k^2 r_k^0) \cdot 2\Lambda_k = -q(e_x t_x, e_y t_x, e_y t_y). \quad (4.8)$$

Нетрудно показать, что если принять во внимание 2-е уравнение (4.7) и 1е уравнение (4.8), то с учетом (4.6) остальные уравнения (4.7) и (4.8) удовлетворяются тождественно. Таким образом, для определения постоянных Λ_k получаем систему уравнений

$$4\operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 (1, \mu_k, \mu_k^2, \mu_k^3, v_k, r_k^0) \Lambda_k = -q(0, 0, 0, 0, d_y t_x, e_x t_x) - 4\operatorname{Re} (1, \mu_4, \mu_4^2, \mu_4^3, v_4, r_4^0) \Lambda_4.$$

После решения этой системы постоянные Λ_k , а следовательно, и функции $\Phi_k^*(z_k)$ становятся известными, и тогда можно определять значения основных характеристик термоэлектродупругого состояния в любой точке бесконечной сплошной пластинки.

Исследования проводились в Донецком государственном университете в рамках государственного задания (№ госрегистрации 124012400354-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлинкур Д. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях / Д. Берлинкур, Д. Керран, Г. Жаффе // Физическая акустика. – М.: Мир, 1966. – Т. 1, ч. А. – С. 204–326.
2. Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц / Дж. Най. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 388 с.
3. Желудев И.С. Физика кристаллических диэлектриков / И.С. Желудев. – М.: Наука, 1968. – 463 с.
4. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982. – 621 с.
5. Партон В. З. Электромагнитоупругость пьезоэлектрических и электропроводных тел / В. З. Партон, Б. А. Кудрявцев. – М.: Наука, 1988. – 472 с.
6. Гринченко В.Т. Электроупругость / В.Т. Гринченко, А.Ф. Улитко, Н.А. Шульга. – К.: Наук. думка. – 1989. – 280 с. (Механика связанных полей в элементах конструкций: В 5 т., Т. 5).
7. Калоеров С.А. Двумерные задачи электро- и магнитоупругости для многосвязных сред / С.А. Калоеров, А.И. Баева, О.И. Бороненко. – Донецк: Юго-Восток, 2007. – 270 с.
8. Калоеров С.А. Термоэлектродупругое состояние многосвязной анизотропной пластинки / С.А. Калоеров, К.Г. Хорошев // Прикладная механика. – 2005. – Т. 41, № 11. – С. 116–126.
9. Калоеров С.А. Термоэлектродупругое состояние анизотропной пластинки с отверстиями и трещинами / С.А. Калоеров, К.Г. Хорошев // Теорет. и прикладная механика. – 2005. – Вып. 41. – С. 124–133.
10. Калоеров С.А. Плоская задача термоэлектромагнитоупругости для многосвязных сред / С.А. Калоеров, О.А. Сорочан // Прикладная механика. – 2009. – Т. 45., № 4. – С. 81–91.
11. Калоеров С.А. Действие линейного потока тепла в пьезопластинках с отверстиями и трещинами / С.А. Калоеров, Е.С. Глушанков // Вестн. Донец. нац. ун-та. Сер. А: Естеств. науки. – 2018. – № 1. – С. 15–26.
12. Калоеров С.А. Потенциальные электромагнитные поля в пьезопластиках при механических, электромагнитных и тепловых воздействиях / С.А. Калоеров // Вестн. Донец. нац. ун-та. Сер. А: Естеств. науки. – 2016. – № 4. – С. 19–34.
13. Pasternak I. A comprehensive study on the 2D boundary element method for anisotropic thermoelectroelastic solids with cracks and thin inhomogeneities / I. Pasternak, R. Pasternak, H. Sulym // Eng. Anal. Bound. Elem. – 2013. – Vol. 37. – P. 419–433.
14. Pasternak I. Temperature field and heat flux that do not induce stress and electric displacement in a free thermoelectroelastic anisotropic solid / I. Pasternak, R. Pasternak, H. Sulym // Mech. Res. Commun. – 2014. – Vol. 57. – P. 40–43.

15. Глушанков Е.С. Новое решение задачи о действии линейного потока тепла в сплошной пластинке из пьезоматериала / Е.С. Глушанков // Вестн. Донец. нац. ун-та. Сер. А: Естеств. науки. – 2025. – № 3. – С. 56–66.
16. Космодамианский А.С. Температурные напряжения в многосвязных пластинках / А.С. Космодамианский, С.А. Калоев. – К., Донецк: Вища шк., 1983. – 160 с.
17. Мелан Э. Температурные напряжения, вызываемые стационарными температурными полями / Э. Мелан, Г. Паркус. – М.: Физматгиз, 1958. – 167 с.

Поступила в редакцию 06.11.2025 г.

SOLUTION OF THE PROBLEM OF THE LINEAR HEAT FLUX ACTING IN THE CONTINUOUS PLATE MADE OF PIEZOELECTRIC MATERIAL

E. S. Glushankov

A solution is presented for the problem of determination of thermo-electro-elastic state of infinite continuous plate under linear heat flux action, with taking into account of the factor of generation of conservative electric field, owing to pyroelectric effect. The expressions for the components of electric field are obtained as the functions of two real variables and the functions of complex variable.

Keywords: linear heat flux, thermo-electro-elastic state, conservative electric field, pyroelectric effects.

Глушанков Евгений Сергеевич

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры теории упругости и
вычислительной математики имени академика
А.С. Космодамианского, старший научный
сотрудник, Донецкий государственный университет,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: evgenij.glushankov@gmail.com

Glushankov Evgenij Sergeevich

Cand. Sci., Phys.-Math.
Associate Professor at the Department of Elasticity
Theory and Computational Mathematics named after
academician A.S. Kosmodamiansiy,
Senior Researcher, Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОУПРУГОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТЕРЖНЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ С ВНУТРЕННИМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПЕРВОГО РОДА

© 2025. А. И. Канарейкин

Работа посвящена вопросам термоупругости цилиндра эллиптического сечения при граничных условиях первого рода. При этом внутри цилиндра действует одинаковый по величине источник теплоты. В ней рассматривается вопрос о распределении температурного поля стержня эллиптического сечения при заданных граничных условиях. Основным методом является метод подстановки. Полученное выражение температурного поля цилиндра имеет аналитический вид, содержащий гиперболический синус. Что позволяет судить о характере распределения температуры по сечению стержня. Сама задача термоупругости решается на основе определения функции напряжений. Также на основе метода дифференцирования был исследован уровень возникающих термонапряжений. Полученный результат может быть использован в инженерных расчётах теплообменных аппаратов.

Ключевые слова: теплообмен; эллипс; термонапряжённость; граничные условия первого рода; уравнение Пуассона; гиперболические функции.

Введение. Цилиндрические оболочки повсеместно используются в автомобильной, аэрокосмической и ветроэнергетической отраслях. В тоже время, в связи с отсутствием универсальной нормативной базы для проектирования шаровых оболочек, расширением специфики их конструктивных решений и увеличением объемов использования значительно возросла актуальность проблемы безопасности и надежности таких структур. Цилиндрические оболочки могут подвергаться широкому спектру нагрузок, как статических, так и динамических [1–4].

Актуальность данной статьи заключается в том, что цилиндрические оболочки используются в многочисленных аэрокосмических, морских, инженерных и энергетических конструкциях. Их способность выдерживать высокие уровни осевого сжатия является полезной во многих случаях, когда большая часть конструкции нагружена в мембранном состоянии, а ее эффективность обусловлена отсутствием сквозных градиентов напряжений по толщине. Цилиндрические оболочки являются одним из наиболее широко используемых конструктивных элементов, встречающихся в теплотехнике, механике и ядерной энергетике [5–11].

Целью данной работы является определение термоупругого состояния поверхности цилиндра эллиптической формы с внутренним источником тепла при граничных условиях первого рода. Задачами исследования был анализ методов решения уравнения Пуассона в эллиптической системе координат [12–16].

Постановка задачи. В решении, в качестве элемента конструкции рассматривается цилиндр бесконечной длины, сечение которого представляет собой эллипс с полуосями a и b (рис. 1). Внутри которого действует источник теплоты с удельной мощностью q_v .

Задача об определении двумерного стационарного температурного поля по сечению трубы сводится к решению краевой задачи для уравнения Пуассона

$$\Delta T + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала цилиндра.

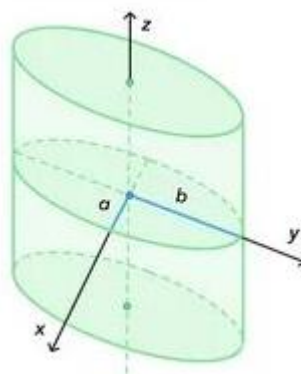


Рис. 1. Цилиндрический стержень эллиптического сечения

При этом будем учитывать граничное условие первого рода, которое определяется температурой поверхности цилиндра T_c , которая является постоянной величиной

$$T = T_c. \quad (2)$$

Построение решения задачи. Для упрощения расчётов запишем уравнение Пуассона (1) в эллиптической системе координат (μ, ν)

$$\frac{1}{c^2(\operatorname{sh}^2 \mu + \sin^2 \nu)} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \mu^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \nu^2} \right) = -\frac{q_v}{\lambda},$$

или

$$\frac{1}{c^2(\operatorname{ch}^2 \mu - \cos^2 \nu)} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \mu^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \nu^2} \right) = -\frac{q_v}{\lambda}, \quad (3)$$

где $0 \leq \mu \leq \infty$, $0 \leq \nu \leq 2\pi$,

$$c = \sqrt{a^2 - b^2},$$

а и b – полуоси эллипса.

В этом случае граничное условие (2) примет вид

$$T|_{\mu=\mu_0} = T_c, \quad (4)$$

где $\mu = \mu_0$ – уравнение поверхности стержня. Далее воспользуемся следующей подстановкой

$$T(\mu, \nu) = U(\mu, \nu) - \frac{q_v c^2}{4\lambda} (\operatorname{sh}^2 \mu + \cos^2 \nu),$$

которая преобразует уравнение Пуассона (3) в уравнение Лапласа

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \mu^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial \nu^2} = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) будем находить в виде ряда

$$U(\mu, \nu) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_n \operatorname{ch} n \mu \cos n \nu + B_n \operatorname{sh} n \mu \sin n \nu).$$

Из соображений симметрии следует положить $B_n = 0$, тогда

$$U(\mu, \nu) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \operatorname{ch} n \mu \cos n \nu.$$

Далее воспользуемся граничным условием (4)

$$T_c = U(\mu_0, \nu) - \frac{q_v c^2}{4\lambda} (\operatorname{sh}^2 \mu_0 + \cos^2 \nu),$$

откуда

$$U(\mu_0, \nu) = T_c + \frac{q_v c^2}{4\lambda} (\operatorname{sh}^2 \mu_0 + \cos^2 \nu).$$

Окончательно искомое распределение температуры описывается уравнением

$$T = T_c + \frac{q_v c^2}{4\lambda} (\operatorname{sh}^2 \mu_0 - \operatorname{sh}^2 \mu). \quad (6)$$

Как видим, температурное поле стержня меняется по закону квадрата гиперболического синуса.

Определение термонапряжений сводится к решению плоской задачи термоупругости. Функция напряжений F находится из решения бигармонического уравнения

$$\Delta \Delta F = \frac{\alpha E q_v}{\lambda(1-\nu)}, \quad (7)$$

при условиях на внешнем контуре

$$F = \frac{\partial F}{\partial n} = 0, \quad (8)$$

где α – коэффициент линейного расширения, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Эти условия (8) означают неподвижность сечения и отсутствие нормальных напряжений на внешней границе. Решение уравнения (7) ищем в виде

$$F = A \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1 \right), \quad (9)$$

где A – постоянная. После подстановки (9) в (7) найдём функцию напряжений

$$F = \frac{\alpha E q_v}{\lambda(1-\nu) \left(3 \frac{a^4 + b^4}{a^2 b^2} + 2 \right)} \frac{a^2 b^2}{8} \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1 \right)^2.$$

Для свободных торцевых сечений термонапряжения определяются следующим образом

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = \frac{4A}{b^2} \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{3y^2}{b^2} - 1 \right), \\ \sigma_{yy} &= \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \frac{4A}{a^2} \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{3y^2}{b^2} - 1 \right), \end{aligned}$$

где

$$A = \frac{\alpha E q_v}{\lambda(1-\nu) \left(3 \frac{a^4 + b^4}{a^2 b^2} + 2 \right)} \frac{a^2 b^2}{8}.$$

Анализ полученного решения. Сравним полученный результат с литературными данными. Преобразуем температурного поля трубы эллиптического сечения к случаю цилиндрического стержня ($a=b=r$, $a_0=b_0=r_0$, $c^2 \operatorname{sh}^2 \mu_0 = r_0^2$, $c^2 \operatorname{sh}^2 \mu = r^2$), тогда

$$T = T_c + \frac{q_v}{4\lambda} (r_0^2 - r^2),$$

или

$$T = T_c + \frac{q_v r_0^2}{4\lambda} \left(1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right). \quad (10)$$

Получим выражение (10) для температурного поля однородного цилиндрического стержня при граничных условиях первого рода [17].

Также проведем сравнительный анализ соответствующих компонент тензора термонапряжений для кругового или эллиптического сечений. В круговом цилиндре ($a=b=R$) компоненты тензора напряжений имеют вид

$$\sigma_{xx} = \frac{\alpha E q_v}{64\lambda(1-\nu)} \left(\frac{x^2 + 3y^2}{R^2} - 1 \right),$$

$$\sigma_{yy} = \frac{\alpha E q_v}{64\lambda(1-\nu)} \left(\frac{3x^2 + y^2}{R^2} - 1 \right).$$

Для дальнейшего анализа рассмотрим поведение одного из компонентов тензора. Отношение рассматриваемых термонапряжений равно

$$\frac{\sigma_{xx}^{ell}}{\sigma_{xx}^{cir}} = \frac{8 \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{3y^2}{b^2} - 1 \right)}{\left[3 \left(\frac{b}{a} \right)^3 + 2 \left(\frac{b}{a} \right) + 3 \left(\frac{a}{b} \right) \right] \left(\frac{x^2 + 3y^2}{R^2} - 1 \right)}.$$

где σ_{xx}^{ell} – термонапряжения в цилиндрическом теле, σ_{xx}^{cir} – термонапряжения в цилиндрическом теле.

Проведём исследование поведения при достижении максимального значения тензоров ($x = 0$)

$$\frac{\sigma_{xx}^{ell}}{\sigma_{xx}^{cir}} = \frac{8}{3 \left(\frac{b}{a} \right)^3 + 2 \left(\frac{b}{a} \right) + 3 \left(\frac{a}{b} \right)}$$

Умножив числитель и знаменатель на отношение b/a и приняв $b/a = t$, получим функцию, зависящую от параметра t

$$f(t) = \frac{8t}{3t^4 + 2t^2 + 3}$$

Исследуем данную функцию на экстремум с помощью производной

$$f'(t) = \frac{-9t^4 - 2t^2 + 3}{(3t^4 + 2t^2 + 3)^2},$$

откуда $t = 0,69$. Отсюда следует, что отношение рассматриваемых термонапряжений принимает максимальное значение при следующем соотношении полуосей эллипса $b = 0,69a$.

Выводы

1. В приведённой работе на основе метода подстановки было получено аналитическое выражение распределения температурного поля цилиндра

эллиптической формы с внутренним источником тепла при граничных условиях первого рода.

2. Сама задачи термоупругости была решена на основе определения функции напряжений. Что позволило определить максимальный уровень возникающих напряжений.

3. За счёт изменения длины полуосей эллипса удаётся моделировать термонапряжения в стержнях с разными поперечными сечениями.

4. Полученный результат может быть использован в инженерных расчётах теплообменных аппаратов, содержащих теплообменные трубки эллиптического сечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nasikas A., Karamanos S., Papanicopolulos S. Non-Associative Plasticity for Structural Instability of Cylindrical Shells in the Inelastic Range. – University of Edinburgh, 2022. – 59 p.
2. Fajuyitan O.K., Sadowski A., Wade A. Length Effects in Elastic Imperfect Cylindrical Shells under Uniform Bending. – University of London, 2018. – 98 p.
3. Локтева Н.А. Нестационарное деформирование анизотропной круговой цилиндрической оболочки // Труды МАИ. – 2021. – № 120. – С. 139–145.
4. Fage A., Warsap J. H. The Effects of Turbulence and Surface Roughness on the Drag of Circular Cylinders // Aeronautical Research Council. – 1930. – No 1283. – P. 36–47.
5. Гейтвуд Б.Е. Температурные напряжения применительно к самолетам, снарядам, турбинам и ядерным реакторам / Пер. с англ. М.Ф. Диментберга [и др.]; Под ред. [и предисл.] проф. д-ра техн. наук Н.И. Пригоровского. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1959. – 349 с.
6. Kanareykin A. I. Mathematical modeling of the fuel element of a nuclear reactor taking into account the temperature dependence of the thermal conductivity of the fuel element made of uranium oxide // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 4. Сер. "IV International Scientific and Practical Conference "Actual Problems of the Energy Complex: Physical Processes, Mining, Production, Transmission, Processing and Environmental Protection". – 2022. – P. 012012. – DOI: [10.1088/1755-1315/990/1/012012](https://doi.org/10.1088/1755-1315/990/1/012012)
7. Kanareykin A. Modeling of the temperature field and thermal stresses of a fuel element with variable volumetric heat release // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 592. – P. 03009. – DOI: [10.1051/E3SCONF/202459203009](https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202459203009)
8. Kanareykin A. Heat exchange between the heating element and its shell under the boundary condition of the fourth kind // E3S Web of Conferences. International Scientific Siberian Transport Forum - TransSiberia 2023.– 2023. – P. 07039. – DOI: [10.17586/1606-4313-2023-22-3-68-73](https://doi.org/10.17586/1606-4313-2023-22-3-68-73)
9. Kanareykin A. Heat exchange in fuel rods at different cross sections // E3S Web of Conferences. XI International Scientific and Practical Conference Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITSE-2023). EDP Sciences, 2023. – P. 02021. – DOI: [10.1051/e3sconf/202343102021](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343102021)
10. Железнов Л.П., Серьёзов А.Н. Нелинейное деформирование и устойчивость подкрепленной композитной цилиндрической оболочки при осевом сжатии // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2022. – № 2. – С. 40–48.
11. Петров И.И. Фундаментальные решения для ортотропной цилиндрической оболочки // Труды МАИ. – 2022. – № 124. – С. 23–29.
12. Канарейкин А.И. Уравнение Лапласа в теплофизике // Наукосфера. – 2023. – № 12-2. – С. 241–245.
13. Захаров В. А. Верификация методики численного исследования процесса теплообмена в кольцевых каналах теплообменного аппарата // Машиностроение и машиноведение. – 2020. – № 1 (70). – С. 14–16.
14. Канарейкин А.И. О частном решении дифференциального уравнения в частных производных без перехода к эллиптической системе координат // Научные труды Калужского государственного университета имени К.Э. Циолковского. Региональная университетская научно-практическая конференция. Сер. "Естественные науки". Калужский государственный университет имени К.Э. Циолковского. – 2015. – С. 140–141.
15. Несис Е.И. Методы математической физики. – М.: Просвещение. 1977. – 199 с.
16. Канарейкин А.И. Распределение температурного поля в твэле с эллиптическим поперечным сечением // Научные труды Калужского государственного университета им. К.Э. Циолковского, серия: естественные науки. – 2016. – С. 230–231.

17. Канарейкин А.И. Распределение температуры в теле эллиптического сечения с внутренним источником тепла при граничных условиях первого рода // Вестник Калужского университета. – 2020. – № 2 (47). – С. 74–76.

Поступила в редакцию 09.10.2025 г.

DETERMINATION OF THE THERMOELASTIC STATE OF THE SURFACE OF AN ELLIPTICAL ROD WITH AN INTERNAL HEAT SOURCE UNDER BOUNDARY CONDITIONS OF THE FIRST KIND

A. I. Kanareykin

The paper is devoted to the issues of thermoelasticity of an elliptical cylinder under boundary conditions of the first kind. At the same time, a heat source of the same magnitude acts inside the cylinder. It deals with the distribution of the temperature field of a rod of elliptical cross-section under specified boundary conditions. The main method is the substitution method. The resulting expression of the temperature field of the cylinder has an analytical form containing a hyperbolic sine. This allows us to judge the nature of the temperature distribution over the cross-section of the rod. The thermoelasticity problem itself is solved by determining the stress function. The level of thermal stresses that occur was also investigated based on the differentiation method. The result obtained can be used in engineering calculations of heat exchangers.

Keywords: heat transfer; ellipse; thermal stress; boundary conditions of the first kind; Poisson equation; hyperbolic functions.

Канарейкин Александр Иванович

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры высшей математики и физики,
Российский государственный геологоразведочный
университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ),
г. Москва, РФ.

E-mail: kanareykins@mail.ru

Kanareykin Aleksandr Ivanovich

candidate of technical sciences, docent,
associate professor of the department of higher
mathematics and physics,
Russian State Geological University named after Sergo
Ordzhonikidze (MGRI), Moscow, RF.

ОДНОРОДНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО ТЕРМОУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНЫХ ПЛИТ С ДВУХФАКТОРНОЙ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ

© 2025. *В. И. Сторожев, С. В. Сторожев, М. В. Фоменко*

Представлено решение задачи построения системы базисных однородных решений для модели связанного пространственного термоупругого стационарного динамического деформирования функционально-градиентных трансверсально-изотропных плит пространственной геометрии из материалов с двухфакторной экспоненциальной неоднородностью физико-механических характеристик по толщине при задании одного значения показателя неоднородности для параметра плотности материала плиты, и второго значения – для всех остальных ее физико-механических характеристик. Аналитические представления однородных решений получены на базе совместного применения полуобратного метода и итерационного алгоритма интегрирования амплитудных уравнений спектральных задач относительно функций координаты по толщине плиты.

Ключевые слова: плиты пространственной геометрии, функционально-градиентные трансверсально-изотропные материалы, двухфакторная экспоненциальная поперечная неоднородность, связанное термомеханическое деформирование, стационарные волновые процессы, базисные однородные решения, полуобратный метод, аналитические представления.

Введение и цели исследования. Модели пространственного деформирования конструкционных элементов в виде упругих плит произвольной толщины с усложненными геометрическими и физико-механическими свойствами относятся к актуальным объектам исследований, связанных с проектированием деталей строительных сооружений, машин, приборов и радиотехнических устройств, а также с вопросами верификации результатов расчетного анализа конструкционных элементов данного типа, осуществляемого с применением прямых численных и конечно-элементных подходов. Одним из весьма эффективных инструментов этих исследований является разработка и применение численно-аналитического метода однородных решений, концепция которого заключается в построении базисных функциональных систем, элементы которых являются точными решениями дифференциальных уравнений модели волнового деформирования материалов плит, точно удовлетворяют граничным условиям на их плоских гранях и в совокупности обладают достаточным функциональным произволом для удовлетворения функциональным краевым условиям на боковых граничных поверхностях с использованием представлений характеристик напряженно-деформированного состояния в рядах по базисным элементарным однородным решениям с неопределенными коэффициентами. Ретроспективу и актуальную характеристику выполненных исследований в области развития метода однородных решений содержат публикации [1–3], на основе обобщения которых может быть поставлена задача дальнейшей разработки основ данного метода применительно к изготавливаемым на базе применения аддитивных технологий 3D печати плитам из инновационных непрерывно-неоднородных функционально-градиентных анизотропных материалов, получающих все более широкое и эффективное применение во многих современных научно-технических отраслях [4–10]. В этой связи, целью настоящей работы является построение базисных систем элементарных однородных решений для

модели пространственного стационарного динамического термоупругого деформирования функционально-градиентных трансверсально-изотропных плит с двухфакторной экспоненциальной поперечной неоднородностью физико-механических свойств.

Основные соотношения задачи. Рассматривается трансверсально-изотропное функционально-градиентное упругое тело в форме плиты произвольной толщины h со срединной плоскостью S , занимающее в декартовой системе координат $Ox_1x_2x_3$ область

$$V = \{(x_1, x_2) \in S, 0 \leq x_3 \leq h\}. \quad (1)$$

Определяющие соотношения модели связанного пространственного стационарного динамического термоупругого деформирования [2] с циклической частотой ω для рассматриваемой плиты, обладающей двухфакторной экспоненциальной поперечной неоднородностью физико-механических свойств, которая описывается заданием элементов матриц модулей упругости $c_{ij}(x_3)$, коэффициентов линейного теплового расширения $\alpha_{ij}(x_3)$, коэффициентов теплопроводности $k_{ij}(x_3)$, параметров теплоемкости $\alpha(x_3)$ и плотности $\rho(x_3)$ материала в виде

$$\begin{aligned} \sigma_{11}(x_1, x_2, x_3, t) &= [c_{11}(x_3)\partial_1 u_1(x_1, x_2, x_3) + c_{12}(x_3)\partial_2 u_2(x_1, x_2, x_3) + c_{13}(x_3)\partial_3 u_3(x_1, x_2, x_3) + \\ &\quad - \alpha_{11}(x_3)\vartheta(x_1, x_2, x_3)]\exp(-i\omega t), \\ \sigma_{22}(x_1, x_2, x_3, t) &= [c_{12}(x_3)\partial_1 u_1(x_1, x_2, x_3) + c_{11}(x_3)\partial_2 u_2(x_1, x_2, x_3) + c_{13}(x_3)\partial_3 u_3(x_1, x_2, x_3) + \\ &\quad - \alpha_{11}(x_3)\vartheta(x_1, x_2, x_3)]\exp(-i\omega t), \\ \sigma_{33}(x_1, x_2, x_3, t) &= [c_{13}(x_3)\partial_1 u_1(x_1, x_2, x_3) + c_{13}(x_3)\partial_2 u_2(x_1, x_2, x_3) + c_{33}(x_3)\partial_3 u_3(x_1, x_2, x_3) + \\ &\quad - \alpha_{33}(x_3)\vartheta(x_1, x_2, x_3)]\exp(-i\omega t), \\ \sigma_{23}(x_1, x_2, x_3, t) &= [c_{44}(x_3)(\partial_2 u_3(x_1, x_2, x_3) + \partial_3 u_2(x_1, x_2, x_3))]\exp(-i\omega t), \\ \sigma_{13}(x_1, x_2, x_3, t) &= [c_{44}(x_3)(\partial_1 u_3(x_1, x_2, x_3) + \partial_3 u_1(x_1, x_2, x_3))]\exp(-i\omega t), \\ \sigma_{12}(x_1, x_2, x_3, t) &= [(c_{11}(x_3) - c_{12}(x_3))/2](\partial_1 u_2(x_1, x_2, x_3) + \partial_2 u_1(x_1, x_2, x_3))\exp(-i\omega t), \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} c_{ij}(x_3) &= c_{ij0} \exp(\lambda x_3), \quad \alpha_{ij}(x_3) = \alpha_{ij0} \exp(\lambda x_3), \quad k_{ij}(x_3) = k_{ij0} \exp(\lambda x_3), \\ \alpha(x_3) &= \alpha_0 \exp(\lambda x_3), \quad \rho(x_3) = \rho_0 \exp(\lambda x_3), \quad \partial_j = \partial / \partial x_j; \end{aligned} \quad (3)$$

λ, λ_ρ – параметры двухфакторной экспоненциальной неоднородности; $c_{ij0}, \alpha_{ij0}, k_{ij0}, \alpha_0, \rho_0$ – опорные значения соответствующих физико-механических характеристик.

Система разрешающих уравнений относительно амплитудных составляющих $u_j(x_1, x_2, x_3)$ в представлениях динамических упругих перемещений $u_j(x_1, x_2, x_3)\exp(-i\vartheta t)$ и амплитудной составляющей $\vartheta(x_1, x_2, x_3)$ для температурной функции $\vartheta(x_1, x_2, x_3)\exp(-i\vartheta t)$, имеет вид

$$\begin{aligned} &[c_{11}(x_3)\partial_1^2 + (c_{11}(x_3) - c_{12}(x_3))/2\partial_2^2 + \partial_3(c_{44}(x_3)\partial_3) + \rho(x_3)\omega^2]u_1(x_1, x_2, x_3) + \\ &+ [(c_{11}(x_3) + c_{12}(x_3))/2\partial_1\partial_2]u_2(x_1, x_2, x_3) + [c_{13}(x_3)\partial_1\partial_3 + \partial_3(c_{44}(x_3)\partial_1)]u_3(x_1, x_2, x_3) - \\ &\quad - [\alpha_{11}(x_3)\partial_1]\vartheta(x_1, x_2, x_3) = 0, \\ &[(c_{11}(x_3) + c_{12}(x_3))/2\partial_1\partial_2]u_1(x_1, x_2, x_3) + \\ &+ [(c_{11}(x_3) - c_{12}(x_3))/2\partial_1^2 + c_{11}(x_3)\partial_2^2 + \partial_3(c_{44}(x_3)\partial_3) + \rho(x_3)\omega^2]u_2(x_1, x_2, x_3) + \\ &+ [c_{13}(x_3)\partial_2\partial_3 + \partial_3(c_{44}(x_3)\partial_2)]u_3(x_1, x_2, x_3) - [\alpha_{11}(x_3)\partial_2]\vartheta(x_1, x_2, x_3) = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& [(c_{44}(x_3)\partial_1\partial_3 + \partial_3(c_{13}(x_3)\partial_1)]u_1(x_1, x_2, x_3) + [c_{44}(x_3)\partial_2\partial_3 + \partial_3(c_{13}(x_3)\partial_2)]u_2(x_1, x_2, x_3) + \\
& + [c_{44}(x_3)\partial_1^2 + c_{44}(x_3)\partial_2^2 + \partial_3(c_{33}(x_3)\partial_3) + \rho(x_3)\omega^2]u_3(x_1, x_2, x_3) - [\partial_3\alpha_{11}(x_3)]\vartheta(x_1, x_2, x_3) = 0, \\
& [i\omega\alpha_{11}(x_3)\partial_1]u_1(x_1, x_2, x_3) + [i\omega\alpha_{11}(x_3)\partial_2]u_2(x_1, x_2, x_3) + [i\omega\alpha_{33}(x_3)\partial_3]u_3(x_1, x_2, x_3) + \\
& + [T_0^{-1}(k_{11}(x_3)(\partial_1^2 + \partial_2^2) + \partial_3(k_{33}(x_3)\partial_3)) + i\omega\alpha(x_3)]\vartheta(x_1, x_2, x_3) = 0. \quad (4)
\end{aligned}$$

На форму и порядок связности срединной плоскости плиты S в процессе построения элементарных базисных однородных решений ограничения не накладываются. На плоских гранях плиты $\Gamma_0 = \{(x_1, x_2) \in S, x_3 = 0\}$ и $\Gamma_1 = \{(x_1, x_2) \in S, x_3 = h\}$ в рассматриваемой модели в различных сочетаниях задаются механические краевые условия свободной от усилий поверхности $(\sigma_{31})_{\Gamma_j} = (\sigma_{32})_{\Gamma_j} = (\sigma_{33})_{\Gamma_j} = 0$, жестко закрепленной поверхности $(\sigma_{31})_{\Gamma_j} = (\sigma_{32})_{\Gamma_j} = (\sigma_{33})_{\Gamma_j} = 0$, фиксируемой поверхности с проскальзыванием в плоскости $(\sigma_{31})_{\Gamma_j} = (\sigma_{32})_{\Gamma_j} = (\sigma_{33})_{\Gamma_j} = 0$, либо поверхности с абсолютно гибким нерастяжимым безинерционным тонким покрытием $(\sigma_{31})_{\Gamma_j} = (\sigma_{32})_{\Gamma_j} = (\sigma_{33})_{\Gamma_j} = 0$, а для краевые условия для температурной компоненты связанного термомеханического деформирования – условие теплоизолированной поверхности $(\partial_3\vartheta)_{\Gamma_j} = 0$, условие свободного теплообмена $(\vartheta + \eta\partial_3\vartheta)_{\Gamma_j} = 0$, либо условие поддержания на поверхности заданной температуры $(\vartheta)_{\Gamma_j} = \vartheta^*$.

Получение представлений для базисных элементарных однородных решений. Для получения представлений базисных элементарных однородных решений применяется полуобратный метод [2]. С использованием исходного представления амплитудных составляющих для базисных однородных решений потенциального типа

$$\begin{aligned}
u_1(x_1, x_2, x_3) &= \partial_1 F(x_1, x_2)\varphi_1(x_3), \quad u_2(x_1, x_2, x_3) = \partial_2 F(x_1, x_2)\varphi_1(x_3), \quad u_3(x_1, x_2, x_3) = F(x_1, x_2)\varphi_2(x_3), \\
\vartheta(x_1, x_2, x_3) &= F(x_1, x_2)\varphi_3(x_3), \quad \Delta^2 F(x_1, x_2) + \gamma^2 F(x_1, x_2) = 0, \quad \Delta^2 = \partial_1^2 + \partial_2^2, \quad (5)
\end{aligned}$$

и с учетом представлений (3), система разрешающих уравнений (4) сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами относительно функций $\varphi_j(x_3)$ ($j = \overline{1, 3}$)

$$\begin{aligned}
& c_{440}\varphi_1''(x_3) + \lambda c_{440}\varphi_1'(x_3) - c_{110}\gamma^2\varphi_1(x_3) + (c_{130} + c_{440})\varphi_2'(x_3) + \\
& + \lambda c_{440}\varphi_2(x_3) - \alpha_{110}\varphi_3(x_3) = -\rho_0\omega^2 e^{\lambda_m x_3}\varphi_1(x_3), \\
& -(c_{130} + c_{440})\gamma^2\varphi_1'(x_3) - c_{130}\lambda\gamma^2\varphi_1(x_3) + c_{330}\varphi_2''(x_3) + c_{330}\lambda\varphi_2'(x_3) + (\rho_0\omega^2 - c_{440}\gamma^2)\varphi_2(x_3) - \\
& - \alpha_{330}\varphi_3'(x_3) - \alpha_{330}\lambda\varphi_3(x_3) = -\rho_0\omega^2 e^{\lambda_m x_3}\varphi_2(x_3), \\
& -i\omega\alpha_{110}\gamma^2\varphi_1(x_3) + i\omega\alpha_{330}\varphi_2'(x_3) + T_0^{-1}k_{330}\varphi_3''(x_3) + T_0^{-1}k_{330}\lambda\varphi_3'(x_3) + (i\omega\alpha_0 - T_0^{-1}k_{110}\gamma^2)\varphi_3(x_3) = 0. \quad (6)
\end{aligned}$$

Далее (6) преобразуется к виду

$$\begin{aligned}
& a_{11}\varphi_1''(x_3) + b_{11}\varphi_1'(x_3) + c_{11}\varphi_1(x_3) + b_{12}\varphi_2'(x_3) + c_{12}\varphi_2(x_3) + c_{13}\varphi_3(x_3) = d_{11}e^{\lambda_m x_3}\varphi_1(x_3), \\
& b_{21}\varphi_1'(x_3) + c_{21}\varphi_1(x_3) + a_{22}\varphi_2''(x_3) + b_{22}\varphi_2'(x_3) + c_{22}\varphi_2(x_3) + b_{23}\varphi_3'(x_3) + c_{23}\varphi_3(x_3) = d_{22}e^{\lambda_m x_3}\varphi_2(x_3), \\
& c_{31}\varphi_1(x_3) + b_{32}\varphi_2'(x_3) + a_{33}\varphi_3''(x_3) + b_{33}\varphi_3'(x_3) + c_{33}\varphi_3(x_3) = 0, \quad (7)
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
& a_{11} = c_{440}, \quad b_{11} = \lambda c_{440}, \quad c_{11} = -c_{110}\gamma^2, \quad b_{12} = (c_{130} + c_{440}), \quad c_{12} = \lambda c_{440}, \quad c_{13} = -\alpha_{110}, \\
& b_{21} = -(c_{130} + c_{440})\gamma^2, \quad c_{21} = -c_{130}\lambda\gamma^2, \quad a_{22} = c_{330}, \quad b_{22} = c_{330}\lambda, \quad c_{22} = (\rho_0\omega^2 - c_{440}\gamma^2)\varphi_2(x_3), \\
& b_{23} = -\alpha_{330}, \quad c_{23} = -\alpha_{330}\lambda, \quad c_{31} = -i\omega\alpha_{110}\gamma^2, \quad b_{32} = i\omega\alpha_{330}, \quad a_{33} = T_0^{-1}k_{330}, \quad b_{33} = T_0^{-1}k_{330}\lambda, \\
& c_{33} = (i\omega\alpha_0 - T_0^{-1}k_{110}\gamma^2), \quad d_{11} = d_{22} = -\rho_0\omega^2, \quad \lambda_m = \lambda_\rho - \lambda, \quad (8)
\end{aligned}$$

и записывается в векторно-матричной форме

$$(\underline{A}\partial_3^2 + \underline{B}\partial_3 + \underline{C})\underline{\Phi}(x_3) = \exp(\lambda_m x_3)\underline{D}\underline{\Phi}(x_3), \quad \underline{\Phi}(x_3) = (\varphi_1(x_3), \varphi_2(x_3), \varphi_3(x_3))^T. \quad (9)$$

Матричные коэффициенты в (9) имеют вид

$$\underline{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{pmatrix}, \quad \underline{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ 0 & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix}, \quad \underline{C} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & 0 & c_{33} \end{pmatrix}, \quad \underline{D} = \begin{pmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Интегрирование уравнений (9) реализуется с применением итерационного векторно-матричного алгоритма, описываемого соотношениями

$$\underline{\Phi}(x_3) = \underline{\Phi}_0(x_3) + \underline{\Phi}_1(x_3) + \dots + \underline{\Phi}_n(x_3) + \dots; \quad (11)$$

$$(\underline{A}\partial_3^2 + \underline{B}\partial_3 + \underline{C})\underline{\Phi}_0(x_3) = 0, \quad (12)$$

$$(\underline{A}\partial_3^2 + \underline{B}\partial_3 + \underline{C})\underline{\Phi}_1(x_3) = \exp(\lambda_m x_3)\underline{D}\underline{\Phi}_0(x_3), \dots, \quad (13)$$

$$(\underline{A}\partial_3^2 + \underline{B}\partial_3 + \underline{C})\underline{\Phi}_n(x_3) = \exp(\lambda_m x_3)\underline{D}\underline{\Phi}_{n-1}(x_3) \quad (n = \overline{2, \infty}).$$

Представления для базисных частных решений задачи начального приближения (12), получаемые методом Эйлера, записываются в виде

$$\underline{\Phi}_{0j}(x_3) = \underline{\zeta}_{0j} \exp(\delta_j x_3), \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} \underline{\zeta}_{0j} = & ((a_{22}\delta_j^2 + b_{22}\delta_j + c_{22})(a_{33}\delta_j^2 + b_{33}\delta_j + c_{33}) - b_{32}\delta_j(b_{23}\delta_j + c_{23}), \\ & -(b_{21}\delta_j + c_{21})(a_{33}\delta_j^2 + b_{33}\delta_j + c_{33}) + c_{31}(b_{23}\delta_j + c_{23}), \\ & b_{32}\delta_j(b_{21}\delta_j + c_{21}) - c_{31}(a_{22}\delta_j^2 + b_{22}\delta_j + c_{22}))^T \quad (j = \overline{1, 6}), \end{aligned}$$

δ_j ($j = \overline{1, 6}$) – корни полиномиального характеристического уравнения шестой степени

$$\det\|\underline{A}\delta^2 + \underline{B}\delta + \underline{C}\| = 0. \quad (15)$$

Функции $\underline{\Phi}_{nj}(x_3)$, отвечающие решениям задачи начального приближения $\underline{\Phi}_{0j}(x_3)$, находятся в виде

$$\begin{aligned} \underline{\Phi}_{1j}(x_3) &= \underline{\zeta}_{1j} \exp((\delta_j + \lambda_m)x_3), \quad \underline{\Phi}_{2j}(x_3) = \underline{\zeta}_{2j} \exp((\delta_j + 2\lambda_m)x_3), \dots, \\ \underline{\Phi}_{nj}(x_3) &= \underline{\zeta}_{nj} \exp((\delta_j + n\lambda_m)x_3), \dots, \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$\underline{\zeta}_{nj} = \underline{Q}_{nj}^{-1} \underline{D} \underline{\zeta}_{n-1,j}, \quad \underline{Q}_{nj} = \underline{A}(\delta_j + n\lambda_m)^2 + \underline{B}(\delta_j + n\lambda_m) + \underline{C}. \quad (17)$$

В итоге, получаемые на базе описанного итерационного алгоритма базисные решения уравнения (9) могут быть записаны в аналитической форме

$$\underline{\Phi}_j(x_3) = (\Phi_{1j}(x_3), \Phi_{2j}(x_3), \Phi_{3j}(x_3))^T = \sum_{n=0}^{\infty} \underline{\zeta}_{nj} \exp((\delta_j + n\lambda_m)x_3) \quad (j = \overline{1, 6}), \quad (18)$$

$$\underline{\zeta}_{nj} = \underline{Q}_{nj}^{-1} \underline{D} \underline{Q}_{n-1,j}^{-1} \underline{D} \dots \underline{Q}_{1j}^{-1} \underline{D} \underline{\zeta}_{0j},$$

а общее решение (9) представлено в виде комбинации базисных частных решений с произвольными постоянными коэффициентами S_j

$$\underline{\Phi}(x_3) = (\Phi_1(x_3), \Phi_2(x_3), \Phi_3(x_3))^T = \sum_{j=1}^6 S_j \underline{\Phi}_j(x_3). \quad (19)$$

Для соответствующих характеристик динамического термоупругого состояния трансверсально-изотропной плиты с учетом выражений (19) могут быть записаны выражения

$$\begin{aligned}
 u_1(x_1, x_2, x_3) &= \partial_1 F(x_1, x_2) \Phi_1(x_3), \quad u_2(x_1, x_2, x_3) = \partial_2 F(x_1, x_2) \Phi_1(x_3), \\
 u_3(x_1, x_2, x_3) &= F(x_1, x_2) \Phi_2(x_3), \quad \vartheta(x_1, x_2, x_3) = F(x_1, x_2) \Phi_3(x_3), \\
 \sigma_{11}(x_1, x_2, x_3) &= c_{11}(x_3) \partial_1^2 F(x_1, x_2) \Phi_1(x_3) + c_{12}(x_3) \partial_2^2 F(x_1, x_2) \Phi_1(x_3) + c_{13}(x_3) F(x_1, x_2) \partial_3 \Phi_1(x_3), \\
 \sigma_{22}(x_1, x_2, x_3) &= c_{12}(x_3) \partial_1^2 F(x_1, x_2) \Phi_1(x_3) + c_{11}(x_3) \partial_2^2 F(x_1, x_2) \Phi_1(x_3) + c_{13}(x_3) F(x_1, x_2) \partial_3 \Phi_1(x_3), \\
 \sigma_{33}(x_1, x_2, x_3) &= c_{13}(x_3) \Delta^2 F(x_1, x_2) \Phi_1(x_3) + c_{33}(x_3) F(x_1, x_2) \Phi_2(x_3) = \\
 &= -c_{13}(x_3) \gamma^2 F(x_1, x_2) \Phi_1(x_3) + c_{33}(x_3) F(x_1, x_2) \Phi_2(x_3), \\
 \sigma_{13}(x_1, x_2, x_3) &= c_{44}(x_3) \partial_1 F(x_1, x_2) (\partial_3 \Phi_1(x_3) + \Phi_2(x_3)), \\
 \sigma_{23}(x_1, x_2, x_3) &= c_{44}(x_3) \partial_2 F(x_1, x_2) (\partial_3 \Phi_1(x_3) + \Phi_2(x_3)), \\
 \sigma_{12}(x_1, x_2, x_3) &= ((c_{11}(x_3) - c_{12}(x_3)) / 2) \partial_1 \partial_2 F(x_1, x_2) \Phi_1(x_3), \\
 \vartheta(x_1, x_2, x_3) &= F(x_1, x_2) \Phi_3(x_3), \\
 \Delta^2 F(x_1, x_2) + \gamma^2 F(x_1, x_2) &= 0.
 \end{aligned} \tag{20}$$

Трансцендентные дисперсионные уравнения для определения множеств значений спектрального параметра γ в задачах рассматриваемого типа формулируются как следствия из однородных граничных условий на плоских гранях плиты при конкретных вариантах их задания, и записываются как условия равенств нулю функциональных определителей однородных систем линейных алгебраических уравнений относительно неопределенных постоянных коэффициентов S_j . В частности, для плиты с жестко закрепленными гранями Γ_0 и Γ_1 , на которых поддерживаются постоянные температуры, следствием краевых условий является система относительно S_j вида

$$\begin{aligned}
 S_1 \Phi_{11}(0) + S_2 \Phi_{12}(0) + S_3 \Phi_{13}(0) + S_4 \Phi_{14}(0) + S_5 \Phi_{15}(0) + S_6 \Phi_{16}(0) &= 0, \\
 S_1 \Phi_{11}(h) + S_2 \Phi_{12}(h) + S_3 \Phi_{13}(h) + S_4 \Phi_{14}(h) + S_5 \Phi_{15}(h) + S_6 \Phi_{16}(h) &= 0, \\
 S_1 \Phi_{21}(0) + S_2 \Phi_{22}(0) + S_3 \Phi_{23}(0) + S_4 \Phi_{24}(0) + S_5 \Phi_{25}(0) + S_6 \Phi_{26}(0) &= 0, \\
 S_1 \Phi_{21}(h) + S_2 \Phi_{22}(h) + S_3 \Phi_{23}(h) + S_4 \Phi_{24}(h) + S_5 \Phi_{25}(h) + S_6 \Phi_{26}(h) &= 0, \\
 S_1 \Phi_{31}(0) + S_2 \Phi_{32}(0) + S_3 \Phi_{33}(0) + S_4 \Phi_{34}(0) + S_5 \Phi_{35}(0) + S_6 \Phi_{36}(0) &= 0, \\
 S_1 \Phi_{31}(h) + S_2 \Phi_{32}(h) + S_3 \Phi_{33}(h) + S_4 \Phi_{34}(h) + S_5 \Phi_{35}(h) + S_6 \Phi_{36}(h) &= 0,
 \end{aligned} \tag{21}$$

а дисперсионное уравнение для данного варианта модели термоупругого динамического деформирования функционально-градиентной плиты с двухфакторной экспоненциальной неоднородностью может быть записано в форме

$$F(\omega, \gamma) = \det \|\delta_{qj}\|_{q,j=1}^6 = 0, \tag{22}$$

$$\delta_{1j} = \Phi_{1j}(0), \quad \delta_{2j} = \Phi_{1j}(h), \quad \delta_{3j} = \Phi_{2j}(0), \quad \delta_{4j} = \Phi_{2j}(h), \quad \delta_{5j} = \Phi_{3j}(0), \quad \delta_{6j} = \Phi_{3j}(h).$$

Для каждого значения корня γ_p из множества $\{\gamma_p\}_{p=1}^\infty$ решений уравнения (22) соответствующие величины S_{jp} в представлениях (19) могут быть записаны в форме алгебраических дополнений Δ_{jp} к элементам j -го столбца первой строки матрицы $\left(\|\delta_{qj}\|_{q,j=1}^6 \right)_{\gamma=\gamma_p}$, и, в итоге, выражения для отвечающих величинам γ_p элементарных базисных однородных решений потенциального типа принимают вид

$$\begin{aligned}
u_{1p}(x_1, x_2, x_3, t) &= \partial_1 \sum_{j=1}^6 \Delta_{jp} \Phi_{1jp}(x_3) F_p(x_1, x_2) \exp(-i\omega t), \\
u_{2p}(x_1, x_2, x_3, t) &= \partial_2 \sum_{j=1}^6 \Delta_{jp} \Phi_{1jp}(x_3) F_p(x_1, x_2) \exp(-i\omega t), \\
u_{3p}(x_1, x_2, x_3, t) &= \sum_{j=1}^6 \Delta_{jp} \Phi_{2jp}(x_3) F_p(x_1, x_2) \exp(-i\omega t), \\
\mathcal{G}_p(x_1, x_2, x_3, t) &= \sum_{j=1}^6 \Delta_{jp} \Phi_{3jp}(x_3) F_p(x_1, x_2) \exp(-i\omega t),
\end{aligned} \tag{23}$$

где $F_p(x_1, x_2)$ – метагармонические функции, определяемые из уравнений

$$D^2 F_p(x_1, x_2) + \gamma^2 F_p(x_1, x_2) = 0 \tag{24}$$

в форме, соответствующей виду области S , занимаемой срединной плоскостью плиты.

При подстановке исходных представлений амплитудных составляющих для базисных однородных решений вихревого типа

$$\begin{aligned}
u_1(x_1, x_2, x_3) &= \partial_2 \Psi(x_1, x_2) \chi(x_3), \quad u_2(x_1, x_2, x_3) = -\partial_1 \Psi(x_1, x_2) \chi(x_3), \\
u_3(x_1, x_2, x_3) &\equiv 0, \quad \mathcal{G}(x_1, x_2, x_3) \equiv 0, \quad D^2 \Psi(x_1, x_2) + \beta^2 \Psi(x_1, x_2) = 0,
\end{aligned} \tag{25}$$

в систему уравнений (4) с учетом соотношений (3) в качестве следствия может быть получено обыкновенное дифференциальное уравнение с переменными коэффициентами

$$c_{440} \chi''(x_3) + \lambda c_{440} \chi'(x_3) - ((c_{110} - c_{120})/2) \beta^2 \chi(x_3) = -\rho_0 \omega^2 e^{\lambda_m x_3}, \tag{26}$$

записываемое после введения обозначений

$$\alpha = \lambda_c, \quad \beta = -c_{660} k^2 / c_{440}, \quad \gamma = -\rho_0 \omega^2 / c_{440}, \tag{27}$$

в форме

$$\chi''(x_3) + \alpha \chi'(x_3) + \beta \chi(x_3) = \gamma e^{\lambda_m x_3} \chi(x_3). \tag{28}$$

Для интегрирования уравнения (28) применяется итерационный алгоритм, в рамках которого

$$\chi = \chi_0 + \chi_1 + \chi_2 + \chi_3 + \dots + \chi_n + \dots, \tag{29}$$

$$\chi_0'' + \alpha \chi_0' + \beta \chi_0 = 0, \tag{30}$$

$$\chi_1'' + \alpha \chi_1' + \beta \chi_1 = \gamma e^{\lambda_m x_3} \chi_0, \quad \dots, \quad \chi_n'' + \alpha \chi_n' + \beta \chi_n = \gamma e^{\lambda_m x_3} \chi_{n-1} \quad (n = \overline{2, \infty}) \tag{31}$$

Соответственно, при выборе $\chi_0(x_3)$ в форме

$$\chi_0(x_3) = C_1 e^{\delta_1 x_3} + C_2 e^{\delta_2 x_3}, \quad \delta_j = -(\alpha/2) + (-1)^j ((\alpha/2)^2 - \beta)^{1/2} \quad (j = \overline{1, 2}), \tag{32}$$

с произвольными коэффициентами C_j , далее в аналитической форме строятся два базисных частных решения $\chi^{(j)}(x_3)$ уравнения (28), отвечающие представлениям $\chi_{0j} = A_{0j} e^{\delta_j x_3}$, $\chi_{nj} = A_{nj} e^{(\delta_j + n\lambda_m)x_3}$, где, согласно (31),

$$A_{nj} = \gamma ((\delta_j + n\lambda)^2 + \alpha(\delta_j + n\lambda_m) + \beta)^{-1} A_{n-1,j}, \quad A_{0j} = 1,$$

или

$$\chi^{(j)}(x_3) = e^{\delta_j x_3} + \sum_{n=1}^{\infty} A_{nj} e^{(\delta_j + n\lambda_m)x_3}, \tag{33}$$

$$A_{nj} = \gamma^n \prod_{q=1}^n ((\delta_j + q\lambda_m)^2 + \alpha(\delta_j + q\lambda_m) + \beta)^{-1}. \tag{34}$$

Соответствующие выражения для амплитудных функций динамических напряжений, отвечающие построенным базисным решениям уравнения (26), могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned}\sigma_{11}(x_1, x_2, x_3) &= -\sigma_{22}(x_1, x_2, x_3) = (c_{11}(x_3) - c_{12}(x_3))\partial_1\partial_2\Psi(x_1, x_2)\chi(x_3), \quad \sigma_{33}(x_1, x_2, x_3) \equiv 0, \\ \sigma_{23}(x_1, x_2, x_3) &= -c_{44}(x_3)\partial_1\Psi(x_1, x_2)\chi'(x_3), \quad \sigma_{13}(x_1, x_2, x_3) = c_{44}(x_3)\partial_2\Psi(x_1, x_2)\chi'(x_3), \\ \sigma_{12}(x_1, x_2, x_3) &= (\partial_2^2 - \partial_1^2)\Psi(x_1, x_2)c_{66}(x_3)\chi(x_3),\end{aligned}\quad (35)$$

где

$$\chi'(x_3) = C_1(\chi^{(1)}(x_3))' + C_2(\chi^{(2)}(x_3))', \quad (\chi^{(j)}(x_3))' = \delta_j e^{\delta_j x_3} + \sum_{n=1}^{\infty} (\delta_j + n\lambda_m) A_{nj} e^{(\delta_j + n\lambda_m)x_3}. \quad (36)$$

Трансцендентное дисперсионное уравнение относительно множества значений спектрального параметра β для базисных однородных решений вихревого типа в частном случае плиты с закрепленными гранями имеет вид

$$G(\omega, \beta) = \begin{vmatrix} \chi^{(1)}(0) & \chi^{(2)}(0) \\ \chi^{(1)}(h) & \chi^{(2)}(h) \end{vmatrix} = 0,$$

а отвечающие значениям его корней β_p элементарные базисные частные решения вихревого типа могут быть записаны в форме

$$\begin{aligned}u_{1p}(x_1, x_2, x_3) &= \partial_2\Psi_p(x_1, x_2)(\chi^{(2)}(0)\chi^{(1)}(x_3) - \chi^{(1)}(0)\chi^{(2)}(x_3)), \\ u_{2p}(x_1, x_2, x_3) &= -\partial_1\Psi_p(x_1, x_2)(\chi^{(2)}(0)\chi^{(1)}(x_3) - \chi^{(1)}(0)\chi^{(2)}(x_3)), \\ u_{3p}(x_1, x_2, x_3) &= \mathcal{P}_p(x_1, x_2, x_3, t) \equiv 0, \quad \Delta^2\Psi_p(x_1, x_2) + \beta_p^2\Psi_p(x_1, x_2) = 0.\end{aligned}$$

Заключение. Результатом представленных в работе исследований является получение аналитических представлений для элементарных базисных однородных решений в модели термоупругого пространственного стационарного динамического деформирования функционально-градиентных трансверсально-изотропных плит с двухфакторной экспоненциальной неоднородностью физико-механических свойств по толщине. Для частного случая плиты с жестко закрепленными плоскими гранями, на которых поддерживается постоянная температура, дано описание элементарных базисных однородных решений потенциального и вихревого типа, а также соответствующих дисперсионных уравнений относительно определяющих эти решения значений спектральных параметров. Результаты представленных исследований являются основой для получения решений различных классов задач о термоупругом стационарном динамическом деформировании плит различной конфигурации.

Исследования проводились в ФГБОУ ВО «ДонГУ» в рамках государственного задания (№ госрегистрации 124012400353-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринченко, В.Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В.Т. Гринченко, В.В. Мелешко. – К.: Наук. думка, 1981. – 284 с.
2. Космодамианский А.С. Динамические задачи теории упругости для анизотропных сред / А.С. Космодамианский, В.И. Сторожев. – К.: Наук. думка, 1985. – 176 с.
3. Упругие волноводы: история и современность / В.В. Мелешко, А.А. Бондаренко, С.А. Довгий, А.Н. Трофимчук, Г.Я. ван Хейст // Математические методы и физико-механические поля. – 2008. – Т. 51, № 2. – С. 86–104.
4. Жаворонок, С.И. Задачи о дисперсии волн в неоднородных волноводах: Методы решения (обзор). Часть 1 / С.И. Жаворонок // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 227–260. – DOI: 10.33113/mkmk.ras.2021.27.02.227_260.06.

5. Жаворонок, С.И. Задачи о дисперсии волн в неоднородных волноводах: Методы решения (обзор). Часть 2 / С.И. Жаворонок // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 36–86. – DOI: 10.33113/mkmmk.ras.2022.28.01.036_086.03.
6. Birman, V. Modeling and Analysis of Functionally Graded Materials and Structures / V. Birman, L.W. Byrd // Appl. Mech. Rev. – 2007. – Vol. 60, N 5. – P. 195–216.
7. Koizumi, M. The concept of FGM / M. Koizumi // Ceramics Transactions: Functionally Graded Materials. – 1993. – Vol. 34. – P. 3–10.
8. Mahmood, R.M. Functionally graded materials / R.M. Mahmood, E.T. Aktinlabi. – Springer International Publishing, 2017. – 197 p.
9. FGM: Design, processing and applications / Y. Miyamoto, W.A. Kaysser, B.H. Rabin et al. – Dordrecht: Kluwer Academic, 1999. – 434 p.
10. Udupa, G. Functionally graded composite materials: An overview / G. Udupa, R.S. Shrikantha, R.V. Gangadharan // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 5. – P.1291–1299.

Поступила в редакцию 29.08.2025 г.

HOMOGENEOUS SOLUTIONS FOR A MODEL OF DYNAMIC THERMOELASTIC DEFORMATION OF FUNCTIONALLY GRADED TRANSVERSELY ISOTROPIC PLATES WITH TWO-FACTOR EXPONENTIAL HETEROGENEITY

V.I. Storozhev, S. V. Storozhev, M. V. Fomenko

This paper presents a solution to the problem of constructing a system of basic homogeneous solutions for a model of coupled spatial thermoelastic steady-state dynamic deformation of functionally graded transversely isotropic slabs of spatial geometry made of materials with two-factor exponential heterogeneity of physical and mechanical properties across thickness. One value of the heterogeneity index is specified for the slab material density parameter, and a second value is specified for all other physical and mechanical properties. Analytical representations of the homogeneous solutions are obtained through the combined application of a semi-inverse method and an iterative algorithm for integrating the amplitude equations of spectral problems with respect to coordinate functions across the slab thickness.

Keywords: slabs of spatial geometry, functionally graded transversely isotropic materials, two-factor exponential transverse heterogeneity, coupled thermomechanical deformation, stationary wave processes, basic homogeneous solutions, semi-inverse method, analytical representations.

Сторожев Валерий Иванович

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: stvistvi@mail.ru.

ORCID: 0009-0006-8448-4963 Author ID: 1051802

Storozhev Valeriy Ivanovich

Doctor of Technical Science, Professor, Chief Researcher, Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

Сторожев Сергей Валериевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры специализированных информационных технологий и систем строительного факультета, «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» – филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Макеевка, ДНР, РФ.
E-mail: s.v.storozhev@donnasa.ru.

ORCID: 0000-0002-4198-3491 Author ID: 1099797

Storozhev Sergey Valerievich

Doctor of Technical Science, Docent, Professor, Chair of Specialized Information Technologies and Systems, Faculty of Civil Engineering, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, DPR, RF.

Фоменко Максим Владимирович

кандидат физико-математических наук, ученый секретарь научно-исследовательской части, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ. E-mail: maxim_fom@mail.ru.
ORCID: 0009-0003-9649-1827 Author ID: 1034058

Fomenko Maksim Vladimirovich

Candidate of Phisico-Mathematical Sciences, Scientific Secretary of the Research Department, Senior Researcher, Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 631.46:579.26

DOI: 10.5281/zenodo.18054243

EDN: CUXDBZ

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ МИКРОБНОГО КОМПЛЕКСА РИЗОСФЕРЫ ТРАНСГЕННЫХ РАСТЕНИЙ ТОМАТА С ГЕНОМ ХОЛИНОКСИДАЗЫ

© 2025. А. А. Антонов, А. А. Ванькова, Е. Н. Баранова, А. А. Гулевич,
Л. В. Куренина, Е. В. Платонова

Возделывание ГМ-растений может угрожать почвенной микрофлоре. У генномодифицированных растений томата с геном холиноксидазы выявлено большее видовое разнообразие, чем на контроле. При схожести структуры филумов, у трансгенных растений из ризосферы исчезают многие роды и появляются новые, не выявленные на контроле. Существенные изменения обнаружены в филумах *Actinobacteria* и *Proteobacteria*. В первом обнаружены деструкторы полисахаридов *Acidothermus* (семейство *Acidothermaceae*), *Sporichthya* (*Sporichthyaceae*), *Arthrobacter* (*Micrococcaceae*), *Conexibacter* (*Conexibacteraceae*), при исчезновении *Gaiella* (семейство *Gaiellaceae*) и *Mycobacterium* (*Mycobacteriaceae*). В филуме *Proteobacteria* исчезли деструкторы сложных полимеров *Acidocella* (семейство *Acetobacteraceae*) и *Inquilinus* (*Rhodospirillaceae*); однако появились утилизаторы ксенобиотиков *Pandora*. В долгосрочной перспективе данные изменения могут повлиять на скорость разложения растительного опада и доступность элементов питания растениям.

Ключевые слова: трансгенные растения; томат; ризосфера; микроорганизмы; холиноксидаза.

Введение. Производство качественного продовольствия и сырья – первоочередная задача сельского хозяйства. Растущее население, изменение климата, техногенные катастрофы и экономическая нестабильность бросают аграриям новые вызовы. С 1980-х годов в качестве способа повышения урожайности предлагается активное возделывание генетически модифицированных растений. Можно получить растения с определенным химическим составом, обладающие высокой устойчивостью к биотическим и абиотическим стрессам. Параллельно в обществе ведется дискуссия о их биобезопасности для человека и окружающей среды [1, 2]. При этом мало внимания уделяется воздействию на почвенные микроорганизмы. Ранее нами были получены результаты исследования воздействия трансгенных растений томата с геном синтеза холиноксидазы на структуру ризосферного микробиома на уровне филумов. В ризосфере контрольных растений было обнаружено 948 таксономических операционных единиц (OTU), у генетически модифицированных растений – 1017. Индекс разнообразия Шеннона составил 8,62 и 8,77, Чао1 – 1075 и 1122 у контрольных и трансгенных растений соответственно [3]. Количество выявленных OTU и индексы разнообразия свидетельствовали о более высоком видовом богатстве в ризосфере трансгенных растений по сравнению с контролем. Анализ таксономического разнообразия и структуры бактериального сообщества ризосферы трансгенных растений выявил увеличение доли доминирующего филума *Proteobacteria* (с 62 % до 64 %) и снижение доли *Bacteroidetes* (с 19 % до 17 %) по сравнению с контролем. У остальных филумов различия составили менее процента. Классы *Spartobacteria* и *Chloroflexia*, присутствующие в контрольных растениях, в ризосфере генетически модифицированных растений не обнаружены, но выявлены новые классы *Caldilineae* и *Holophagae*. Был сделан лишь поверхностный анализ структуры доминирующих родов

в филуме *Proteobacteria*. Также внимание привлекло появление в ризосферном микробиоме трансгенных растений хищных бактерий р. *Micavibrio* [3]. Для более ясного понимания изменений требуется более подробно изучить структуру сообщества, в том числе остальных доминантных филумов.

Постановка задачи. Существует предположение, что новые гены изменяют состав корневых экзометаболитов, существуют доказательства того, что за изменением состава корневых экссудатов изменяется и структура ризосферного бактериального комплекса [4]. Накопленная информация по изучаемому вопросу достаточно противоречива: многие исследователи выявляли изменения [5–7], другие не находили достоверных различий [8, 9]. Также некоторые авторы высказывали скептическую точку зрения, что выявленные достоверные изменения сопоставимы с эффектом при смене возделывания сортов, полученных методами традиционной селекции [10]. Многие полученные результаты по данной теме, находящиеся в открытом доступе, противоречат друг другу. Еще, неоднозначность полученных результатов может быть вызвана составом экспрессионных векторов, используемых при трансформации, ведь практически везде в качестве гена-маркера используется устойчивость к антибиотикам. Дискуссия о безопасности генетически модифицированных растений остается открытой.

Целью настоящего исследования является оценка влияния генетически модифицированных растений томата с геном холиноксидазы *codA* на таксономическое разнообразие и структуру ризосферного микробиома.

Метод решения. Для проведения эксперимента в ФГБНУ ВНИИСБ (г. Москва) методом агробактериальной трансформации [11] получали трансгенные растения томата с геном синтеза холиноксидазы из актинобактерии *Arthrobacter globiformis*. В качестве контроля применяли исходную селекционную линию, выведенную на Селекционной станции им. Н.Н. Тимофеева (г. Москва), семена были любезно предоставлены Г.Ф. Монахосом. При трансформации использовали стандартный вектор pBI, содержащий целевой ген *codA* и маркерный *NPTII*. Растения микроклонально размножали на среде Мурасиге-Скуга в условиях *in vitro* [12]. После подтверждения трансгенности методом ПЦР по 3 растения высаживались в сосуды (300 мл) со стерильной смесью торфа и песка 3:1. Затем их пересаживали в сосуды с торфяной низинной окультуренной почвой на 20 недель (до начала массового цветения). Вегетация проходила в оранжерее при естественном освещении.

Молекулярно-генетический анализ. Подтверждение трансгенности растительного материала проводили с помощью ПЦР. Геномную ДНК выделяли из листовой ткани с помощью набора "ДНК-Экстрен-4" (ЗАО «Синтол», Россия). Условия амплификации соответствовали указанным авторами конструкции [11]. Использовали праймеры: CHL-For (5'-ACAACCTCTCCTGCATCATCATCGCCTTCT-3') и CHL-Rev (5'-GCATCAACAGCTTCGGCGTAT-3') (ЗАО «Синтол», Россия).

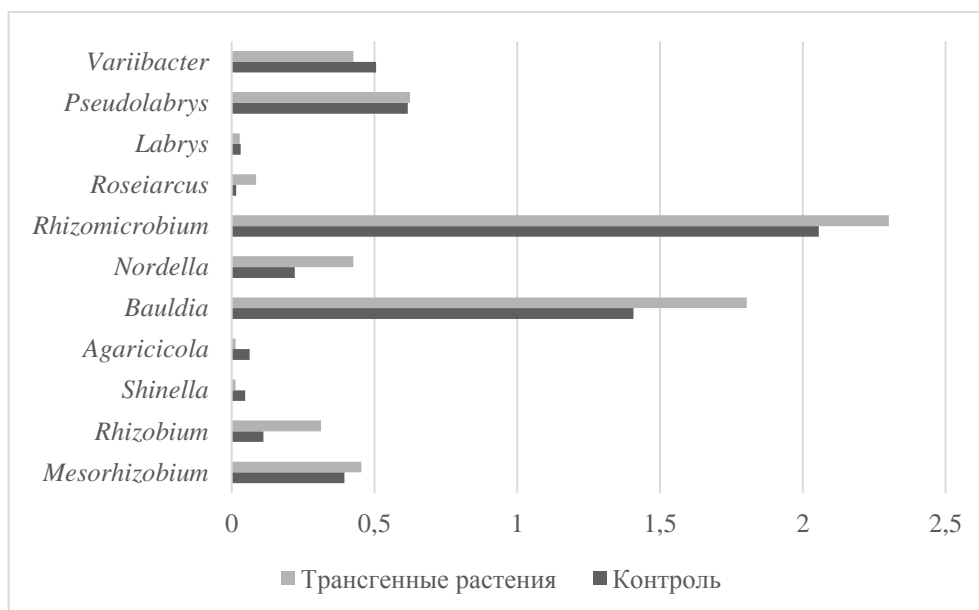
Метагеномный анализ почвы. Растения извлекали из сосудов вместе с почвой, отделяя крупные комья. Почву вручную стряхивали с корней, тщательно перемешивали и формировали усредненную пробу. Геномную ДНК выделяли с помощью набора FastDNA SPIN Kit for soil (MP Biomedicals, США), следуя рекомендациям производителя. Чтобы амплифицировать V3–V4 гипервариабельного участка гена 16S рибосомальной РНК использовали смесь праймеров GPro341F (5'-CCTACGGGNBGCASCAG-3') и GPro806R (5'-GGACTACNVGGGTWTCTAATCC-3') концентрацией 0,625 мкМ каждого. Амплификацию проводили в объеме 25 мкл, содержащей 5х KTN-mix (Евроген) 5 мкл, смесь праймеров 2 мкл, 5х SYBR (Евроген,

Россия) 0,5 мкл, в режиме реального времени на амплификаторе CFX96 Touch (Bio-Rad, США) при следующих условиях: 35 циклов: денатурация при 95 °С в течение 30 с, отжиг при 57 °С в течение 30 с, элонгация при 72 °С в течение 30 с; финальная элонгация при 72 °С в течение 5 мин.

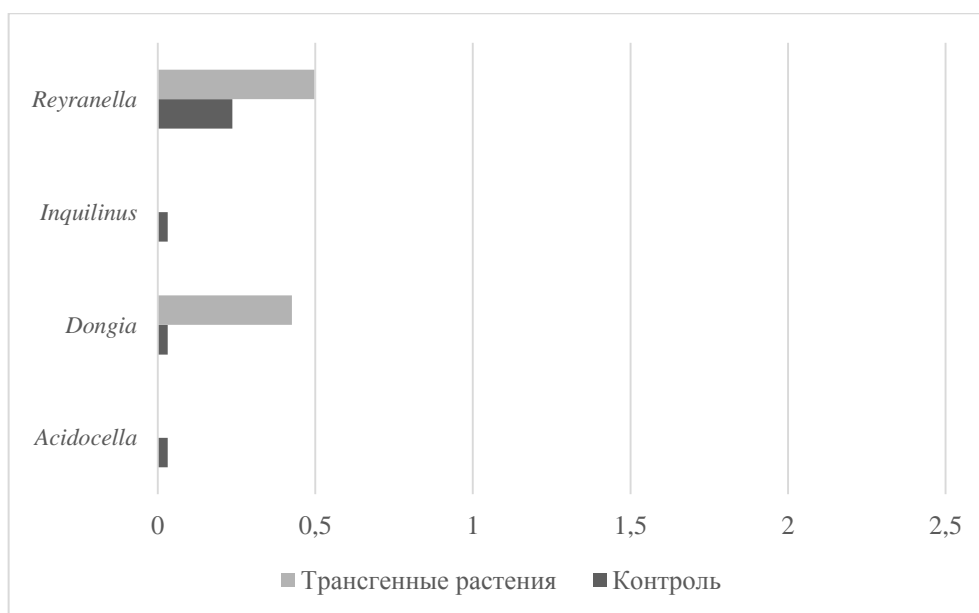
Синтез библиотек для секвенирования. Амплификацию ПЦР-продукта, полученного на первом этапе, проводили в объеме 25 мкл, состоящем из 5 мкл 5х смеси KTN (ЗАО «Евроген», Россия), 2 мкл смеси праймеров и 0,5 мкл 50х смеси SYBR (ЗАО «Евроген», Россия), в амплификаторе реального времени CFX96 Touch (Bio-Rad, США) при следующих условиях: денатурация праймеров – 3 мин при 95 °С; 7 циклов: денатурация – 30 с при 95 °С, отжиг – 30 с при 55 °С, элонгация – 30 с при 72 °С; финальная элонгация – 5 мин при 72 °С. Все манипуляции проводили по рекомендациям производителя: Nextera Index Kit (Illumina, США). Секвенирование проводили на платформе Illumina. После второго этапа ампликоны очищали с помощью магнитных частиц AMPure XP (KAPA Biosystems, США). Анализ библиотек проводили на секвенаторе Illumina MiSeq (Illumina, США) методом парного считывания, получая не менее 10 000 парных считываний для каждого образца, используя следующие реагенты: MiSeq Reagent Kit v2 nano и MiSeq Reagent Kit (500 Cycles PE) (Illumina, США). Результаты ампликонного секвенирования обрабатывались по алгоритму QIIME 1.9.1. Также применяли алгоритм классификации операционных таксономических единиц (ОТЕ) с открытым референсом (Open-reference OTU), при пороге классификации 97 % [3].

Анализ результатов. Рассмотрим изменения в структуре ризосферного микробиома трансгенных и контрольных растений томата на уровне родов. Установлено, что доминантным в почвенном микробном сообществе является филум *Proteobacteria*, представители которого выполняют важнейшие экологические функции, такие как симбиоз с растениями, паразитизм, продуцирование фитогормонов. Ранее был проведен анализ структуры доминирующих родов, относящихся к данному филуму. Доли преобладающих родов *Sphingomonas*, *Rhizomicrobium*, *Pseudolabris*, *Deviosia*, *Bauldia* варьируются от 2,1 до 6,7 %. В ризосферном комплексе трансгенных растений выявлено сокращение родов *Rhizomicrobium*, *Pseudolabris* и *Sphingomonas* на 0,6–1,2 %, а также увеличение долей *Deviosia* и *Bauldia* на 1,2–1,3 %. Внимание привлекло исчезновение из ризосферы генетически модифицированных растений родов *Sphingobium* и *Pedomicrobium* при обнаружении *Chryseolinea* и *Micavibrio*. Последние считаются хищными бактериями [3].

Так как структура филума *Proteobacteria* довольно объемна, более подробно рассмотрим ее на уровне порядков. В составе порядка *Caulobacterales* (класс *Alphaproteobacteria*) минимальные изменения: в ризосфере генномодифицированных растений сокращаются доли родов *Phenylobacterium* и *Caulobacter*, а *Brevundimonas* и *Asticcacaulis* – повышаются. Описанные роды являются типичными обитателями почв, часто встречаются на морских побережьях [13], а также могут являться условными патогенами [14]. Различия в структуре порядка *Hyphomonadales* минимальны: в ризосфере трансгенных растений наблюдается тенденция на увеличение доли рода *Woodsholea* и снижение *Hirschia* (семейство *Hyphomonadaceae*). Представители данного семейства являются солеустойчивыми и часто выделяются из морской воды и грунтов побережий [15]. Из-за минимальных различий в структуре порядка *Rhizobiales* можно заявить только о тенденции к снижению или возрастанию некоторых родов (рисунок 1). Стоит отметить, что в состав данного порядка входит множество азотфиксаторов, и от их количества в ризосфере зависит растительная продуктивность [16].

Рис. 1. Структура порядка *Rhizobiales* (филум *Proteobacteria*), %

Из состава порядка *Rhodospirillales* у трансгенных растений исчезают роды *Acidocella* (семейство *Acetobacteraceae*) и *Inquilinus* (*Rhodospirillaceae*) (рис. 2). Данные микроорганизмы способны утилизировать органические полимеры, в том числе ароматические соединения [17], и их исчезновение может затронуть циклы элементов питания в почве.

Рис. 2. Структура порядка *Rhodospirillales* (филум *Proteobacteria*), %

В структуре порядка *Sphingomonadales* не выявлено существенных изменений. Однако, так как в данном таксоне множество фототрофов [18], изменения в его структуре смогут повлиять на продуктивность растений.

В составе класса *Betaproteobacteria* из ризосферного комплекса трансгенных растений исчезают бактерии родов *Acidovorax* и *Delftia* (семейство *Comamonadaceae*), *Methylothera* (*Methylophilaceae*) (рис. 3). А также появляются новые члены сообщества,

не выявленные на контроле: *Pandoraea* (*Burkholderiaceae*), *Ramlibacter* (*Comamonadaceae*), *Herminiimonas* (*Oxalobacteraceae*). Среди исчезающих родов встречаются возбудители заболеваний растений [19] и митотрофы [20]. А среди вновь обнаруженных – деструкторы ксенобиотиков [21] и целлюлозы [22]. Можно сделать вывод, что изменения в структуре данного филума позволят трансгенным растениям быть более устойчивыми к биотическим и абиотическим стрессам.

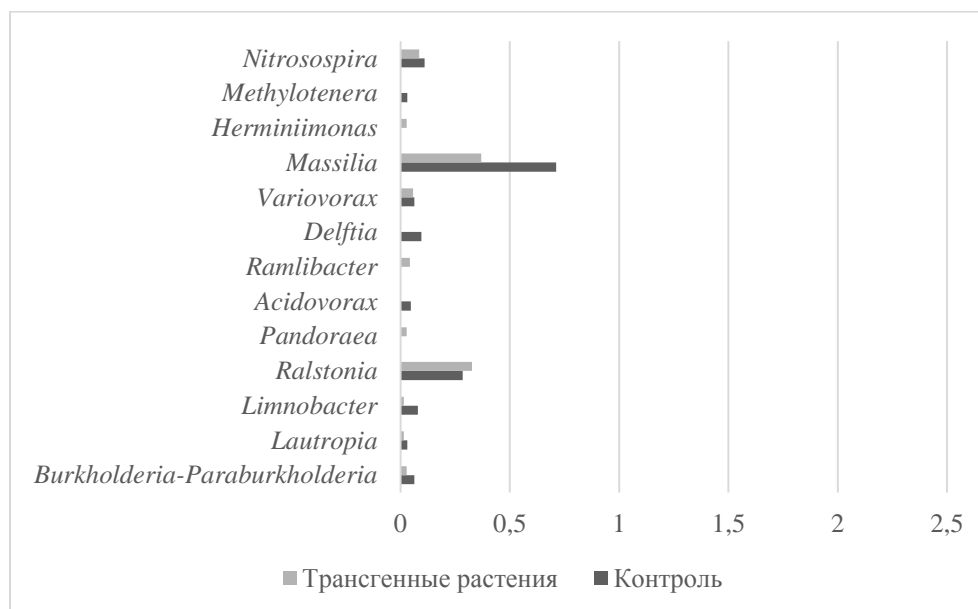


Рис. 3. Структура класса *Betaproteobacteria* (филум *Proteobacteria*), %

Из состава класса *Deltaproteobacteria* из ризосферного комплекса генномодифицированных томатов исчезают бактерии рода *Geobacter* (семейство *Geobacteraceae*) (рисунок 4). Данные микроорганизмы являются типичной почвенной микрофлорой и обладают целлюлозолитическими свойствами [22], и их исчезновение скорее всего повлияет на скорость деструкции опада в почве.

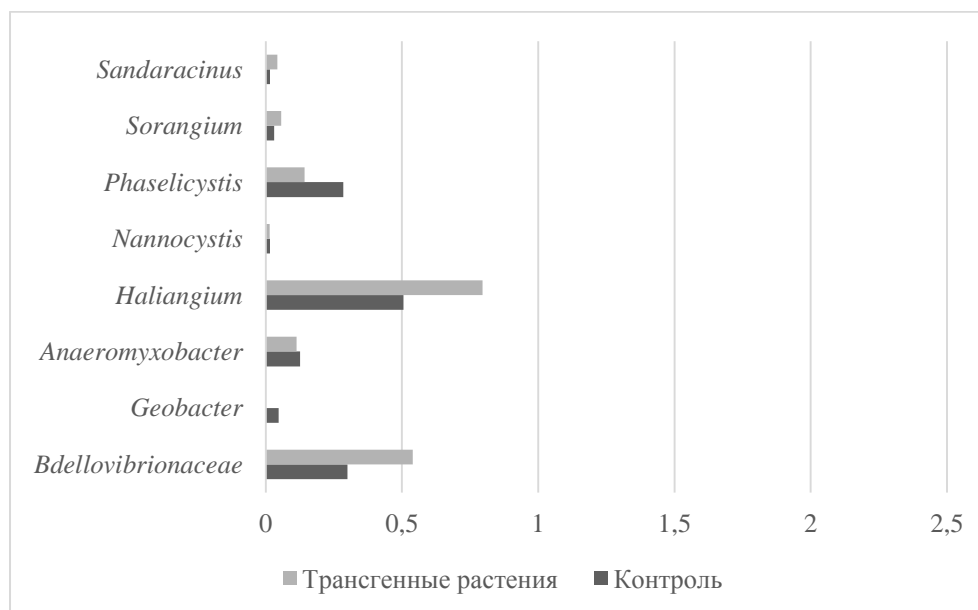


Рис. 4. Структура класса *Deltaproteobacteria* (филум *Proteobacteria*), %

У класса *Gammaproteobacteria* самые значимые изменения выявлены в порядке *Xanthomonadales* (рис. 5). Из ризосферного комплекса генетически модифицированных растений исчезают представители рода *Stenotrophomonas* – типичные микроорганизмы, которые являются азотфиксаторами и продуцентами антимикробных веществ и фитогормонов [23], но при этом выявляются новые – *Steroidobacter* и *Dyella* (семейство *Xanthomonadaceae*), которые являются почвенными и способны разлагать некоторые полимеры [24, 25]. Как уже было отмечено выше, данные изменения затрагивают разложение сложных органических веществ в почве и могут повлиять на устойчивость растений к стрессовым условиям. Также прослеживаются тенденции на увеличение долей родов *Rhodanobacter*, *Dokdonella* и *Luteimonas* (семейство *Xanthomonadaceae*).

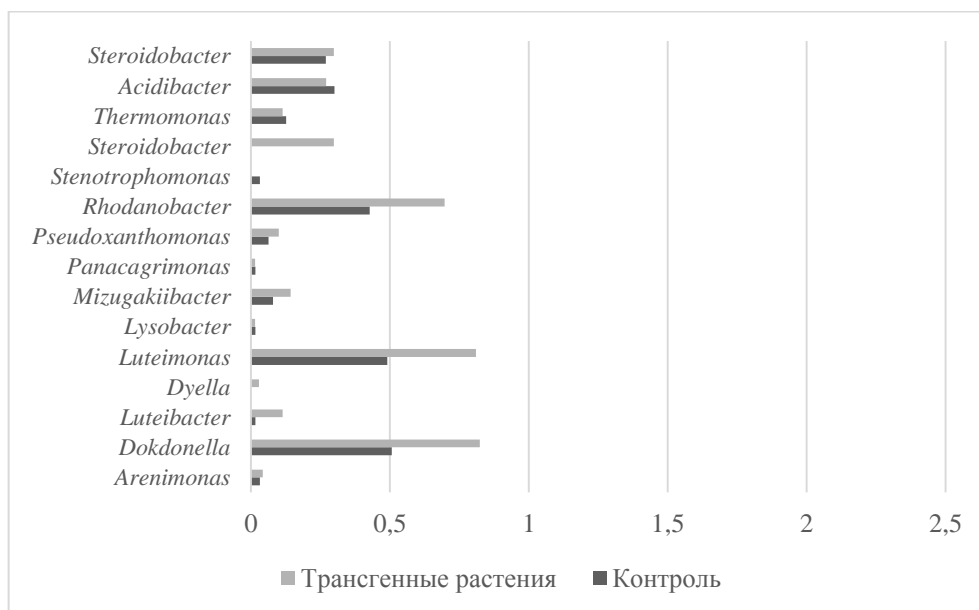


Рис. 5. Структура порядка *Xanthomonadales* (филум *Proteobacteria*), %

Среди остальных порядков, относящихся к классу *Gammaproteobacteria* выявлены следующие изменения: у трансгенных растений исчезает род *Aquicella* (семейство *Coxiellaceae*). Появляется тенденция на снижение доли pp. *Cellvibrio* (*Cellvibrionaceae*), *Pseudomonas* (*Pseudomonadaceae*) и *Acinetobacter* (*Moraxellaceae*). Первый род часто встречается в ризосфере растений и минеральных водах [26]. Остальные – типичная сапротрофная микрофлора [27].

Далее рассмотрим структуру филума *Bacteroidetes*, так как она довольно объемна, группировать будем по порядкам. В порядке *Cytophagales* из ризосферы трансгенных растений исчезают представители рода *Dyadobacter* (семейство *Cytophagaceae*), доли родов *Sporocytophaga*, *Cytophaga* и *Chryseolinea* существенно сокращаются (в 2 и более раз). Среди рода *Dyadobacter* присутствуют психротолерантные азотфиксаторы [28]. Остальные роды являются экологически важными активными деструкторами полисахаридов [29]. Подобные изменения, с одной стороны, дают трансгенным растениям конкурентное преимущество в виде доступного азота, но при этом в их ризосфере может замедляться разложение органических остатков.

В составе порядка *Flavobacteriales* из ризосферного комплекса трансгенных растений исчезает род *Chryseobacterium* (семейство *Flavobacteriaceae*), который широко распространен в природных экосистемах и в некоторых случаях является возбудителем госпитальных инфекций [30]. Доля рода *Moheibacter* (часто выделяется из компостов, природных объектов [31] увеличивается более, чем в 2 раза.

В составе порядка *Sphingobacteriales* (семейство *Chitinophagaceae*) у трансгенных растений исчезают представители родов *Mucilaginibacter*, *Niastella*, *Pedobacter*, *Phaeodactylibacter* (рис. 6). Указанные микроорганизмы являются широко распространенными в окружающей среде и часто выделяются из болот, морских вод и почв [32–34]. При этом у генетически модифицированных растений в комплексе появляется род *Heliimonas*, представители которого часто выявляются в грунтовых водах [35]. Доли остальных родов снижаются, кроме *Parafilimonas*, *Chitinophaga*, *Taibaiella*. Указанные организмы являются типичной эпифитной и ризосферной микрофлорой [36, 37]. Выявленные изменения в ризосферном микробиоме способны изменить доступность некоторых элементов питания в почве для растений.

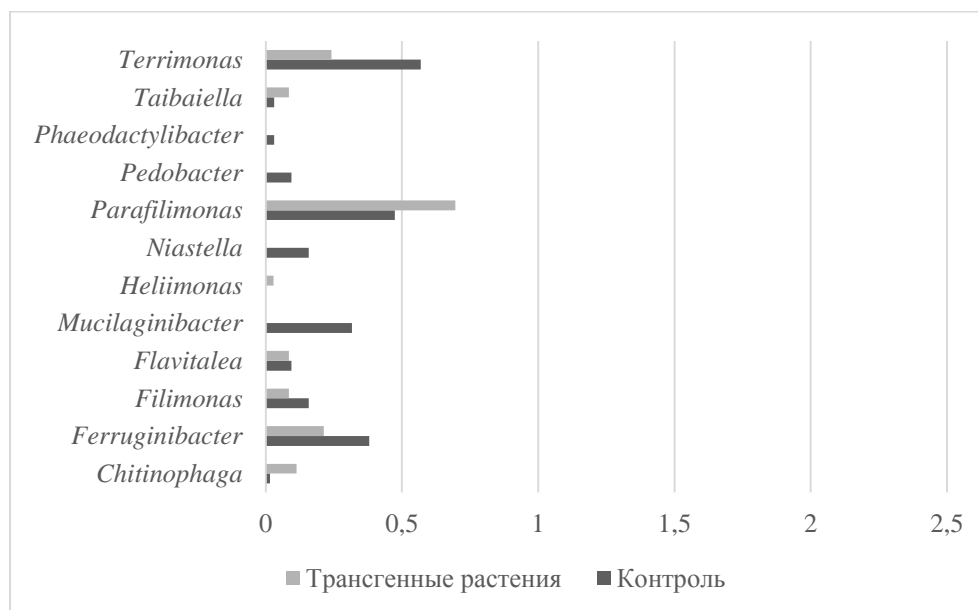


Рис. 6. Структура порядка *Sphingobacteriales* (филум *Bacteroidetes*), %

Довольно серьезные изменения происходят в структуре филума *Verrucomicrobia*. У трансгенных и контрольных растений выявленные культивируемые роды не пересекаются за исключением рода *Prostheco bacter*. На контроле выявлены только роды *Alterococcus*, *Opitutus* (семейство *Opitutaceae*), *Terrimicrobium* (*Chthoniobacterales Incertae Sedis*). Род *Alterococcus* является галофильным и умеренно термофильным [38]. *Opitutus* – анаэроб, часто встречающийся в рисовых чеках, а также активный деструктор полисахаридов растительного происхождения [39]. Представители рода *Terrimicrobium* также выделялись из рисовых чеков и обладает способностью ферментировать углеводы [40]. При этом в ризосфере трансгенных растений был обнаружен представитель рода (не выявлен на контроле) *Haloferula*, который является типичным обитателем морских экосистем [41]. Подобные изменения в структуре могут объяснить повышенную солеустойчивость трансгенных растений, но при этом распад органических остатков в почве под такими растениями может замедлиться.

Многие представители филума *Actinobacteria* выполняют важные экологические функции – являются продуцентами антибиотиков и гидролитических ферментов. Из комплекса ризосферы трансгенных растений исчезают (рисунок 7) роды *Gaiella* (семейство *Gaiellaceae*) и *Mycobacterium* (*Mycobacteriaceae*), первые обитают в минеральных водах [42], вторые же являются возбудителями многих заболеваний человека и животных, в том числе туберкулеза [43]. Некоторые роды, наоборот, обнаруживаются только у трансгенных растений: *Acidotherrmus* (семейство

Acidothermaceae), *Sporichthya* (*Sporichthyaceae*), *Arthrobacter* (*Micrococcaceae*), *Conexibacter* (*Conexibacteraceae*). Среди них есть целлюлозолитические формы [44], а также формы способные утилизировать и другие сложные углеводы [45]. Стоит отметить, что из *Arthrobacter globiformis* был выделен ген холиноксидазы, использовавшийся при модификации опытных растений. Доли большей части остальных родов сокращаются, при этом среди них встречаются важнейшие продуценты вторичных метаболитов [46]. Таким образом, изменения в актинобактериальном комплексе могут существенно улучшить устойчивость трансгенных растений к абиотическим стрессам, а также ускорить разложение органических веществ в прикорневой зоне, тем самым обеспечивая растениям конкурентное преимущество.

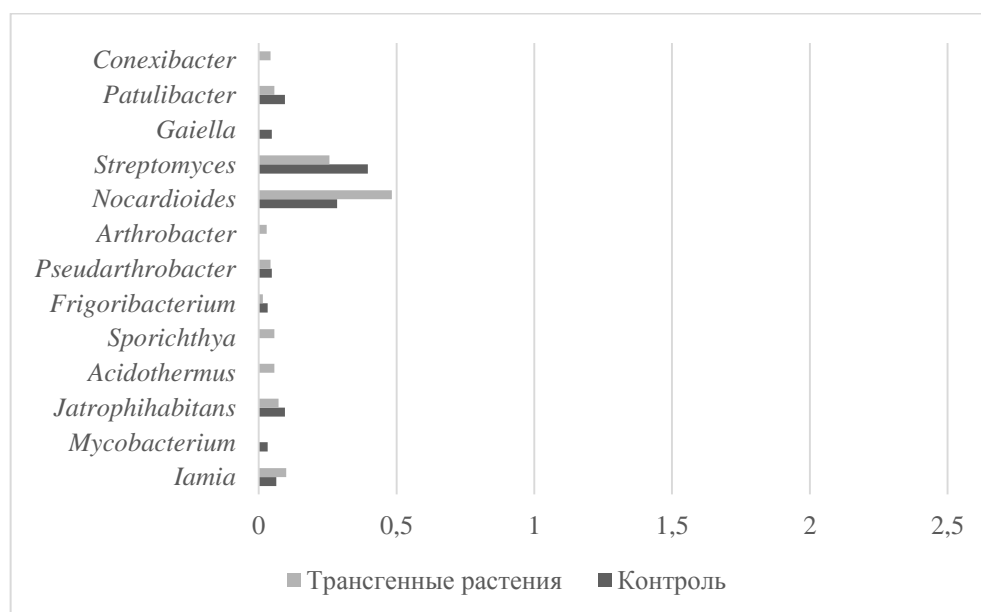


Рис. 7. Структура родов филума *Actinobacteria*, %

В филуме *Acidobacteria* в ризосферном комплексе трансгенных растений были обнаружены представители родов *Holophaga* (семейство *Holophagaceae*) и *Granulicella* (семейство *Acidobacteriaceae* (Subgroup 1)). При этом они не были выявлены на контроле. Представители рода *Holophaga* часто обитают в грязи и загрязненных пресноводных водоемах, обладают способностью разлагать ароматические соединения до органических кислот [47]. Его представители также представляют интерес для экологов, так как среди них обнаружено множество видов, разлагающих полимеры, их зона обитания – тундровые почвы и сфагновые болота [48]. Таким образом, в ризосфере трансгенных растений органические полимеры будут разлагаться гораздо быстрее.

Среди культивируемых форм в филуме *Chloroflexi* обнаружены только представители рода *Roseiflexus* (семейство *Roseiflexaceae*). Данные бактерии выявляются только у контрольных растений. Представители рода являются термофильными фототрофами, их часто выделяют из термальных минеральных вод [49]. Их наличие в ризосферном комплексе выглядит довольно странно, но может объяснять механизм устойчивости к засолению. В структуре филума *Gemmatimonadetes* не происходит серьезных изменений, примерно в 2 раза снижается доля рода *Gemmatimonas* (семейство *Gemmatimonadaceae*).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что генетически модифицированные растения томата с геном синтеза холиноксидазы могут оказывать воздействие на структуру ризосферного комплекса микроорганизмов. Исчезновение

многих деструкторов полисахаридов может в долгосрочной перспективе замедлить разложение органических веществ в почве. Также исчезают и возбудители заболеваний растений. При этом, в комплексе появляются новые деструкторы сложных органических полимеров, в том числе техногенного происхождения, что может нивелировать отрицательный эффект. Также среди вновь обнаруженных оказались солеустойчивые формы, а также продуценты фитогормонов и антимикробных соединений, что может отчасти объяснить усиление устойчивости таких растений к биотическим и абиотическим стрессам. Однако, по полученным данным нельзя дать ответа о безопасности подобных растений для почвенной микрофлоры. Требуются дополнительные исследования, в том числе и в сравнении с сортами, полученными методами традиционной селекции.

Выводы. Установлено, что различия в структуре ризосферного комплекса трансгенных и контрольных растений томата на уровне родов незначительны. Изменения составляют менее 1 %. Однако, из ризосферного комплекса трансгенных растений исчезли представители родов *Acidocella*, *Inquilinus*, *Acidovorax* и *Delftia*, *Methylothera*, *Geobacter*, *Stenotrophomonas*, *Aquicella* (филум *Proteobacteria*). В составе филума *Bacteroidetes* не выявлены роды *Dyadobacter*, *Chryseobacterium*, *Mucilaginibacter*, *Niastella*, *Pedobacter*, *Phaeodactylibacter*; филума *Verrucomicrobia* – *Alterococcus*, *Opitutus*, *Terrimicrobium*. Среди представителей филума *Actinobacteria* пропали pp. *Gaiella* и *Mycobacterium*; филума *Chloroflexi* – род *Roseiflexus*.

Также в составе ризосферного микробиома трансгенных растений обнаружены роды *Pandora*, *Ramlibacter*, *Herminiimonas*, *Steroidobacter*, *Dyella* (филум *Proteobacteria*). В структуре филума *Bacteroidetes* появляется род *Heliomonas*, филума *Verrucomicrobia* – р. *Haloferula*. У филума *Actinobacteria* выявили pp. *Acidothermus*, *Sporichthya*, *Arthrobacter*, *Conexibacter*; филума *Acidobacteria* – pp. *Holophaga* и *Granulicella*.

Учитывая, что многие исчезнувшие и вновь выявленные микроорганизмы выполняют важные экологические функции в почве, описанные изменения могут повлиять на скорость разложения органического вещества в почве, повлиять на стрессоустойчивость вегетирующих растений и доступность для них элементов питания.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУМ-2025-0003 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mishra, V. Ribosome inactivating proteins – an unfathomed biomolecule for developing multi-stress tolerant transgenic plants / V. Mishra, R. Mishra, R. S. Shamra // International Journal of Biological Macromolecules. – 2022. – Vol. 210. – P. 107–122.
2. Chouhan, R. Overexpression of PR proteins with chitinase activity in transgenic plants for alleviation of fungal pathogenesis / R. Chouhan, S. Ahmed, S. G. Gandhi // Journal of Plant Pathology. – 2023. – Vol. 105, No. 1. – P. 69–81.
3. Структура бактериального сообщества ризосферы трансгенных растений томата (*Solanum lycopersicum* L.) / А. А. Антонов, А. А. Ванькова, Е. Н. Баранова и др. // Теоретическая и прикладная экология. – 2025. – № 1. – С. 151–157. DOI: 10.25750/1995-4301-2024-4-151-157
4. Allocation, stress tolerance and carbon transport in plants: how does phloem physiology affect plant ecology? / J. A. Savage, M. J. Clearwater, D. F. Haines et al. // Plant, Cell & Environment. – 2016. – Vol. 39. – P. 709–725.
5. Широких, И. Г. Изменение структуры комплексов актиномицетов в ризосфере трансгенных по гену Fe-COD 1 линий томата (*Solanum lycopersicum* L., *Solanaceae*, *Solanales*) / И. Г. Широких, Я. И. Назарова, С. Ю. Огородникова, Е. Н. Баранова // Поволжский экологический журнал. – 2016. – № 3. – С. 341–351.
6. Effects of drought-tolerant Ea-DREB2B transgenic sugarcane on bacterial communities in soil / X. Zhao, Y. Jiang, Q. Liu et al. // Frontiers in Microbiology. – 2020. – Vol. 11. – P. 704.
7. Impact of genetically modified crops and their management on soil microbially mediated plant nutrient transformations / P. P. Motavalli, R. J. Kremer, M. Fang, N. E. Means // Journal of Environmental Quality. – 2004. – Vol. 33. – P. 816–824.

8. Impact of β -carotene transgenic rice with four synthetic genes on rhizosphere enzyme activities and bacterial communities at different growth stages / P. Li, J. Dong, S. Yang et al. // *European Journal of Soil Biology*. – 2014. – Vol. 65. – P. 40–46.
9. Effects of T4 lysozyme release from transgenic potato roots on bacterial rhizosphere communities are negligible relative to natural factors / H. Heuer, R. M. Kroppenstedt, J. Lottmann et al. // *Applied and Environmental Microbiology*. – 2002. – Vol. 68, No. 3. – P. 1325–1335.
10. Actinomycetes in the prokaryotic complex of the rhizosphere of oats in a soddy-podzolic soil / I. G. Shirokikh, G. M. Zenova, O. V. Merzaeva et al. // *Eurasian Soil Science*. – 2007. – Vol. 40, No. 2. – P. 158–162.
11. Применение бактериального гена синтеза осмотика для адресной защиты хлоропласта трансгенных растений при абиотическом стрессе / А. А. Гулевич, Л. В. Куренина, Г. Н. Ралдугина, Е. Н. Баранова // *Механизмы регуляции функций органелл эукариотической клетки*. – 2018. – С. 30.
12. Murashige, T. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue culture / T. Murashige, F. Skoog // *Physiologia Plantarum*. – 1962. – Vol. 15. – P. 473–497.
13. Oh, Y. S. *Phenylobacterium muchangponense* sp. nov., isolated from beach soil, and emended description of the genus *Phenylobacterium* / Y. S. Oh, D. H. Roh // *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. – 2012. – Vol. 62, Pt. 4. – P. 977–983.
14. Ryan, M. P. *Brevundimonas* spp.: emerging global opportunistic pathogens / M. P. Ryan, J. T. Pembroke // *Virulence*. – 2018. – Vol. 9, No. 1. – P. 480–493.
15. Abraham, W. R. The family *Hyphomonadaceae* / W. R. Abraham, M. Rohde // *The Prokaryotes*. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. – P. 283–299.
16. Rhizobiales as functional and endosymbiotic members in the lichen symbiosis of *Lobaria pulmonaria* L. / A. Erlacher, T. Cernava, M. Cardinale et al. // *Frontiers in Microbiology*. – 2015. – Vol. 6. – Art. no. 53.
17. Jones, R. M. *Acidocella aromatica* sp. nov.: an acidophilic heterotrophic alphaproteobacterium with unusual phenotypic traits / R. M. Jones, S. Hedrich, D. B. Johnson // *Extremophiles*. – 2013. – Vol. 17, No. 5. – P. 841–850.
18. *Magnetospirillum sulfuroxidans* sp. nov., capable of sulfur-dependent lithoautotrophy and a taxonomic reevaluation of the order *Rhodospirillales* / V. V. Koziaeva, D. Y. Sorokin, T. V. Kolganova, D. S. Grouzdev // *Systematic and Applied Microbiology*. – 2023. – Vol. 46, No. 3. – Art. no. 126406.
19. Burdman, S. *Acidovorax citrulli*: generating basic and applied knowledge to tackle a global threat to the cucurbit industry / S. Burdman, R. O. N. Walcott // *Molecular Plant Pathology*. – 2012. – Vol. 13, No. 8. – P. 805–815.
20. *Methylotenera mobilis* gen. nov., sp. nov., an obligately methylamine-utilizing bacterium within the family *Methylophilaceae* / M. G. Kalyuzhnaya, S. Bowerman, J. C. Lara et al. // *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. – 2006. – Vol. 56, No. 12. – P. 2819–2823.
21. Comparative genomics of *Pandoraea*, a genus enriched in xenobiotic biodegradation and metabolism / C. Peeters, E. De Canck, M. Cnockaert et al. // *Frontiers in Microbiology*. – 2019. – Vol. 10. – Art. no. 2556.
22. Comparative genomic analyses of four novel *Ramlibacter* species and the cellulose-degrading properties of *Ramlibacter cellulosityticus* sp. nov. / M. Kang, G. Chhetri, I. Kim et al. // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12, No. 1. – Art. no. 21233.
23. Ghosh, R. *Stenotrophomonas* / R. Ghosh, S. Chatterjee, N. C. Mandal // *Beneficial Microbes in Agro-Ecology*. – Amsterdam: Academic Press, 2020. – P. 427–442.
24. The growth of *Steroidobacter agariperforans* sp. nov., a novel agar-degrading bacterium isolated from soil, is enhanced by the diffusible metabolites produced by bacteria belonging to *Rhizobiales* / M. Sakai, A. Hosoda, K. Ogura, M. Ikenaga // *Microbes and Environments*. – 2014. – Vol. 29, No. 1. – P. 89–95.
25. Wang, S. Microbial degradation of triclosan by a novel strain of *Dyella* sp. / S. Wang, Y. Yin, J. Wang // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2018. – Vol. 102, No. 4. – P. 1997–2006.
26. Simarmata, R. Rhizosphere bacteriome of *Allium cepa* after the application of chemical and endophyte-based fertilizer / R. Simarmata, T. Widowati, M. Christita et al. // *Acta Ecologica Sinica*. – 2023. – Vol. 43, No. 6. – P. 1138–1148.
27. Gardner, J. G. Polysaccharide degradation systems of the saprophytic bacterium *Cellvibrio japonicus* / J. G. Gardner // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. – 2016. – Vol. 32, No. 7. – P. 121.
28. Plant growth promoting potential of psychrotolerant *Dyadobacter* sp. for pulses and finger millet and impact of inoculation on soil chemical properties and diazotrophic abundance / S. Kumar, D. C. Suyal, M. Bhoriyal, R. Goel // *Journal of Plant Nutrition*. – 2018. – Vol. 41, No. 8. – P. 1035–1046.
29. The FPase properties and morphology changes of a cellulolytic bacterium, *Sporocytophaga* sp. JL-01, on decomposing filter paper cellulose / X. Wang, Z. Peng, X. Sun et al. // *The Journal of General and Applied Microbiology*. – 2012. – Vol. 58, No. 6. – P. 429–436.
30. Clinical and microbiological characteristics of *Chryseobacterium indologenes* bacteremia / Y. T. Lin, Y. Y. Jeng, M. L. Lin et al. // *Journal of Microbiology, Immunology and Infection*. – 2010. – Vol. 43, No. 6. – P. 498–505.
31. *Moheibacter stercoris* sp. nov., isolated from an input sample of a biogas plant / T. Schauss, H. J. Busse, J. Golke et al. // *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. – 2016. – Vol. 66, No. 7. – P. 2585–2591.

32. Baik, K. S. *Mucilaginibacter rigui* sp. nov., isolated from wetland freshwater, and emended description of the genus *Mucilaginibacter* / K. S. Baik, S. C. Park, E. M. Kim et al. // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2010. – Vol. 60, No. 1. – P. 134–139.
33. *Pedobacter arcticus* sp. nov., a facultative psychrophile isolated from Arctic soil, and emended descriptions of the genus *Pedobacter*, *Pedobacter heparinus*, *Pedobacter daechungensis*, *Pedobacter terricola*, *Pedobacter glucosidilyticus* and *Pedobacter lentus* / Z. Zhou, F. Jiang, S. Wang et al. // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2012. – Vol. 62, Pt. 8. – P. 1963–1969.
34. *Phaeodactylibacter xiamenensis* gen. nov., sp. nov., a member of the family *Saprospiraceae* isolated from the marine alga *Phaeodactylum tricornutum* / Z. Chen, X. Lei, Q. Lai et al. // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2014. – Vol. 64, Pt. 10. – P. 3496–3502.
35. *Helimonas saccharivorans* gen. nov., sp. nov., a member of the family Chitinophagaceae isolated from a mineral water aquifer, and emended description of *Filimonas lacunae* / T. Leandro, L. Franca, M. F. Nobre et al. // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2013. – Vol. 63, Pt. 10. – P. 3793–3799.
36. *Taibaiella smilacinae* gen. nov., sp. nov., an endophytic member of the family Chitinophagaceae isolated from the stem of *Smilacina japonica*, and emended description of *Flaviumibacter petaseus* / L. Zhang, Y. Wang, L. Wei et al. // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2013. – Vol. 63, Pt. 10. – P. 3769–3776.
37. *Chitinophaga oryziterrae* sp. nov., isolated from the rhizosphere soil of rice (*Oryza sativa* L.) / E.J. Chung, T. S. Park, C. O. Jeon, Y. R. Chung // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2012. – Vol. 62, Pt. 12. – P. 3030–3035.
38. Shieh, W. Y. *Alterococcus agarolyticus*, gen. nov., sp. nov., a halophilic thermophilic bacterium capable of agar degradation / W. Y. Shieh, W. D. Jean // Canadian Journal of Microbiology. – 1998. – Vol. 44, No. 7. – P. 637–645.
39. Chin, K. J. *Opitutus terrae* gen. nov., sp. nov., to accommodate novel strains of the division 'Verrucomicrobia' isolated from rice paddy soil / K. J. Chin, W. Liesack, P. H. Janssen // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2001. – Vol. 51, No. 6. – P. 1965–1968.
40. *Terrimicrobium sacchariphilum* gen. nov., sp. nov., an anaerobic bacterium of the class 'Spartobacteria' in the phylum Verrucomicrobia, isolated from a rice paddy field / Y. L. Qiu, X. Z. Kuang, X. S. Shi et al. // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2014. – Vol. 64, Pt. 5. – P. 1718–1723.
41. Directed evolution of a β -N-acetylhexosaminidase from *Haloferula* sp. for lacto-N-triose II and lacto-N-neotetraose synthesis from chitin / Y. Liu, Q. Yan, J. Ma et al. // Enzyme and Microbial Technology. – 2023. – Vol. 164. – Art. no. 110177.
42. *Gaiella occulta* gen. nov., sp. nov., a novel representative of a deep branching phylogenetic lineage within the class Actinobacteria and proposal of *Gaiellaceae* fam. nov. and *Gaiellales* ord. nov. / L. Albuquerque, L. França, F. A. Rainey et al. // Systematic and Applied Microbiology. – 2011. – Vol. 34, No. 8. – P. 595–599.
43. Reconstituting the genus *Mycobacterium* / C. J. Meehan, R. A. Barco, Y. H. E. Loh et al. // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2021. – Vol. 71, No. 9. – Art. no. 004922.
44. Complete genome of the cellulolytic thermophile *Acidothermus cellulolyticus* 11B provides insights into its ecophysiological and evolutionary adaptations / R. D. Barabote, G. Xie, D. H. Leu et al. // Genome Research. – 2009. – Vol. 19, No. 6. – P. 1033–1043.
45. Normand, P. *Sporichthya* / P. Normand, D. R. Benson // Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria. – 2015. – P. 1–4.
46. Streptomyces: The biofactory of secondary metabolites / K. Alam, A. Mazumder, S. Sikdar et al. // Frontiers in Microbiology. – 2022. – Vol. 13. – Art. no. 968053.
47. Genome sequence of the homoacetogenic bacterium *Holophaga foetida* type strain (TMBS4T) / I. Anderson, B. Held, A. Lapidus et al. // Standards in Genomic Sciences. – 2012. – Vol. 6, No. 2. – P. 174–184.
48. Pankratov, T. A. *Granulicella paludicola* gen. nov., sp. nov., *Granulicella pectinivorans* sp. nov., *Granulicella aggregans* sp. nov. and *Granulicella rosea* sp. nov., acidophilic, polymer-degrading acidobacteria from *Sphagnum* peat bogs / T. A. Pankratov, S. N. Dedysch // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2010. – Vol. 60, No. 12. – P. 2951–2959.
49. Biogeography of thermophilic phototrophic bacteria belonging to *Roseiflexus* genus / V. A. Gaisin, D. S. Grouzdev, Z. B. Namsaraev et al. // FEMS Microbiology Ecology. – 2016. – Vol. 92, No. 3. – P. 012.

Поступила в редакцию 13.10.2025 г.

ANALYSIS OF RHIZOSPHERE MICROBIAL COMPLEX STRUCTURE OF TRANSGENIC TOMATO PLANTS WITH THE CHOLINE OXIDASE GENE

A. A. Antonov, A. A. Vankova, E. N. Baranova, A. A. Gulevich, L. V. Kurenina, E. V. Platonova

Cultivation of transgenic plants poses a threat to soil microflora. Genetically modified tomato plants with the choline oxidase gene have been found to have a greater species diversity. Despite the similarity of the phylum structure, many genera disappear from the rhizosphere of transgenic plants and new ones, not detected in

the control, appear. Significant changes were found in the phyla *Actinobacteria* and *Proteobacteria*. In the former, polysaccharide destructors *Acidothermus* (family *Acidothermaceae*), *Sporichthya* (*Sporichthyaceae*), *Arthrobacter* (*Micrococcaceae*), *Conexibacter* (*Conexibacteraceae*) were found, with the disappearance of *Gaiella* (family *Gaiellaceae*) and *Mycobacterium* (*Mycobacteriaceae*). In the phylum *Proteobacteria*, complex polymer destructors *Acidocella* (family *Acetobacteraceae*) and *Inquilinus* (*Rhodospirillaceae*) disappeared; However, xenobiotic utilizers *Pandora* have emerged. In the long term, these changes may affect the rate of decomposition of plant litter and the availability of nutrients to plants.

Keywords: transgenic plants; tomato; rhizosphere; microorganisms; choline oxidase.

Антонов Алексей Алексеевич

аспирант кафедры микробиологии и иммунологии, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия. E-mail: antonov4B@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-7684-0503

Antonov Alexey Alexeevich

graduate student of department of microbiology and immunology, Russian State Agrarian University – MTAA, Moscow, Russia.

Ванькова Анна Андреевна

кандидат биологических наук, доцент кафедры микробиологии и иммунологии, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.
E-mail: avankova@rgau-msha.ru
ORCID: 0000-0001-5473-9714

Vankova Anna Andreevna

candidate of biological sciences, associate professor of department of microbiology and immunology, Russian State Agrarian University – MTAA, Moscow, Russia.

Баранова Екатерина Николаевна

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории клеточной биологии ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», г. Москва, Россия.
Доцент кафедры микробиологии и иммунологии, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия.
E-mail: greenpro2007@rambler.ru
ORCID: 0000-0001-8169-9228

Baranova Ekaterina Nikolaevna

candidate of biological sciences, leading researcher at the Laboratory of Cell Biology, All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russia.
Associate professor of department of microbiology and immunology, Russian State Agrarian University – MTAA, Moscow, Russia.

Гулевич Александр Анатольевич

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории клеточной инженерии ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», г. Москва, Россия. E-mail: a_gulevich@mail.ru
ORCID: 0000-0003-4399-2903

Gulevich Aleksandr Anatolyevich

candidate of biological sciences, senior researcher at cell engineering laboratory, All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russia.

Куренина Людмила Владимировна

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории генетической инженерии растений, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», г. Москва, Россия.
Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, г. Москва, Россия.
E-mail: ludmila.kur2208@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5359-8665

Kurenina Ludmila Vladimirovna

candidate of biological sciences, leading researcher at the laboratory of plant genetic engineering, All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russia.

Платонова Екатерина Владимировна

научный сотрудник ООО «НПП Биосфера», г. Москва, Россия.
E-mail: ix.ti.andr@mail.ru
ORCID: 0009-0000-7666-5453

Platonova Ekaterina Vladimirovna

researcher at LLC «NPP Biosfera», Moscow, Russia.

ВЛИЯНИЕ КОФЕИНА НА НЕКОТОРЫЕ ПОВЕДЕНЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АЛКОГОЛИЗИРОВАННЫХ САМЦОВ БЕЛЫХ КРЫС С РАЗНЫМ УРОВНЕМ ТРЕВОЖНОСТИ

© 2025. Г. А. Балакирева, Е. А. Балакирева

Кофеин, вводимый алкоголизированным особям, усиливает индуцированные этанолом тенденции у некоторых подгрупп крыс: анксиогенную у самцов с исходно средним и низким уровнями тревожности; угнетение исследовательского поведения у животных с крайними уровнями тревожности и двигательного – у нетревожных особей. Кроме того, кофеин нивелирует антидепрессивный эффект 14-дневного введения этанола у крыс с исходно средним и высоким уровнями тревожности. Вводимый в комбинации с этанолом кофеин меняет направленность изменения тревожности высокотревожных самцов и оказывает разнонаправленное влияние на проявления эмоциональности.

Ключевые слова: тревожность; активность; депрессивность; эмоциональность; алкоголизация; кофеин.

Введение. Этанол и кофеин – одни из самых известных психоактивных веществ, изолированное влияние которых на животный организм широко известно [1, 2]. Вопросы сочетанного действия данных веществ до сих пор остаются дискуссионными в силу противоречивости имеющихся в специальной литературе данных. Этот факт обуславливает необходимость исследований в области реакции животного организма на висцеральном и психофизиологическом уровнях на комбинированное воздействие этанола и кофеина. Стимулирующее действие данных веществ в ЦНС направлено на систему подкрепления головного мозга [3]. В литературе есть указания на то, что эффекты на высшие функции ЦНС этанола и кофеина определяются способами их введения и дозировкой. Малые дозы данных веществ, по данным исследователей, стимулируют моторную активность экспериментальных животных, в то время как большие дозы, напротив, приводят к значительному сокращению проявлений моторики и психоэмоционального состояния в целом [4–6].

Проблемы, связанные с индивидуальной восприимчивостью живых организмов к фармакологическим препаратам, по-прежнему актуальны. Выявление механизмов, лежащих в основе этой восприимчивости, даст возможность оптимизировать методы терапии психоэмоциональных нарушений, спровоцированных различными факторами. Однако, исследования в данной области, использующие фенотипический подход, встречаются в научной литературе крайне редко. В связи с этим, изучение индивидуальной реакции животных на фармакологические вещества остается важной задачей. Понимание принципов этой реакции поможет разработать более действенные методы коррекции психоэмоционального состояния, изменяющегося на фоне влияния различных факторов (стрессовых, фармакологических).

В рамках проведенного комплексного исследования был проведен эксперимент, целью которого явился анализ влияния кофеина на аффективную сферу алкоголизированных самцов крыс, имеющих различный уровень тревожности.

Методика эксперимента. Исследование было выполнено в соответствии с «Руководством по уходу и использованию лабораторных животных» (публикация Национального института здоровья № 85-23, США) и «Руководством по экспериментальному (доклиническому) изучению новых фармакологических веществ» [7]

на 60 самцах беспородных белых крыс массой 180–220 г. Все животные содержались в виварии в стандартных условиях. Все манипуляции с подопытными крысами проводились в первой половине дня. Для оценки аффективного состояния животных использовалась батарея стандартных поведенческих тестов, в которых оценивались некоторые психоэмоциональные показатели. Так, тревожность определялась в приподнятом крестообразном лабиринте (ПКЛ) по времени пребывания особи на открытом пространстве лабиринта и частоте повторных выходов на него [8]. Депрессивность определялась в тесте Порсолта по суммарному времени неподвижности и количеству периодов замираний [7]. Кроме того, в условиях данного теста определяли эмоциональность по количеству фекальных болюсов. Исследовательская и двигательная активность определялась в норковой камере по суммарному количеству вертикальных стоек и заглядываний в отверстия-норки, и количеству пересеченных квадратов, соответственно [9].

В рамках проведенного исследования использовалась следующая схема эксперимента: после исходного (контрольного) тестирования в условиях батареи поведенческих тестов животные были разделены по сигмальному отклонению [10] на средне-, высоко- и низкотревожных особей в зависимости от того, какие результаты они показали в ПКЛ. Для исследования влияния кофеина («Кофеин-Бензоат натрия», Борисовский завод медицинских препаратов, РФ, 100 мг/кг, 14 дней, в/бр [11]) на эффекты длительной алкоголизации (10 %-ным раствором этанола из расчета 2 г/кг, 14 дней, в/бр [12]) каждую из этих трех подгрупп разделили на 2 равные части. На одной исследовалось изолированное влияние этанола, а на другой – комбинированного действия этанола с кофеином. Затем крысы проходили повторное тестирование в батарее тестов, описанных выше. Выбор непараметрических методов для статистической обработки результатов эксперимента (U-критерий Манна-Уитни для независимых переменных и T-критерий Уилкоксона) обусловлен отсутствием подтверждения нормальности распределения в тесте Колмогорова-Смирнова. Принятый уровень значимости составлял 0,05.

Анализ результатов. Тестирование животных в исходных условиях позволило сформировать подгруппы, отличающиеся по уровню тревожности, и составить их поведенческий профиль, который представлен в таблице 1. Следует отметить, что больше половины из подопытных особей показали средний уровень тревожности (СТ).

Таблица 1
Показатели поведения в батарее тестов у животных, отличающихся по уровню тревожности, в исходных условиях ($\bar{X} \pm m$)

Поведенческие показатели	Уровни тревожности		
	высокий (n=12)	средний (n=32)	низкий (n=16)
Результаты тестирования в приподнятом крестообразном лабиринте			
Открытые рукава, с	70,2±3,15#	106,4±6,55	179,4±9,81#*
Количество выходов в открытое пространство	3,1±0,34	2,5±0,20	1,8±0,24#*
Результаты тестирования в открытом поле			
Исследовательская активность	24,8±3,54	23,5±2,91	17,6±1,46#*
Двигательная активность	24,7±3,66	28,4±3,19	25,6±4,12
Результаты тестирования в тесте Порсолта			
Время неподвижности, с	65,7±5,16	55,4±5,61	47,3±6,37*
Общее количество периодов неподвижности	28,1±2,13#	22,6±2,15	19,7±1,52*
Количество фекальных болюсов	5,8±0,34#	6,9±0,55	4,6±0,53#*

– различия статистически значимы в сравнении значений показателей условного контроля (средний уровень тревожности) с группами высокого и низкого уровня тревожности; * – различия статистически значимы при сравнении значений показателей групп с крайними типами выраженности тревожности.

Анализ фиксируемых показателей показал следующее. Низкотревожные (НТ) крысы реже остальных самцов ($p < 0,05$) выходили повторно на открытое пространство лабиринта. Кроме того, данной подгруппе самцов свойственна минимальная исследовательская активность в норковой камере и низкая эмоциональность в сравнении с остальными подгруппами тревожности. У высокотревожных особей (ВТ) выявлено максимальное количество замираний в тесте Порсолта. По проявлениям двигательной активности и частоте занывиваний разнотревожные особи не отличаются.

Характер проявленных животными внутригрупповых отличий свидетельствует о наличии у них индивидуальных особенностей, касающихся рецепторного профиля и разной степени активности ферментативных процессов, протекающих в моноаминергических системах мозга, что является генетически детерминированным явлением [12–14].

Анализ влияния кофеина на эффекты длительной алкоголизации у разнотревожных самцов белых крыс показал следующее. Так, установлено, что кофеин, вводимый алкоголизированным ВТ самцам (рис. 1, Б), оказал анксиогенный эффект на особей данной подгруппы (суммарное время пребывания на открытом пространстве ПКЛ сократилось в 3,5 раза ($p < 0,05$) относительно исходных значений), в то время как изолированное введение этанола, напротив, снизило тревожность у ВТ крыс (в 1,8 раза, $p < 0,05$) (см. рис. 1, А). У среднетревожных самцов кофеин усилил анксиогенное действие алкоголизации (в 5,3 раза ($p < 0,05$) сократилось значение показателя тревожности относительно условного контроля), а на НТ самцов значимо не повлиял. Как видно из фрагментов А и Б рисунка 2, у средне- и низкотревожных особей характер изменения частоты повторных выходов на открытое пространство согласуется с описанными выше тенденциями. Однако, полученные результаты по данному показателю в ВТ подгруппе после алкоголизации несколько противоречат ожидаемым: на фоне увеличения суммарного времени пребывания животных на открытом пространстве после алкоголизации у них полностью прекратились повторные выходы на него (см. рис. 2, А).

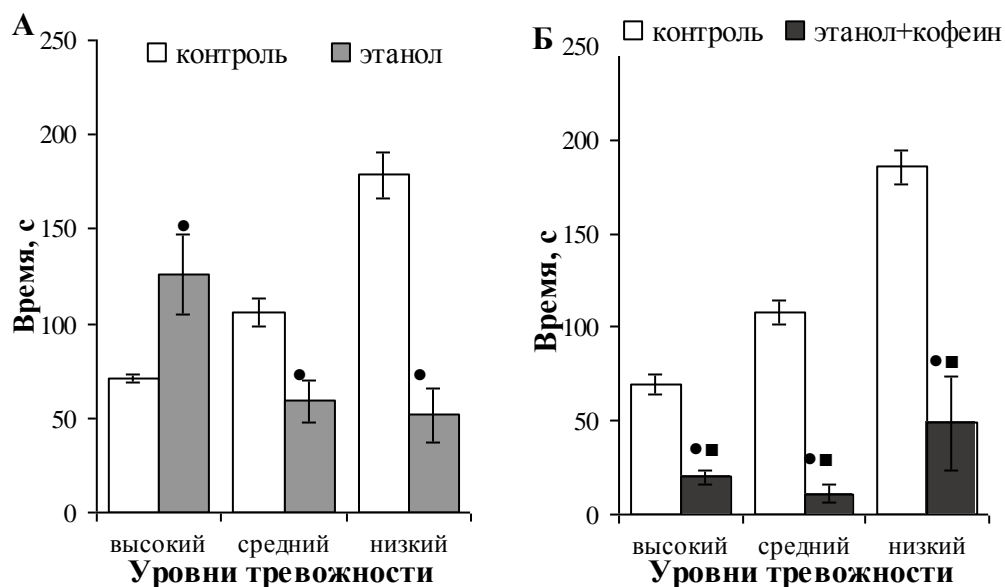


Рис. 1. Характер влияния алкоголизации (А) и комбинированного введения этанола и кофеина (Б) на суммарное время пребывания на открытом пространстве лабиринта у самцов белых крыс, отличающихся по уровню тревожности.

● – различия статистически значимы при сравнении с исходными значениями; ■ – различия статистически значимы при сравнении результатов комбинированного воздействия этанола и кофеина с результатами, полученными после алкоголизации.

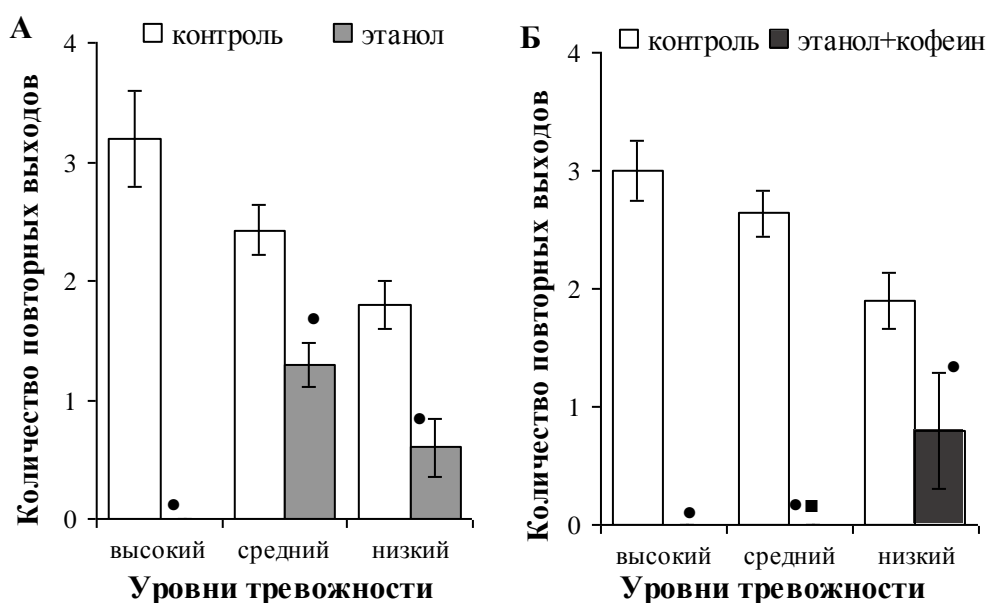


Рис. 2. Характер влияния алкоголизации (А) и комбинированного введения этанола и кофеина (Б) на количество повторных выходов на открытое пространство лабиринта у самцов белых крыс, отличающихся по уровню тревожности.

• – различия статистически значимы при сравнении с исходными значениями; ■ – различия статистически значимы при сравнении результатов комбинированного воздействия этанола и кофеина с результатами, полученными после алкоголизации.

Как показали проведенные исследования, у ВТ и СТ самцов в норковой камере кофеин усиливал индуцированное этанолом угнетение исследовательского поведения и двигательной активности. Так, если у ВТ особей на фоне алкоголизации ИА сократилась в 10,6 раза ($p < 0,05$), а ДА – в 8,9 раза ($p < 0,05$) относительно исходных значений (фрагменты А рис. 3 и 4), то комбинированное воздействие этанола и кофеина привело к сокращению проявлений исследовательского поведения в 31,8 раза ($p < 0,05$) и двигательной активности в 10,9 раза ($p < 0,05$) у особей данной подгруппы (см. фрагменты Б рис. 3 и 4). У исходно нетревожных самцов кофеин полностью ингибировал проявления исследовательского поведения, в то время как ДА сократилась в 13,4 раза ($p < 0,05$), а изолированное введение этанола сократило двигательную активность только в 5,4 раза ($p < 0,05$) в сравнении с исходными значениями. Чувствительность исследовательского и двигательного поведения у среднетревожных алкоголизированных особей к кофеину отсутствовала.

В тесте Порсолта кофеин не повлиял на депрессогенный эффект этанола в подгруппе НТ самцов (рис. 5), но полностью нивелировал антидепрессивное действие этанола у особей с исходно высоким и средним уровнем тревожности. Описанные эффекты вводимых препаратов подтверждаются характером изменения частоты актов неподвижности у ВТ и НТ крыс (рис. 6). Вместе с тем, комбинированное воздействие кофеина и этанола привело к увеличению количества замираний у СТ крыс в 1,4 раза относительно исходных значений ($p < 0,05$), в то время как изолированное введение этанола сократило значения показателя в 1,7 раза ($p < 0,05$).

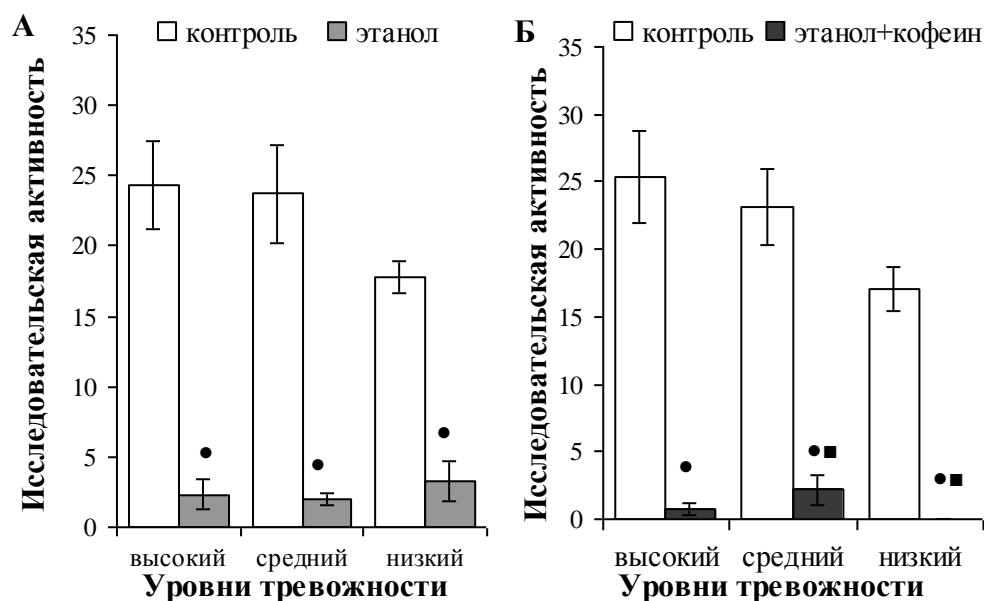


Рис. 3. Характер влияния алкоголизации (А) и комбинированного введения этанола и кофеина (Б) на исследовательскую активность у самцов белых крыс, отличающихся по уровню тревожности.

• – различия статистически значимы при сравнении с исходными значениями; ■ – различия статистически значимы при сравнении результатов комбинированного воздействия этанола и кофеина с результатами, полученными после алкоголизации.

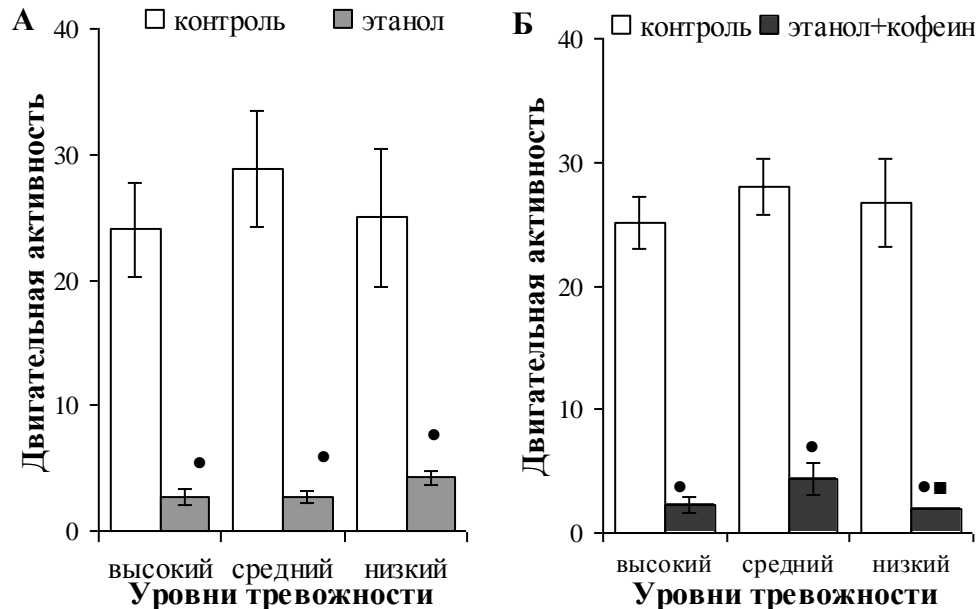


Рис. 4. Характер влияния алкоголизации (А) и комбинированного введения этанола и кофеина (Б) на двигательную активность у самцов белых крыс, отличающихся по уровню тревожности.

• – различия статистически значимы при сравнении с исходными значениями; ■ – различия статистически значимы при сравнении результатов комбинированного воздействия этанола и кофеина с результатами, полученными после алкоголизации.

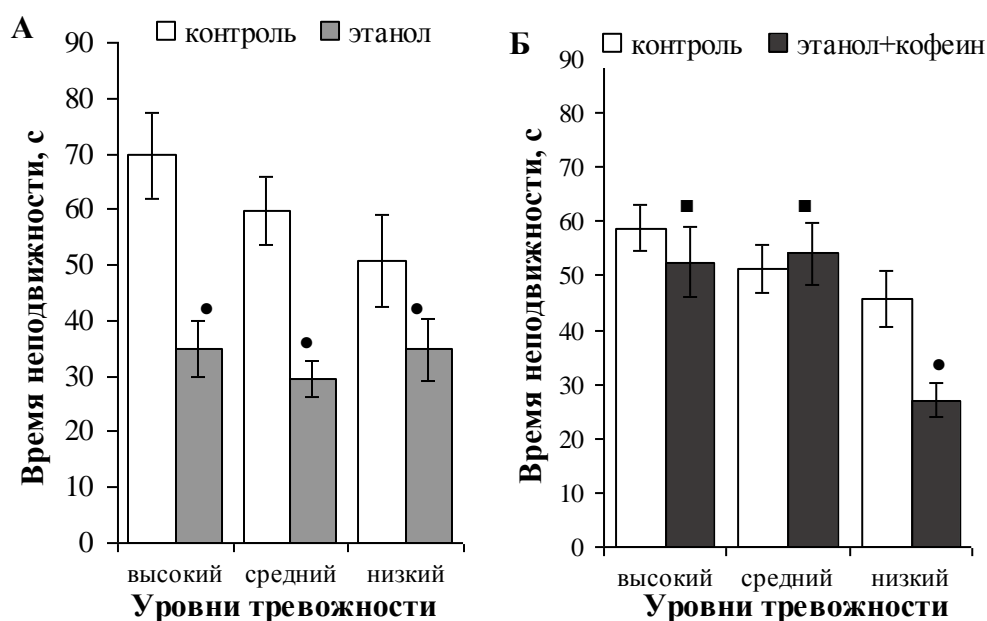


Рис. 5. Характер влияния алкоголизации (А) и комбинированного введения этанола и кофеина (Б) на суммарное время неподвижности в тесте Порсолта у самцов белых крыс, отличающихся по уровню тревожности.

● – различия статистически значимы при сравнении с исходными значениями; ■ – различия статистически значимы при сравнении результатов комбинированного воздействия этанола и кофеина с результатами, полученными после алкоголизации.

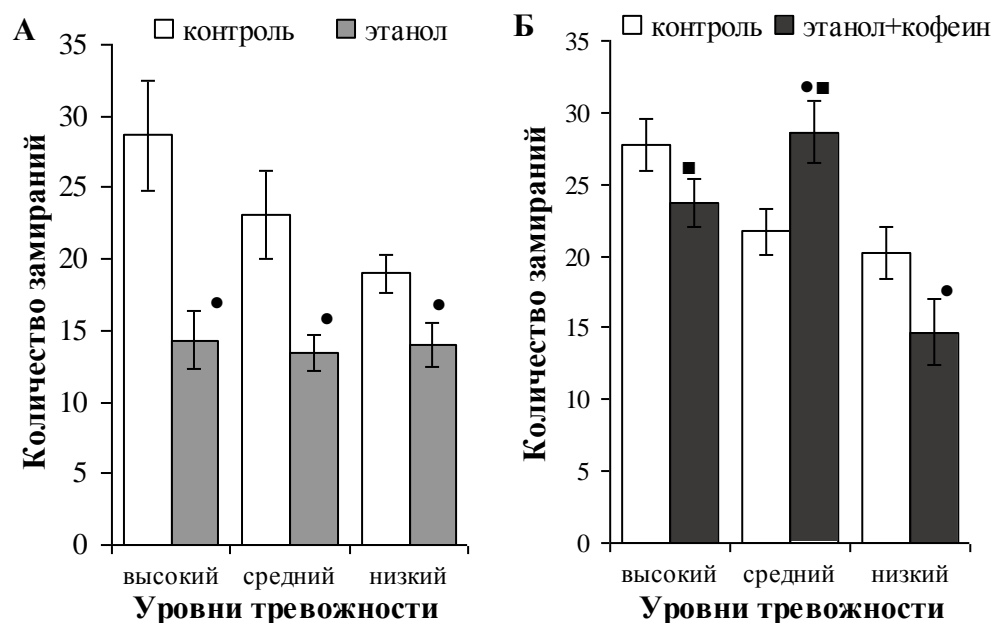


Рис. 6. Характер влияния алкоголизации (А) и комбинированного введения этанола и кофеина (Б) на общее количество периодов неподвижности в тесте Порсолта у самцов белых крыс, отличающихся по уровню тревожности.

● – различия статистически значимы при сравнении с исходными значениями; ■ – различия статистически значимы при сравнении результатов комбинированного воздействия этанола и кофеина с результатами, полученными после алкоголизации.

Четырнадцатидневное введение этанола не оказало статистически значимого влияния на эмоциональность у ВТ и СТ самцов (рис. 7, А). Однако изолированно вводимый этанол стимулировал проявления данного показателя у нетревожных в контроле крыс в 1,5 раза ($p<0,05$). Комбинированное воздействие кофеина и этанола не повлияло на этанолиндуцированный рост эмоциональности. Однако обращает на себя внимание разнонаправленное влияние кофеина на эмоциональность алкоголизированных высокотревожных (угнетение в 1,8 раза ($p<0,05$)) и среднетревожных (стимуляция в 1,3 раза ($p<0,05$)) особей (см. рис. 7, Б).

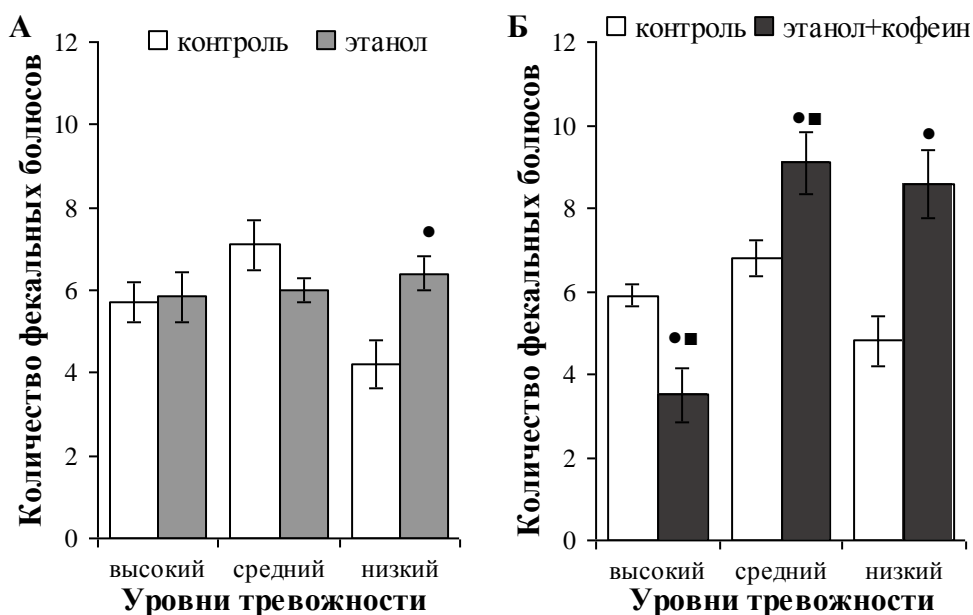


Рис. 7. Характер влияния алкоголизации (А) и комбинированного введения этанола и кофеина (Б) на эмоциональность в тесте Порсолта у самцов белых крыс, отличающихся по уровню тревожности.

● – различия статистически значимы при сравнении с исходными значениями; ■ – различия статистически значимы при сравнении результатов комбинированного воздействия этанола и кофеина с результатами, полученными после алкоголизации.

Индукцированное двухнедельным введением этанола увеличение тревожности, которое показано у СТ и НТ животных в условиях ПКЛ не согласуется с некоторыми имеющимися в литературе данными, в которых отмечается анксиолитический эффект хронической алкоголизации [15, 16]. Вместе с тем, большинство имеющихся в литературе данных указывают на анксиогенное воздействие как изолированного влияния этанола [17, 18], так и его комбинированного введения с кофеином [6, 18]. В целом, это подтверждает полученные нами описанные выше результаты. Подобная направленность изменения тревожности у экспериментальных животных может быть обусловлена стимуляцией кофеином аденозиновых рецепторов, что сказывается на активности ГАМК-ергической системы мозга, а также влиянием самого этанола на ГАМК-ергическую медиацию.

Поведенческий дефицит, возникающий в норковой камере у крыс после 14-дневного введения этанола, подтверждается исследовательскими группами Гольдиной И.А. [19], Fernandez G.M. [20] и Кудрина В.С. [21], которые также наблюдали значительное сокращение локомоторных реакций, характеризующих исследовательское поведение и двигательную активность животных. В исследованиях

нашей лаборатории, проведенных ранее, также указывалось на существенное угнетение под влиянием длительного введения этанола данных форм поведения [22–24]. Усиление описанных тенденций при комбинированном воздействии обоих психоактивных веществ может быть обусловлено потенцированием эффектов психоактивных веществ на структуры мозга, имеющие отношение к регуляции моторного и исследовательского поведения животного [25].

Касательно изменения депрессивности, полученного в наших исследованиях, следует отметить, что сокращение депрессивности после алкоголизации, описанное выше, противоречит результатам исследований Тригуб М.М. [26], Башкатовой В.Г. [27] и Getachew B. [17], которые указывали на депрессогенное воздействие длительного введения этанола на животных. По мнению авторов, это является следствием эффектов этанола на опиоидную систему, суть которых заключается в характере влияния алкоголизации на экскрецию медиаторов в терминалях аксонов. Влияние кофеина на депрессивность алкоголизированных особей может быть обусловлено как стимуляцией аденозиновых рецепторов, расположенных на моноаминергических нейронах [18], так и кофеининдуцированным увеличением плотности аденозиновых рецепторов [6].

Таким образом, полученные результаты расширяют представления как об изолированном воздействии этанола на аффективную сферу с учетом индивидуальных особенностей животного организма, так и его комбинированного влияния с кофеином.

Выводы.

1. Четырнадцатидневное введение этанола оказывает анксиогенный эффект на самцов с исходно средним (в 1,8 раза, $p < 0,05$) и низким (в 3,4 раза, $p < 0,05$) уровнем тревожности, которые усиливаются при комбинированном воздействии алкоголизации и кофеина, и анксиолитический (в 1,8 раза, $p < 0,05$) на высокотревожных особей. Кофеин инвертирует влияния алкоголизации у ВТ особей.

2. Кофеин значительно усиливает индуцированный алкоголизацией поведенческий дефицит у особей с крайними уровнями тревожности в норковой камере в 2,9 раза ($p < 0,05$) для исследовательского поведения и в 1,6 раза ($p < 0,05$) для двигательной активности и не влияет на данные формы поведения у среднетревожных животных.

3. Антидепрессивные эффекты длительной алкоголизации животных не определяются их индивидуально-типологическими особенностями и проявляются сокращением показателя депрессивности в 1,5–2,1 раза ($p < 0,05$). Введение кофеина нивелирует антидепрессивное действие этанола и не влияет на депрессивность исходно нетревожных особей.

4. Четырнадцатидневная алкоголизация стимулирует (в 1,5 раза, $p < 0,05$) эмоциональность у низкотревожных самцов и не влияет на эмоциональность остальных животных. Кофеин не влияет на эмоциональность алкоголизированных НТ особей. У ВТ крыс кофеин сокращает (в 1,8 раза, $p < 0,05$) проявления эмоциональности, а у СТ – стимулирует (в 1,3 раза, $p < 0,05$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кароматов И.Д. Кофе и медицина (физиология, эпидемиология и клиника) / И.Д. Кароматов, Д.А. Очилова, Б.О. Комилова, М.М. Гиязова. – Москва: Издательский дом Академии Естествознания, 2021. – 113 с.
2. Бадун Е.Г. Изменение микроэлементного состава органов и тканей при алкогольной интоксикации / Е.Г. Бадун // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 5. Экономика. Социология. Биология. – 2021. – Т. 11 (3). – С. 133-144.
3. Zanettini C. Effects of endocannabinoid system modulation on cognitive and emotional behavior / C. Zanettini, L.V. Panlilio, M. Alicki et al. // Front Behav Neurosci. – 2011. – Sep 13. – P. 57.

4. Товчига О.В. Влияние экстракта и настойки сныти обыкновенной (*Aegorodium podagraria* L.) на поведенческие реакции мышей на фоне введения кофеин-бензоата натрия / О.В. Товчига, С.Ю. Штриголь, О.А. Баля // Клиническая фармация. – 2018. – Т. 22, № 3. – С. 29-37.
5. Влияние острого введения разных доз кофеина на поведенческие показатели взрослых крыс / В.Г. Башкатова, Е.В. Алексеева, Н.Г. Богданова, Г.А. Назарова // Наркология. – 2017. – Т. 16, № 12. – С. 9-13.
6. Судаков С.К. Некоторые аспекты нейрохимических эффектов кофеина / С.К. Судаков, В.Г. Башкатова // Наркология. – 2015. – Т. 14, № 6. – С. 72-78.
7. Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств / Под ред. А.Н. Миронова, Н.Д. Бунатян. – Москва: Минздрав РФ, ЗАО «Гриф и К», 2012. – 944 с.
8. Kudryavtseva N. Social defeats, depression and anxiety / N. Kudryavtseva // Behavioural Pharmacology. – 1995. – V. 6, No 1. – P. 59
9. Буреш Я. Методики и основные эксперименты по изучению мозга и поведения / Я. Буреш, О. Бурешова, Д.П. Хьюстон. – Москва: Медицина, 1991. – 399 с.
10. Шаляпина В.Г. Изменение приспособительного поведения активных и пассивных крыс вistar в водно-иммерсионной модели депрессии / В.Г. Шаляпина, Е.А. Вершинина, В.В. Ракицкая // Журнал ВНД им. И.П. Павлова. – 2006. – Т. 56, № 4. – С. 543-547.
11. Балакирева Г. А. Влияние кофеина на поведенческие эффекты двухнедельной алкоголизации самцов белых крыс с разным уровнем депрессивности / Г. А. Балакирева, Е. А. Балакирева // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2023. – Т. 9, № 2. – С. 12-28. – DOI: 10.29039/2413-1725-2023-9-2-12-28.
12. Индутный А.В. Метаболические предпосылки интолерантности к алкоголю в условиях стресса. Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. – Омск, 1997. – 22 с.
13. Sergutina A.V. The effects of L-DOPA on glutamate dehydrogenase activity in the cerebral neurons of rats with different motor activities / A.V. Sergutina // Neurochemical Journal. – 2010. – V. 4, No 1. – P. 25-29.
14. Исмаилова Х.Ю. Индивидуальные особенности поведения (моноаминергические механизмы) / Х.Ю. Исмаилова, Т.М. Агаев, Т.П. Семенова. – Баку: Нурлан, 2007. – 228 с.
15. Hofman L. Alcohol dependence: a commentary on mechanisms / L. Hofman, B. Tabakoff // Alcohol and Alcoholism. – 1996. – V. 31, No 4. – P. 333-340.
16. Бородкина Л.Е. Хроническая алкоголизация и ГАМК-ергическая система / Л.Е. Бородкина, И.Н. Тюреньков, В.В. Ковтун // Экспер. и клинич. фармакол. – 2002. – Т. 65, № 3. – С. 75-79.
17. Alcohol-induced depressive-like behavior is associated with cortical norepinephrine reduction / B. Getachew, S.R. Hauser, R.E. Taylor, Yo. Tizabi // Pharmacol. Biochem. Behav. – 2010. – V. 96, No 4. – P. 395-401.
18. Сочетанное употребление кофеина и этанола увеличивает предпочтение алкоголя у самок крыс / Е.О. Кучер, А.Ю. Егоров, Е.В. Филатова, К.О. Кулагина // Наркология. – 2010. – № 12. – С. 37-40.
19. Протекторные свойства экстракта куркумы при этанолиндукцированных нарушениях поведения / И.А. Гольдина, Е.В. Маркова, Б.Г. Гольдин и др. // Саратовский научно-медицинский журнал. – 2017. – Т. 13, № 1. – С. 131-135.
20. Fernandez G.M. Chronic drinking during adolescence predisposes the adult rat for continued heavy drinking neurotrophin and behavioral adaptation after long-term, continuous ethanol exposure / G.M. Fernandez, W.N. Stewart, L.M. Savage // PLoS One. – 2016. – V. 11, No 3. – P. 1-24.
21. Изучение поведенческих и нейрохимических эффектов гимантана на динамику гиперлокомоторной реакции, индуцированной этанолом, у мышей линии DBA/2 / В.С. Кудрин, А.В. Надорова, В.Б. Наркевич, Л.Г. Колик // Нейрохимия. – 2018. – Т. 35, № 1. – С. 62-69.
22. Фролова Г.А. Оценка корректирующего влияния сульпирида на поведенческие нарушения алкоголизированных самцов белых крыс с разным уровнем депрессивности / Г.А. Фролова // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. – 2019. – Т. 63, № 2. – С.19-28.
23. Фролова Г.А. Поведенческие эффекты блокирования D2/D3-рецепторов дофамина у алкоголизированных самцов белых крыс с разным уровнем поведенческой активности / Г.А. Фролова // Крымский журнал экспериментальной и клинической медицины. – 2017. – Т. 7, № 4. – С. 75-84.
24. Фролова Г.А. Модификации тревожного поведения у алкоголизированных самцов белых крыс с дисбалансом андрогенов при стимуляции дофаминергической системы мадопаром / Г.А. Фролова, А.В. Четверик, А.К. Парамонова // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. – 2019. – Т. 5, № 4. – С. 182-200.
25. Чухно С.Д. Влияние кофеина на двигательную активность и рабочую память крыс. / С.Д. Чухно, Е.М. Лесова // Известия Российской Военно-медицинской академии. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 186-188.

26. Effect of peripheral opioid receptor agonists on depressive activity of ethanol / M.M. Trigub, N.G. Bogdanova, A.A. Kolpakov et al. // Bulletin of Experimental Biology and Medicine. – 2014. – V. 156, No 6. – P. 778-780.
27. Введение агониста каппа-опиоидных рецепторов предупреждает изменения двигательной активности и метаболизм крыс, вызванные острым введением этанола / В.Г. Башкатова, С.К. Судаков, М.М. Тригуб и др. // Академический журнал Западной Сибири. – 2014. – Т. 10, № 50. – С. 57-58.

Поступила в редакцию 08.12.2025 г.

EFFECT OF CAFFEINE ON SOME BEHAVIORAL INDICATORS OF ALCOHOLIZED MALE WHITE RATS WITH DIFFERENT LEVELS OF ANXIETY

G. A. Balakireva, E. A. Balakireva

Caffeine administered to alcoholized individuals enhances the ethanol-induced tendencies in some subgroups of rats: the anxiolytic in males with initially moderate and low levels of anxiety; the depression of exploratory behavior in animals with extreme levels of anxiety and motor in non-anxious individuals. In addition, caffeine mitigates the antidepressant effect of 14-day ethanol administration in rats with initially moderate and high levels of anxiety. When combined with ethanol, caffeine changes the direction of anxiety in high-anxiety males and has a multidirectional effect on emotional behavior.

Keywords: anxiety; depression; activity; emotionality; alcoholization; caffeine.

Балакирева Галина Александровна

кандидат биологических наук, доцент;
доцент кафедры физиологии и биофизики
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: g.a.balakireva@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7736-0245
Author ID: 1052090

Balakireva Galina Aleksandrovna

Candidate of Biological Sciences, docent;
associate Professor of the Department of Physiology
and Biophysics,
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

Балакирева Елизавета Анатольевна

кандидат биологических наук;
доцент кафедры физиологии и биофизики
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: e.a.balakireva@mail.ru
ORCID: 0009-0003-2451-0750
Author ID: 1092459

Balakireva Elizaveta Anatoljevna

Candidate of Biological Sciences;
associate Professor of the Department of Physiology
and Biophysics,
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

О РАЗДЕЛЕНИИ ПО ДИАМЕТРУ МАГНИТОМАРКИРОВАННЫХ КЛЕТОК ПРИ ПОМОЩИ ПЛЕНОК С ПОЛОСОВОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

© 2025. А. А. Губарев, В. Н. Павлов, Ю. А. Легенький, С. В. Беспалова

В работе исследуется изменение режима движения магнитомаркированных клеток с уменьшением их диаметра. Для диаметров меньше или равного некоторой величине, D_{\min} , клетки совершают колебания, не превосходящие периода доменной структуры, λ . Для клеток диаметром больше D_{\min} клетки могут испытывать, при достаточно низкой частоте внешнего (управляющего) поля, перемещение на расстояния много большие периода доменной структуры. Исследуется механизм возникновения такого минимального диаметра. Получено соотношение подобия, связывающее λ , D_{\min} и толщину пленки, h .

Ключевые слова: магнитомаркированные клетки, градиентные магнитные поля, феррит-гранатовые плёнки, полосовая доменная структура, знакопеременный меандр.

Введение. Стремительный прогресс в области микрофлюидики в сочетании с растущим спросом на методы разделения клеток для биомедицинской диагностики привлекают значительное внимание исследователей. Разработка экономичных и миниатюрных микрофлюидных устройств с повышенной точностью обнаружения и пропускной способностью непростая, но актуальная задача [1, 2].

В молекулярной и клеточной биологии для точного исследования конкретных типов клеток требуется их выделение и сортировка. Благодаря использованию уникальных свойств клеток для их дифференциации возможна быстрая и точная сортировка с высокой эффективностью. Хотя традиционные методы позволяют эффективно сортировать клетки по их специфическим свойствам, микрофлюидные системы дают возможность улучшить показатели этого процесса. Это повышает избирательность при выделении целевых клеток из нескольких типов, а также чистоту и коэффициент извлечения, сохраняя при этом высокую пропускную способность [3].

Использование микрофлюидики для выделения, скрининга и инкубации клеток *in vitro* имеет такие преимущества, как высокая производительность и низкий уровень повреждения клеток, что может значительно упростить этапы подготовки к адаптивной клеточной терапии [1].

Разделение клеток в биомедицине — важнейший процесс для многих клинических и исследовательских задач. Среди различных методов манипулирования живыми клетками магнитные методы очень привлекательны благодаря своим многочисленным преимуществам, т. е. высокой эффективности, простоте, низкой стоимости и отсутствию необходимости в дорогостоящем оборудовании. Микрофлюидные устройства, использующие магнитофорез, показывают многообещающие результаты в области высокопроизводительного разделения биоклеток.

В работах [4–6] рассматривалось разделение парамагнитных частиц — шариков диаметром a — над системой цилиндрических магнитов. Теоретический анализ выполнялся на базе пространственно-двумерной модели, в которой напряженность двумерной системы (вдоль осей X и Z) цилиндрических магнитов (ось Z направлена перпендикулярно плоскости с цилиндрическими магнитами) задавалась в виде:

$H_s = (A \sin kx, 0, A \cos kx)$, а внешнее поле — в виде $H^e(t) = (H_0^e \sin \omega t, 0, H_0^e \cos \omega t)$; $k = 2\pi/d$, где d — расстояние между центрами магнитных цилиндров. Проверая (сканируя) диапазон частот экспериментально обнаружено, что для некоторых частот наблюдались колебания частиц с малой величиной параметра $\beta = a/d$, где a — диаметр шарообразной частицы, тогда как частицы с большим значением параметра β испытывали перемещения на значительные расстояния (транспорт). Также наблюдалась (зависящая от параметров) максимальная частота, выше которой транспорт частиц не наблюдался. Был предложен метод разделения биологических объектов при помощи их прикрепления к парамагнитным частицам. В [4] вместо системы цилиндрических магнитов предложена пленка с полосами пермаллоя, а разделение частиц основано на различии в силе, действующей на частицы, различающиеся диаметром или магнитной восприимчивостью. В [5] в случае пленки с полосовой доменной структурой экспериментально и при помощи численных расчетов получено, что с ростом частоты внешнего поля средняя скорость частиц вдоль поверхности пленки при больших частотах убывает почти экспоненциально. Это показывает, что разделение парамагнитных частиц по восприимчивости (при близких размерах) за счёт существования максимальной частоты транспорта (зависящей от восприимчивости частиц) обладает малой чувствительностью. Для решения задачи разделения частиц по диаметру в [6] продемонстрировано наличие движения частиц различного диаметра в противоположных направлениях. Проведенные нами экспериментальные исследования и моделирование показали, что такое движение, если и возможно, то только для очень специальных условий. Данное исследование стартовало с экспериментов, аналогичных описанным в работе [11], по исследованию особенностей транспорта магнитомаркированных (ММ) клеток разного размера. В эксперименте исследовалась транспортировка смеси дрожжевых клеток (средний диаметр 5 мкм, магнитная восприимчивость $\chi = 0,0011 \pm 0,0002$) и магнитомаркированных спор *Bacillus clausii* (длина ≈ 2 мкм, диаметр ≈ 1 мкм, магнитная восприимчивость $\chi = 0,0013 \pm 0,0002$), над плёнкой феррит-граната с полосовой доменной структурой (ПДС). При этом установлено, что можно подобрать параметры внешнего управляющего поля (частоту и амплитуду), при которых происходит транспорт ММ клеток с размерами 4–6 мкм над множеством доменов и колебания ММ спор *Bacillus clausii* в пределах одного домена. То есть для парамагнитных микрообъектов с близкой магнитной восприимчивостью, отличающихся размером, наблюдаются разные режимы движения, которые позволяют их сепарировать. Назовем минимальным диаметром парамагнитных микрочастиц (шарообразной формы) D_{\min} — диаметр, при котором (и меньше которого) частицы испытывают колебания в пределах ширины полосового домена, а с диаметрами больше D_{\min} испытывают транспорт — перемещения на расстояния больше периода полосовой доменной структуры λ .

Целью этого исследования было выяснение причины существования минимального диаметра и исследование его зависимости от толщины плёнки, периода полосовой доменной структуры, намагниченности доменов и напряженности внешнего магнитного поля (управляющего поля).

Моделирование. Работа опирается на модель, изложенную в [7]. На рис. 1 показана выбранная система координат. Вдоль оси Y домены имеют размеры много больше размеров вдоль оси X . Поэтому L_y в модели полагалось бесконечно большой. В этом приближении компоненты напряженности магнитного поля, создаваемого

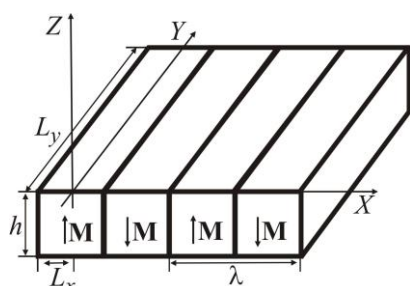


Рис. 1. Система координат

одним доменом, могут быть выражены в элементарных функциях, выражения (1) и (2). Высота частицы над поверхностью пленки (расстояние от пленки до нижнего края частицы) полагалась постоянной, Δz , (т.е. центр частицы имел постоянную высоту). Таким образом, для вычисления положения частицы требуется находить решение системы уравнений движения [7], получающуюся при её проектировании на ось X .

$$H_x(x, z) = -\frac{M}{4\pi} \ln \left[\frac{(x-L_x)^2 + z^2}{(x+L_x)^2 + z^2} \cdot \frac{(x+L_x)^2 + (z+h)^2}{(x-L_x)^2 + (z+h)^2} \right], \quad (1)$$

$$H_z(x, z) = -\frac{M}{2\pi} \left(\arctg \frac{x-L_x}{z} - \arctg \frac{x+L_x}{z} - \arctg \frac{x-L_x}{z+h} + \arctg \frac{x+L_x}{z+h} \right). \quad (2)$$

Внешнее поле имело вид

$$\mathbf{H}^e = (H_{x0} \operatorname{sgn}(\sin 2\pi vt), 0, H_{z0} \operatorname{sgn}(\sin 2\pi vt)) \equiv (H_x^e, 0, H_z^e), \quad (3)$$

где H_{x0} , H_{z0} — постоянные амплитуды, v — частота внешнего поля. Предполагалось, что полуширина домена зависит только от компоненты z внешнего поля (но на неё не влияет напряженность, создаваемая доменами)

$$L_x = \lambda/4 + \frac{\pi h}{2} \ln^{-1} \left(\operatorname{ch} \frac{\pi h}{\lambda} \right) \frac{H_z^e}{M}. \quad (4)$$

Полная напряженность равна сумме напряженностей доменов и внешнего поля

$$H_\alpha^f = H_\alpha^e + \sum H_\alpha. \quad (5)$$

Здесь α — это x или z . Если $H_{x0} = H_{z0}$ (следовательно, $H_x^e = H_z^e$), то (5) можно записать в виде

$$H_\alpha^f = H_\alpha^e f(x, z, h; M/H_z^e), \quad (6)$$

где функция f не меняется при фиксированном значении M/H_z^e и одновременном изменении x , z , h в k раз. В эксперименте использовались ММ клетки и шарообразные микрочастицы, чьи парамагнитные свойства образованы слоем наночастиц магнетита, размещенном в тонкой поверхностной оболочке. В связи с этим, для силы, действующей на парамагнитную частицу со стороны магнитного поля, использовалось две модификации (формулы (7) и (8))

$$\mathbf{F}^m = \frac{1}{2} \chi \mu_0 V \nabla H^{f^2} \quad (\text{дипольное приближение}), \quad (7)$$

$$\mathbf{F}^m = \frac{1}{2} \chi \mu_0 s \iint_s \nabla H^{f^2} d\sigma \quad (\text{интегрирование по сфере}), \quad (8)$$

где V — объём парамагнитной частицы; в (7) значение градиента берется в центре шара; интегрирование в (8) выполняется по сфере радиуса R_i , равном средней удалённости оболочки от центра шара; s — толщина оболочки. Здесь предполагается, что магнитная восприимчивость транспортируемых микрообъектов мала, поэтому магнитное поле слабо изменяется при помещении такого микрообъекта над поверхностью пленки.

Используя то, что $\partial H^{f^2} / \partial x = 2(H_x^f \partial H_x^f / \partial x + H_z^f \partial H_z^f / \partial x)$ и $H_z^e = H_x^e$, проекцию силы, действующую со стороны магнитного поля на парамагнитную частицу, можно представить в виде

$$F_x^m = CH_z^e g(x, z, h; M / H_z^e), \quad (9)$$

где g не меняется при фиксированном значении M / H_z^e и одновременном изменении x , z , h и λ в k раз, C — множитель, зависящий от магнитной восприимчивости частицы. Если считать, что $\Delta z = 0$, то из этого следует, что при изменении в k раз толщины пленки h и периода λ величина D_{\min} изменится в k раз. И поскольку F_x^m от h зависит слабо, то с высокой точностью при изменении λ в k раз, во столько же раз изменится D_{\min} .

При зависимости (3) имеется только два значения напряженности внешнего магнитного поля, которые действуют не нулевое время: с положительным значением компоненты z (обозначим через H_z^{e+}) и отрицательным значением (обозначим через H_z^{e-}). Этим значениям будут соответствовать два значения компонент напряженности, которые будем обозначать через H_α^+ и H_α^- . Учитывая то, что в условиях движения парамагнитных частиц инерционным слагаемым ($m\ddot{x}$) в уравнении движения можно пренебречь, анализ изменения характера движения с транспортировки на колебания можно провести наглядно.

Пусть, для определённости, в начальный момент времени ММ клетка имеет значение координаты x равное 60 мкм, где компонента магнитной силы F_x^m положительная, рис. 2, а–в. Под действием этой силы клетка будет двигаться вправо к точке А. Если до изменения значения внешнего поля (переключения внешнего поля) частица окажется в области, где значение F_x^m после переключения окажется положительным, то после переключения клетка продолжит двигаться вправо к точке В, рис. 2, а. Аналогично при следующем переключении, если точка достигнет области, где следующее значение F_x^m будет положительным, то клетка продолжит движение вправо. С уменьшением диаметра частицы (уменьшением расстояния от поверхности феррит-гранатовой пленки до центра частицы) изменяется зависимость $F_x^m(x)$. Для некоторого диаметра, обозначим его через D_{\min} , проекция силы $F_x^m(x)$ начинает в некоторой точке касаться оси абсцисс, рис. 2, б.

При дальнейшем уменьшении диаметра клетки появляются области, в которых оба значения F_x^m отрицательны. При диаметре частицы равном D_{\min} и меньше движение клетки в одном направлении переходит в колебания. Действительно, в таких случаях даже при частоте близкой к нулю после переключения новое значение F_x^m будет отрицательным, и направление движения изменится на противоположное. Если при следующем переключении клетка будет находиться вблизи точки В, где следующее значение вновь положительно, то клетка в очередной раз изменит направление своего движения, и вновь будет двигаться к точке А. Повторение этого процесса и приводит к колебаниям клетки.

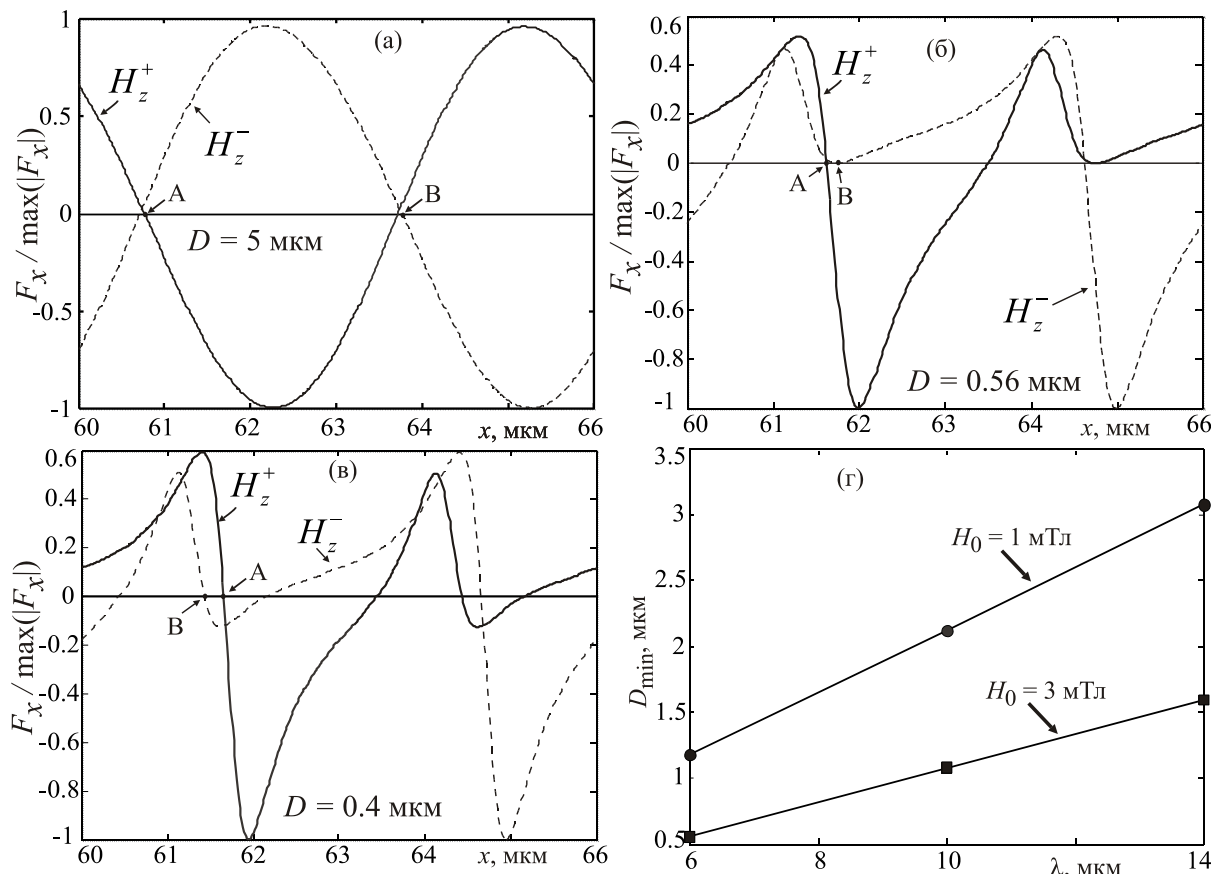


Рис. 2. (а), (б), (в) — зависимости проекции магнитной силы вдоль поверхности пленки при разной величине диаметра клетки, указан на рис. ($\lambda = 6 \mu\text{м}$, $H_0 = 3 \text{ мТл}$) и (г) — зависимость минимального диаметра от периода доменной структуры λ для двух значений H_0 . Значения параметров для приведенных результатов: $M = 20530,99 \text{ А/м}$, $h = 6,8 \mu\text{м}$.

Поскольку прекращение транспорта частиц происходит в случае касания F_x^m (множитель перед выражением для F_x^m не имеет значения), то при одновременном изменении λ и h в k раз и фиксированном значении M/H_z^e значение D_{\min} изменится в k раз.

При значениях h порядка $\lambda/2$ и малых значениях z второй множитель аргумента логарифма в (1), а также третье и четвертое слагаемые в (2) оказывают малое влияние на величину напряженности магнитного поля, также как и величина изменения L . Иными словами, напряженность слабо зависит от величины h . Следовательно, и D_{\min} слабо зависит от величины h . Рис. 2, г демонстрирует практически линейную зависимость D_{\min} от λ при фиксированном значении h для двух значений амплитуды внешней магнитной напряженности. Видно, что с увеличением H_0 уменьшается D_{\min} .

Рассмотрим причину, приводящую к возникновению минимального диаметра. Обозначим значение $H_\alpha \partial H_\alpha / \partial x$ при H_z^{e+} через $H_\alpha^+ \partial H_\alpha^+ / \partial x$, при H_z^{e-} — через $H_\alpha^- \partial H_\alpha^- / \partial x$, а при нулевом внешнем поле — через $H_\alpha^0 \partial H_\alpha^0 / \partial x$. При нулевом значении внешнего поля на больших удалениях центра частицы от поверхности $H_x \partial H_x / \partial x$ и $H_z \partial H_z / \partial x$ имеют близкие абсолютные значения и противоположны по знаку. На

периоде доменной структуры $H_x \partial H_x / \partial x$ и $H_z \partial H_z / \partial x$ имеют два максимума и два минимума, рис. 3, б₁. С уменьшением удаления центра частицы от пленки увеличивается абсолютная величина $H_x \partial H_x / \partial x$ в большей степени, чем $H_z \partial H_z / \partial x$, а вместе с этим увеличивается и их сумма — $\frac{1}{2} \partial H^2 / \partial x$, рис. 3, б₂.

С внешним полем H_z^{e+} в целом в первой половине периода доменной структуры значения $H_x \partial H_x / \partial x$ увеличиваются по абсолютной величине, а во второй уменьшаются, поскольку значения H_x увеличиваются в первой половине и уменьшаются во второй. Значения $H_z \partial H_z / \partial x$ в средней части уменьшаются по абсолютной величине, за счёт уменьшения абсолютных значений H_z в этой области, рис. 3, в₁. Это приводит к тому, что в средней части формируется минимум $\frac{1}{2} \partial H^2 / \partial x$ с отрицательными значениями, а на концах промежутка большие положительные значения, рис. 3, г₁. И наоборот, с внешним полем H_z^{e-} значение $H_x \partial H_x / \partial x$ увеличивается по абсолютной величине преимущественно на второй половине периода, а $H_z \partial H_z / \partial x$ в центральной части. (Горизонтальные отрезки на рис. 3, г — полуширины доменов с намагниченностью, направленной вверх (в положительном направлении оси Z)).

С уменьшением удаленности центра частицы от поверхности плёнки внешнее поле начинает оказывать меньшее влияние на значения напряженности, создаваемые доменами пленки. Значения $H_x \partial H_x / \partial x$, $H_z \partial H_z / \partial x$ в основном противоположны по знаку, первые превосходят вторые, а потому $\frac{1}{2} \partial H^2 / \partial x$ в основном повторяет форму $H_x \partial H_x / \partial x$.

С уменьшением величины диаметра (и, следовательно, уменьшением удаления центра клеток от пленки) $H_x \partial H_x / \partial x$ по абсолютной величине становится больше $H_z \partial H_z / \partial x$ на всём промежутке периодичности. Связано это с тем, что вблизи больших по модулю значений $H_z \partial H_z / \partial x$ значения H_z близки к нулю, тогда как для больших значений диаметра клетки это не так. Это в свою очередь связано с тем, что при меньших удалениях точки наблюдения поля от поверхности пленки величина H_z формируемая самой пленкой становится по модулю много больше величины внешнего поля, достаточного для транспортировки исследуемых микрообъектов.

Малость абсолютной величины $H_z \partial H_z / \partial x$ по сравнению с $H_x \partial H_x / \partial x$ приводит к возникновению D_{\min} .

На рис. 4, а приведены зависимости H_x и H_z для одного домена и 4, б на промежутке периодичности для системы из большого числа доменов (256); при $z = 0,6$ мкм. Видно, что максимумы H_z выражены слабо и не оказывает существенного влияния на градиент, что подтверждают рис. 4, в и г и их сравнение с рис. 3, в₂ и г₂.

Результаты и обсуждение. Вблизи поверхности пленки напряженность быстро меняется с координатой. Поэтому использование приближения (7) для силы, выглядит немного сомнительным. Также вызывает сомнение выражение для ширины доменов (4). Для проверки влияния расчетов по формуле (4) предварительно было проведено экспериментальное измерение длины периода доменной структуры (λ) и ширины домена от напряженности внешнего поля.

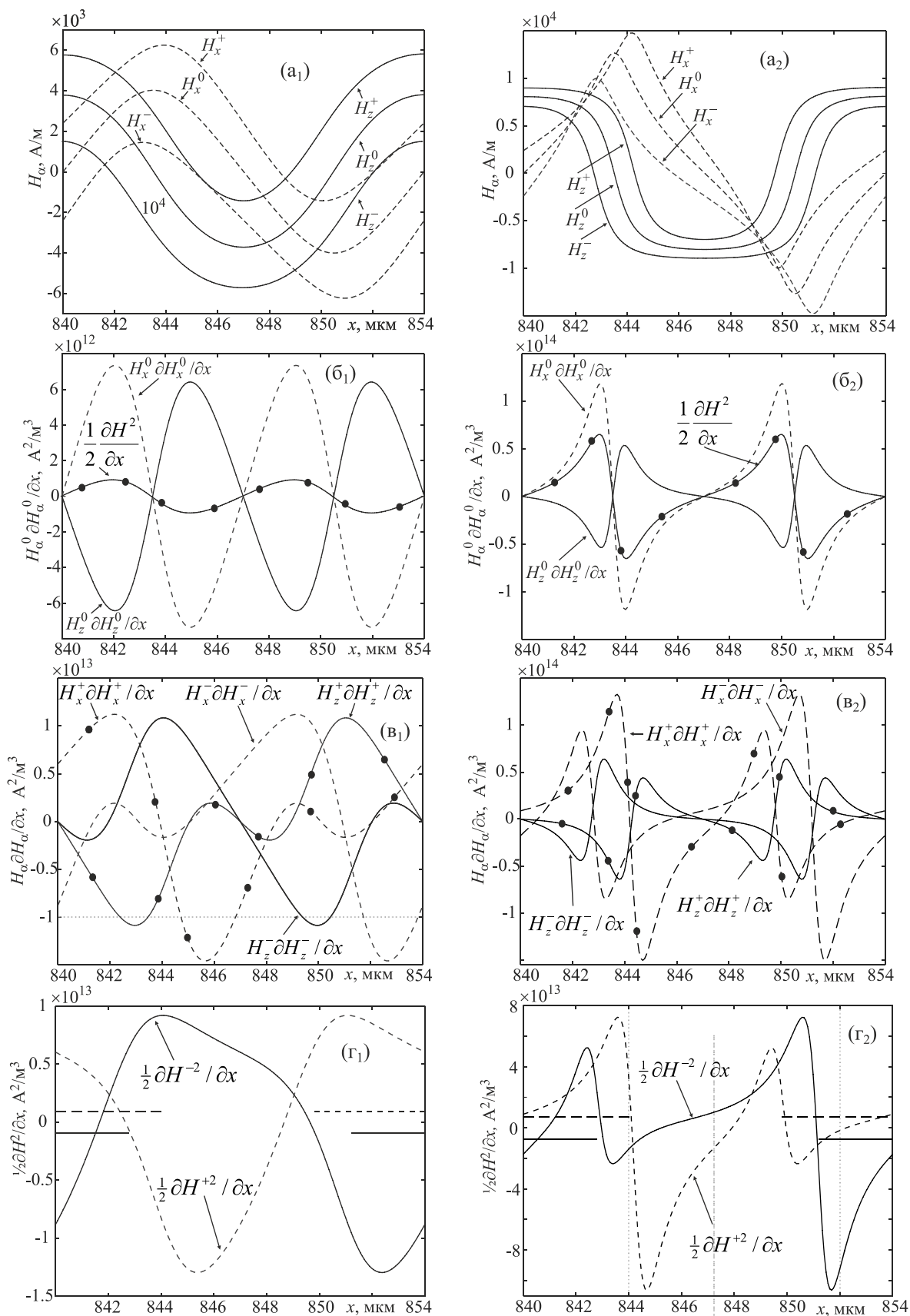


Рис. 3 Зависимости H_α , $H_\alpha \partial H_\alpha / \partial x$ и $\frac{1}{2} \partial H^2 / \partial x$ от координаты x при $h = 6,8$ мкм: (а₁) – (г₁) — для случая $D = 5$ мкм (а₂) – (г₂) — для случая $D = 1$ мкм. $\Delta z = 0,1$ мкм

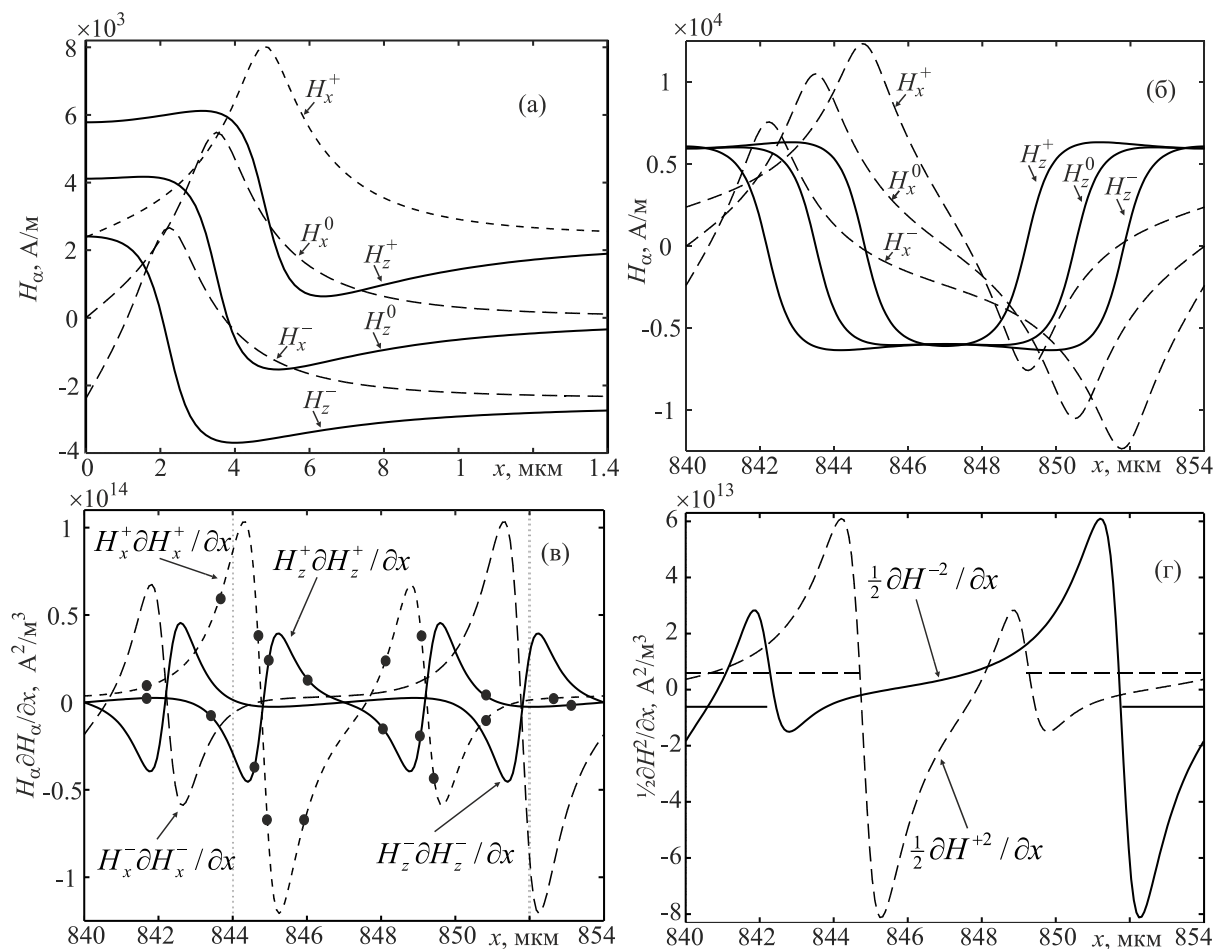


Рис. 4. Для толщины пленки $h=3$ мкм на высоте $z=0,6$ мкм: (а) — компоненты напряженности, создаваемые одним доменом; (б) — компоненты напряженности, создаваемые системой большого числа доменов (256); (в) — $H_\alpha \partial H_\alpha / \partial x$; (г) — $\frac{1}{2} \partial H^2 / \partial x$. На рис (г) горизонтальные отрезки — полуширины доменов с направлением намагниченности в положительном направлении оси Z

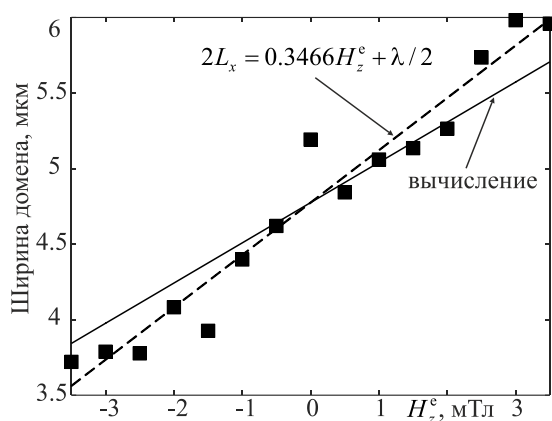


Рис. 5. Зависимость ширины домена от компоненты z напряженности внешнего поля: символы — экспериментальные результаты; пунктирная линия — их аппроксимация МНК; сплошная линия — вычисление по формуле (4)

В диапазоне от -4 мТл до 4 мТл величина λ постоянна и приблизительно равна $9,55$ мкм. Экспериментальные значения ширины домена с напряженностью, направленной в положительном направлении оси Z , их аппроксимация методом наименьших квадратов (МНК) и ширина домена, рассчитанная по (4), приведены на рис. 5. Видно, что ширина домена, рассчитанная по формуле (4) (для значений параметров $M = 20530,99$ А/м, $h = 6,8$ мкм) несколько меньше предсказываемой аппроксимацией экспериментальных данных.

При $H_z^e = 3$ мТл рассчитанный по формуле (7) минимальный диаметр при использовании формулы (4) равен 1,03 мкм, а при использовании аппроксимации экспериментальных данных 1,06 мкм. Таким образом, отклонение минимального диаметра, рассчитанного на основе ширин доменов, найденных по формуле (4), от минимального диаметра, рассчитанного на основе ширин доменов, найденных по аппроксимации экспериментальных данных, мало.

Для проверки качественного соответствия предсказания модели был проведен эксперимент. Над пленкой состава $(YSmLuCa)_3(FeGe)_5O_{12}$, с толщиной $h = 6.8$ мкм и периодом доменной структуры $\lambda = 10$ мкм помещалась суспензия, состоящая из смеси магнитомаркированных (ММ) дрожжевых клеток (средний диаметр 5 мкм, магнитная восприимчивость $\chi = 0,0011 \pm 0,0002$) и ММ спор *Bacillus clausii* (длина ≈ 2 мкм, диаметр ≈ 1 мкм, магнитная восприимчивость $\chi = 0,0013 \pm 0,0002$). Магнитная маркировка дрожжевых и бактериальных клеток проводилась с помощью магнитных наночастиц магнетита, синтезированных по методике [12] и стабилизированных цитрат-анионами по методике, описанной в работе [13]. Микрофотографии магнитных наночастиц для определения размера полученных МНЧ делали с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL JEM 200 (ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»). Анализ фотографий свидетельствует о том, что диаметр синтезированных наночастиц лежит в диапазоне 10–50 нм (рис. 6). Определение магнитной восприимчивости ММ дрожжевых клеток и ММ спор *Bacillus clausii* проводили по методике, описанной в работе [14].

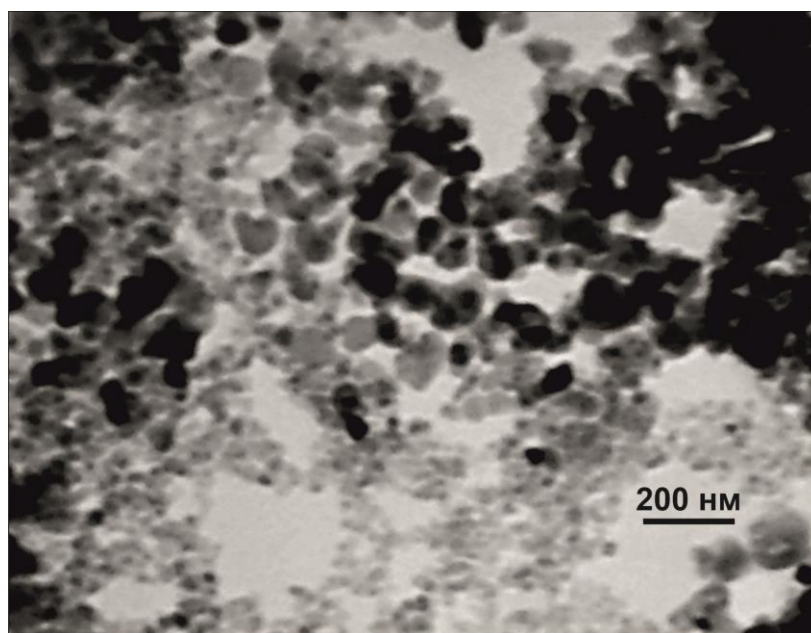


Рис. 6. Электронная микрофотография МНЧ магнетита (увеличение 30000х)

Эксперименты показали (см. рис. 7), что при приложении управляющего магнитного поля вида (3) с $H_{x0} = 3$ мТл, $H_{x0} = 3$ мТл и $\nu < 3$ Гц наблюдается транспортировка ММ клеток дрожжей $D = 5$ мкм над ПДС согласно распределения x -составляющей магнитной силы (рис. 3, γ_1) и колебания ММ спор *Bacillus clausii*, закрепленных на доменных границах ПДС согласно распределения сил, рассчитанных для клеток размером ≈ 1 мкм (см. рис. 3, γ_2). На рис. 7 приведены фотографии,

полученные после обработки видео, записанного при проведении эксперимента. Из анализа рис. 7 видно, что дрожжевые ММ клетки, обозначенные на рис. 7 д1, д2, д3 и д4 перемещаются вправо на расстояние периода ПДС. В то время как бактерии Б1, Б2, Б3 и Б4 совершают колебания оставаясь закрепленными на доменных границах. Для получения режима транспортировки ММ спор *Bacillus clausii*, необходимо повышать H_{z0} до 5 мТл и выше.

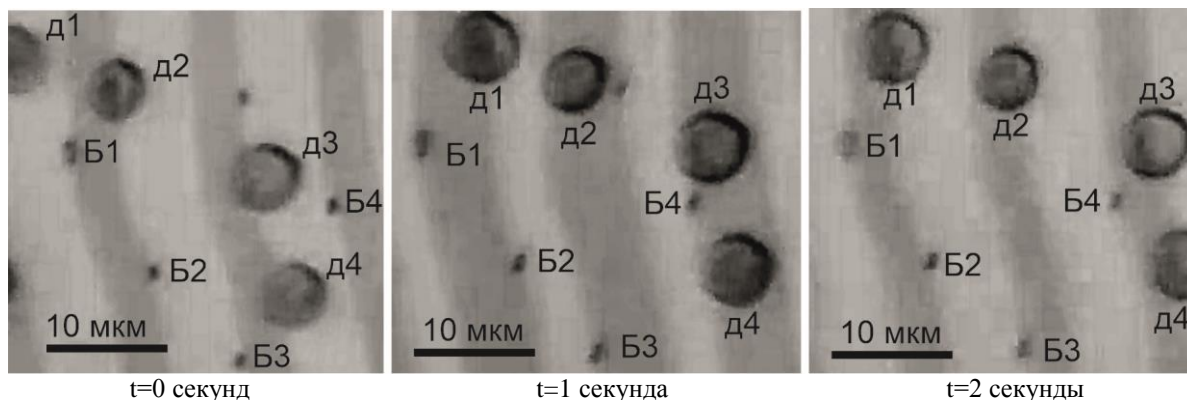


Рис. 7. Большие дрожжевые клетки (д1, д2, д3 и д4) движутся вправо относительно полосовой доменной структуры и маленьких бактериальных клеток (Б1, Б2, Б3 и Б4)

Используя параметры пленки и значение поля коллапса, была оценена намагниченность $M \approx 24268,9$ А/м, при этом оценка сверху составляла $M = 26616,7$ А/м. В табл. 1 приведены значения D_{\min} для различных высот клетки над поверхностью плёнки для $H_{x0}^e = 3$, $H_{z0}^e = 4$ мТл.

Таблица 1

Минимальный диаметр для различных высот частицы над плёнкой

Δz , мкм	0,1	0,01	0,001	$\frac{D_{\min}(0.001) - D_{\min}(0.01)}{D_{\min}(0.001)} 100\%$
Дипольное приближение, фор. (7), $M = 24268,9$ А/м	0.64	0.81	0.83	2.4
Дипольное приближение, фор. (7), $M = 26616,7$ А/м	0.69	0.87	0.88	1.1
Интегр. по сфере, фор. (8), $R_i = 0,9R$, $M = 24268,9$ А/м	0.85	1.33	1,39	4.3
Интегр. по сфере, фор. (8), $R_i = 0,9R$, $M = 26616,7$ А/м	0.95	1.47	1,54	4.5
Интегр. по сфере, фор. (8), $R_i = 0,95R$, $M = 24268,9$ А/м	0.91	1.58	1,69	6.5
Интегр. по сфере, фор. (8), $R_i = 0,95R$, $M = 26616,7$ А/м	1.04	1.77	1,88	5.9

Такое поведение согласуется со значением минимального диаметра, рассчитанного с применением формулы (8), т.е. при помощи интегрирования по сфере. Поскольку точная толщина слоя МНЧ известна не была, вычисления были выполнены для двух толщин слоя МНЧ. С уменьшением толщины слоя влияние высоты частицы над поверхностью пленки на величину D_{\min} увеличивается. В частности, увеличивается величина $\frac{D_{\min}(0.001) - D_{\min}(0.01)}{D_{\min}(0.001)}$, см. последний столбец в табл. 1.

Заключение. За счёт выбора периода доменной структуры λ можно обеспечить транспорт клеток для диаметров больших D_{\min} и колебания клеток для диаметров

меньших D_{\min} , т.е. разделение клеток по диаметру. Используя, несколько пленок с сильно отличающимися λ , например, 6 и 14 мкм, можно более тонкий выбор диаметра разделения клеток произвести при помощи изменения величины амплитуды напряженности внешнего магнитного поля (управляющего поля) H_0 . Заменить пленку с малой λ можно плёнкой с большей λ , но меньшей величиной намагниченности. При моделировании движения частиц, покрытых магнитомаркированной оболочкой, формула для вычисления силы, действующей со стороны магнитного поля на ММ клетку, основанная на интегрировании по сфере, обладает большей точностью по сравнению с формулой, основанной на дипольном приближении.

Работа выполнена в рамках государственного задания (регистрационный номер 124012400345-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Microfluidic chips: emerging technologies for adoptive cell immunotherapy / Y. Tian, R. Hu, G. Du, N. Xu // *Micromachines*. – 2023. – Vol. 14. – P. 877. – DOI: 10.3390/mi14040877
2. Low-cost 3D printed inertial flow microfluidic devices for cellular isolation in liquid biopsies / J.N.S. Agudelo, F. Subirada, M. Hendriks et al. // *Front. Lab. Chip. Technol.* – 2023. – No 2. – P. 1175668. – DOI 10.3389/frlct.2023.1175668
3. Entrapment of prostate cancer circulating tumor cells with a sequential size-based microfluidic chip / X. Ren, B.M. Foster, P. Ghassemi et al. // *Analytical Chemistry*. – 2018. – Vol. 90, No 12. – P.7526-7534. DOI: 10.1021/acs.analchem.8b01134
4. Traveling wave magnetophoresis for high resolution chip based separations. / B.B. Yellen, R.M. Erb, H.S. Son et al. // *Lab on a Chip*. – 2007. – Vol. 7. – P. 1681–1688.
5. Yellen, B.B. Nonlinear dynamics of superparamagnetic beads in a traveling magnetic-field wave / B.B. Yellen, L.N. Virgin // *Phys. Rev. E*. – 2009. – Vol. 80. — P. 011402(6).
6. The synchronization of superparamagnetic beads driven by a micro-magnetic ratchet. / L. Gao, N.J. Gottron III, L.N. Virgin, B.B. Yellen // *Lab on a Chip*. – 2010. – Vol. 10. – P. 2108–2114.
7. Donolato, M. Microstripes for transport and separation of magnetic particles. / M. Donolato, B.T. Dalslet, M.F. Hansen // *Biomicrofluidics*. – 2012. – Vol. 6. – P. 024110(6).
8. Straube, A.V. Synchronous vs. asynchronous transport of a paramagnetic particle in a modulated ratchet potential / A.V. Straube, P.Tierno // *EPL*. – 2013. – Vol. 103. – P. 28001(6).
9. Pedrero, F. Bidirectional particle transport and size selective sorting of Brownian particles in a flashing spatially periodic energy landscape / F. Martinez-Pedrero, H. Massana-Cid, T. Ziegler et al. // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2016. – Vol. 18. – P. 26353–26357.
10. Губарев, А.А. Численное моделирование перемещения парамагнитных частиц над полосовой структурой магнитных доменов / А.А. Губарев, Ю.А. Легенький, С.В. Беспалова // *Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки*. – 2023. – № 4. – С. 39–49.
11. Павлов, В.Н. Использование магнитного храповика для перемещения магнитомаркированных клеток над полосовой доменной структурой / В.Н. Павлов, Ю.А. Легенький, С.В. Беспалова // *Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки*. – 2024. – №1. – С. 113–123.
12. Massart R. Preparation of aqueous magnetic liquids in alkaline and acidic media / R. Massart // *IEEE Trans. Magn.* – 1981. – Vol. 17. – P. 1247–1249.
13. Солопов, М. В. Биосорбент на основе комплекса дрожжевых клеток и магнитных наночастиц для удаления ионов тяжелых металлов / М. В. Солопов, Ю. А. Легенький, С. В. Беспалова // *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. – 2018. – Т. 3, № 2. – С. 451–457.
14. Влияние низкочастотного переменного магнитного поля на жизнеспособность магнитомаркированных клеток *Saccharomyces cerevisiae* / С. В. Беспалова, Д. В. Кладько, Ю. А. Легенький [и др.] // *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. – 2019. – Т. 4, № 3. – С. 335–339.

Поступила в редакцию 08.12.2025 г.

ON THE SEPARATION OF MAGNETICALLY MARKED CELLS BY DIAMETER USING FILMS WITH A STRIP DOMAIN STRUCTURE

A. A. Gubarev, V.N. Pavlov, Yu. A. Legenkiy

This paper examines the change in the motion mode of magnetically marked cells with decreasing diameter. For diameters less than or equal to a certain value, D_{\min} , the cells oscillate for oscillations that do not exceed the domain structure period, λ . For cells with diameters greater than D_{\min} , the cells can, at a sufficiently low frequency of the external (control) field, move over distances much greater than the domain structure period. The mechanism for the formation of this minimum diameter is investigated. A similarity relation is obtained linking λ , D_{\min} and the film thickness, h .

Keywords: magnetically marked cells, gradient magnetic fields, ferrite-garnet films, stripe domain structure, alternating meander.

Губарев Андрей Анатольевич

Старший научный сотрудник,
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
ORCID: 0009-0008-1388-4753
E-mail: Gubarev_A_A_@mail.ru

Gubarev Andrey Anatolievich

Senior Researcher,
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.
ORCID: 0009-0008-1388-4753

Павлов Владимир Николаевич

Научный сотрудник,
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
ORCID: 0000-0001-6716-5553

Pavlov Vladimir Nikolaevich

Researcher,
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.
ORCID: 0000-0001-6716-5553

Легенький Юрий Анатольевич

Старший научный сотрудник,
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
ORCID: 0009-0007-7571-8091

Legenkiy Yuri Anatolevich

Senior Researcher,
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.
ORCID: 0009-0007-7571-8091

Беспалова Светлана Владимировна

доктор физико-математических наук, профессор;
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
ORCID: 0009-0009-4418-1513

Bespalova Svetlana Vladimirovna

Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor;
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.
ORCID: 0009-0009-4418-1513

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОПРЕПАРАТА ДЛЯ ЗАЩИТЫ СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ ОТ КОРНЕВОЙ ГНИЛИ

© 2025. С. И. Демченко

Разработана улучшенная технология получения биопрепарата для профилактики возникновения очагов корневой губки в сосновых насаждениях Донбасса. Технологический процесс получения биопрепарата включает жидкофазную ферментацию растительных отходов с использованием штамма гриба-антагониста *Phlebiopsis gigantea* (Fr.) Jülich. P-1-96; гидролиз растительного сырья жидкофазной фракцией, полученной при жидкофазной ферментации, и содержащей ферменты, обеспечивающие деградацию целлюлозы и лигнина; твердофазную ферментацию в слое смеси продуктов жидкофазной ферментации и ферментативного гидролиза растительного сырья. Разработанная технология позволила сократить технологический цикл получения биопрепарата и увеличить выход жизнеспособных оидий до $6,8 \times 10^6$ КОЕ/г.

Ключевые слова: биопрепарат, корневые гнили, гриб-антагонист, растительные отходы, жидкофазная и твердофазная ферментация, ферментативный гидролиз, жизнеспособные оидии.

Введение. Повреждение и поражение лесов вредными насекомыми и болезнями наносит большой ущерб народному хозяйству Российской Федерации в виде потерь текущего прироста древесины, усыхания и деградации древостоев, снижения их природоохранных, водозащитных и агролесомелиоративных функций [1, 2]. Наибольшую вредоносность и повсеместную распространенность имеют патогенные грибы из рода *Heterobasidion* [3–6]. Несмотря на подробную и всестороннюю изученность, проблема корневой губки не теряет своей актуальности в связи с продолжающимся ростом площадей сосновых насаждений, пораженных хетеробазидиозом [7].

Существует несколько способов борьбы с корневой губкой [8]. Наиболее эффективным и экологичным является биологический метод профилактики и ограничения вредоносности корневых гнилей [9]. Для предупреждения заражения сосновых насаждений фитопатогеном через торцы пней предпочтение отдается использованию сапротрофных ксилотрофов [4–6]. Среди этих грибов активным природным антагонистом корневой губки является *Phlebiopsis gigantea* (Fr.) Jülich. (флебиопсис гигантский) [10, 11]. В некоторых странах Европы на основе споровой суспензии этого гриба разработаны коммерческие препараты для защиты сосновых насаждений от возбудителя корневой гнили [9]. По сравнению с химическими препаратами биофунгициды не загрязняют окружающую среду стойкими соединениями и минимально нарушают структуру биоценозов [6]. В Российской Федерации биопрепараты для защиты хвойных насаждений от корневой губки не производятся, а высокая стоимость импортных биофунгицидов и фитосанитарные риски, обусловленные использованием чужеродных биоагентов, входящих в состав препаратов, не позволяют использовать зарубежные разработки [12]. Поэтому возрастает потребность лесного хозяйства страны в получении эффективного средства защиты, которое позволит сократить потери, вызываемые очаговым поражением сосняков корневой губкой.

Цель данной работы – разработка улучшенной технологии получения биопрепарата для профилактики возникновения очагов корневой губки в сосновых насаждениях Донбасса и оценка стабильности свойств препарата в процессе хранения.

Методика эксперимента. В качестве объекта исследования использовали штамм гриба *Ph. gigantea* P-1-96 из коллекции культур базидиальных ксилотрофов кафедры физиологии растений ДонГУ. Этот штамм проявил фунгистатический алиментарный антагонизм во взаимоотношениях с патогенными изолятами *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. (корневая губка) [12, 13]. Экзометаболиты гриба *Ph. gigantea* P-1-96 не были фитотоксичными в отношении *Pinus sylvestris* L. [14].

Биопрепарат получали методом жидкофазной и твердофазной ферментации нативного и модифицированного лигноцеллюлозного растительного сырья [15]. Модификацию растительных отходов осуществляли в колбах Эрленмейера объемом 250 мл с помощью ферментативного гидролиза при постоянном перемешивании содержимого колб на орбитальном шейкере Altimax SH-1-20 (180 об./мин.).

При подборе оптимальной для культивирования *Ph. gigantea* P-1-96 агаризованной питательной среды в качестве экспериментальных использовали следующие среды: сусло-агар (СА), картофельно-глюкозный агар (КГА), пептонно-глюкозный агар (ПГА) и агаризованная среда Чапека-Докса (ЧДА) [16]. Для засева (инокуляции) питательных сред в стерильных условиях использовали музейные культуры флeбиопсиса гигантского, которые хранили при температуре 4 °С на скошенном СА в пробирках (20×2,1 см). Засеянные чашки Петри помещали в термостат ТС-80М с температурой 26 ± 1 °С. Культивирование гриба проводили на протяжении 12 суток, ежедневно отмечая прирост колоний гриба. Критериями оптимального состава среды служили скорость роста мицелия (мм/сут.) и интенсивность оидиогенеза (КОЕ/см²).

Скорость радиального роста мицелия (мм/сут.) на агаризованных средах в чашках Петри определяли по общепринятой методике [17]. Ростовой коэффициент рассчитывали по формуле, предложенной А.С. Бухало [18]. Сухую биомассу мицелия (г/л) определяли гравиметрическим методом [17].

Количество оидий, на которые фрагментировался воздушный мицелий *Ph. gigantea*, подсчитывали с помощью камеры Горяева по стандартной методике [17]. Титр жизнеспособных оидий при различной температуре хранения биопрепарата определяли путем посева предельных разведений споровой суспензии на КГА с последующим подсчетом КОЕ в 1 г биопрепарата [17].

Целлюлазную активность в культуральном фильтрате (КФ) определяли по начальной скорости образования редуцирующих сахаров при гидролизе микрокристаллической целлюлозы (МКЦ) [17]. Содержание редуцирующих сахаров (в глюкозном эквиваленте) определяли методом Шомодьи-Нельсона [17].

За единицу целлюлазной активности (Ед.) принимали количество фермента, которое катализирует процесс гидролиза МКЦ с образованием 1 мкМ редуцирующих сахаров за 1 ч. при температуре 50 °С, pH 4,6.

Пероксидазную и лакказную активность в КФ определяли колориметрическим методом [17, 19]. В качестве хромогенного субстрата использовали 8 мМ спиртовой раствор о-дианизидина. При определении пероксидазной активности реакцию окисления о-дианизидина инициировали введением 0,2 мл 10 мМ раствора перекиси водорода. Увеличение оптической плотности, связанное с окислением о-дианизидина, измеряли на КФК-3 при 460 нм в течение 3 минут. За единицу пероксидазной и лакказной активности (Ед.) принимали количество фермента, катализирующее окисление 1 мкМ субстрата в течение 1 мин. при стандартных условиях реакции (pH = 4,6, температура 35 °С).

Выделение моноартроконидиальных культур из биопрепарата проводили на сусло-агаровой среде (8⁰ по Баллингу, pH 5,0) с использованием метода

последовательных десятикратных разбавлений [17]. Для этого в колбу с 90 мл стерильной дистиллированной воды помещали 10 г биопрепарата и осторожно встряхивали в течение 5 мин., чтобы смыть оидии. Предварительно разбавив (до разведения 50–60 спор в 1 мл), суспензию спор объемом 0,5 мл помещали в центр чашки Петри. Суспензию равномерно распределяли по поверхности среды шпателем Дригальского до полного её впитывания. Чашки Петри закрывали и помещали перевернутыми вверх дном в термостат для инкубации при температуре 26 °С. Через 2–5 суток поверхность питательной среды просматривали под микроскопом, стерильно вырезали кусочки агара с одиночными спорами на стадии появления ростовой трубки и переносили их на свежую сусло-агаровую среду.

Антагонистическую активность исходного штамма *Ph. gigantea* P-1-96 и его моноартроконидиальных культур по отношению к патогенному изоляту *H. annosum* НА-4-96 изучали методом встречных культур [5]. Основным критерием в оценке антагонистической активности каждой культуры флэбиопсиса гигантского служила ширина зоны (мм) нарастания мицелия антагониста на корневую губку.

Повторность всех проведенных опытов была трехкратной. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили при 5 %-м уровне значимости с помощью дисперсионного анализа и множественного сравнения средних арифметических значений по критерию Даннета [20].

Анализ результатов. Для профилактики возникновения очагов корневой губки в сосновых насаждениях при проведении рубок ухода и санитарно-оздоровительных мероприятий была разработана технология получения биологического препарата «Пениофорин». Основу биопрепарата составляет активная культура (мицелиальная биомасса с жизнеспособными оидиями) селективного штамма *Ph. gigantea* P-1-96, который характеризуется комплексом полезных свойств [12–14], определяющих его конкурентоспособность и перспективность использования для биологической защиты хвойных насаждений от возбудителя корневой гнили. Сырьем для производства биопрепарата являются растительные отходы агропромышленного комплекса (АПК) – лузга семян подсолнечника (отходы переработки масличных культур).

Технологический процесс получения биопрепарата проводили в следующей последовательности:

- получение маточного мицелия;
- получение вегетативного посевного материала (ВПМ);
- жидкофазная ферментация растительных отходов с использованием штамма гриба *Ph. gigantea* P-1-96;
- подготовка субстрата из растительных отходов АПК и его гидролиз жидкофазной фракцией, полученной при жидкофазной ферментации;
- твердофазная ферментация в слое смеси продуктов жидкофазной ферментации и ферментативного гидролиза растительного сырья;
- сушка и фасовка готового биопрепарата.

Получение маточного мицелия. Маточный мицелий получали путем выращивания *Ph. gigantea* P-1-96 на агаризованных питательных средах (ПА, КГА, ПГА и ЧДА) в чашках Петри.

Анализ экспериментальных данных, приведенных в таблице 1, показал, что состав агаризованных питательных сред существенно не влиял на скорость роста исследованного штамма *Ph. gigantea* P-1-96. Но в то же время наблюдалась достоверная зависимость ростового коэффициента (РК) от состава испытанных питательных сред. Так, высокое значение РК имело место при культивировании гриба на СА. На КГА, ПГА и ЧДА обычно развивались менее плотные и более низкие колонии.

Таблица 1

Скорость радиального роста мицелия штамма *Ph. gigantea* P-1-96 на агаризованных питательных средах ($\bar{X}_{\text{ср.}} \pm m$)*

Агаризованные питательные среды	Скорость роста, мм/сут.	Ростовой коэффициент (РК)
Сусло-агар (СА)	$7,8 \pm 0,8$	91,4
Картофельно-глюкозный агар (КГА)	$7,7 \pm 0,8$	61,5
Пептонно-глюкозный агар (ПГА)	$7,7 \pm 0,8$	61,2
Агаризованная среда Чапека-Докса (ЧДА)	$7,6 \pm 0,8$	17,8

Примечание: *Здесь и в последующих таблицах: $\bar{X}_{\text{ср.}}$ – среднее арифметическое значение, m – ошибка репрезентативности.

Анализируя интенсивность оидиогенеза на агаризованных средах (табл. 2), было установлено, что штамм *Ph. gigantea* P-1-96 был способен продуцировать оидии на всех исследованных питательных средах, причем сусло-агар был более благоприятным для спорообразовательной активности гриба, чем другие среды. Мицелий флэбиопсиса гигантского начал фрагментироваться на оидии на третьи сутки роста. Наибольшая интенсивность оидиогенеза наблюдалась на 9–12-е сутки роста гриба.

Таблица 2

Интенсивность оидиогенеза штамма *Ph. gigantea* P-1-96 на агаризованных питательных средах (тыс. шт. оидий на 1 см^2 мицелия)

Продолжительность культивирования, сут.	Питательные среды			
	СА	КГА	ПГА	ЧДА
3	$43,2 \pm 9,2$	$18,2 \pm 1,7$	$16,5 \pm 2,1$	$11,6 \pm 1,2$
6	$150,4 \pm 5,1$	$83,3 \pm 2,9$	$76,2 \pm 6,8$	$66,1 \pm 9,1$
9	$303,2 \pm 10,7$	$218,7 \pm 9,8$	$217,9 \pm 8,5$	$164,5 \pm 10,7$
12	$318,2 \pm 14,1$	$226,5 \pm 8,4$	$218,3 \pm 9,4$	$166,3 \pm 11,8$

Таким образом, для получения маточного мицелия *Ph. gigantea* P-1-96 наиболее оптимальной по критериям скорости роста и интенсивности спорообразования культуры является сусло-агаровая среда.

Получение вегетативного посевного материала. Согласно литературным данным [18, 21], глубинное культивирование является приоритетным методом получения ВПМ, что обусловлено технологичностью, экологичностью и экономическими преимуществами процесса в масштабах широкого производства. Ранее проведенные исследования позволили установить оптимальные условия для глубинного культивирования штамма *Ph. gigantea* P-1-96 [22, 23]. Опираясь на результаты этих исследований, ВПМ получали с помощью глубинного культивирования гриба-антагониста в качалочных колбах объемом 750 мл со 100 мл питательной среды (рН 4,6), содержащей (г/л): глюкозу – 15,0; пептон – 4,0; KH_2PO_4 – 0,6; K_2HPO_4 – 0,4; $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,5; $\text{ZnSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,001; CaCl_2 – 0,05. В качестве инокулюма использовали 10-суточную маточную культуру *Ph. gigantea* P-1-96, выращенную на СА в чашках Петри. Оидии смывали с поверхности колоний гриба 20 мл стерильной глюкозо-пептонной среды и споровую суспензию по 5 мл вносили в качалочные колбы с питательной средой. Исследованный штамм базидиомицета культивировали в термостатируемой комнате на орбитальном шейкере (200 об./мин.) при температуре $26 \pm 1^\circ \text{C}$.

При выращивании исследованного базидиомицета на глюкозо-пептонной среде накопление биомассы *Ph. gigantea* P-1-96 достигло максимальных значений на 10-е сутки роста и составило $5,7 \pm 0,3$ г/л.

Жидкофазная ферментация растительных отходов. Жидкофазную ферментацию растительных отходов проводили в лабораторном ферментере с геометрическим объемом 3 дм³ и рабочим объемом 1,5 дм³, оснащенном системами автоматического регулирования pH, pO₂ и температуры, а также барботерами для подачи воздуха и двухъярусной мешалкой. Ферментационная среда имела следующий состав, г/л: глюкоза – 1,0; пептон – 4,0; KН₂РO₄ – 0,6; K₂НРO₄ – 0,4; MgSO₄×7Н₂O – 0,5; ZnSO₄×7Н₂O – 0,001; СаCl₂ – 0,05, измельченная лузга семян подсолнечника – 10.

Параметры глубинного культивирования *Ph. gigantea* P-1-96 в лабораторном ферментере:

- количество ВПМ – 10 % (900 мл ферментационной среды + 100 мл ВПМ);
- температура культивирования – 26 ± 0,2 °С;
- pH – 4,6;
- расход воздуха – 0,5 дм³ / мин.

Данные о динамике прироста биомассы мицелия штамма *Ph. gigantea* P-1-96 на ферментационной среде представлены на рисунке 1 в полулогарифмических координатах.



Рис. 1. Динамика накопления биомассы штаммом *Ph. gigantea* P-1-96 в условиях глубинного культивирования на глюкозо-пептонной среде

Анализ экспериментальных данных, приведенных на рисунке 1, показал, что рост гриба в условиях глубинного культивирования подчинялся общим закономерностям развития макромицетов в условиях периодической культуры [18]. На кривой роста наблюдается четко выраженный прямолинейный участок, соответствующий экспоненциальной фазе. Эта фаза роста у штамма *Ph. gigantea* P-1-96 заканчивалась на 6-е сутки культивирования, после чего наступал период перехода к стационарной фазе роста, которая начиналась с 8-х суток культивирования гриба. Начиная с 24-х суток, у исследованного базидиомицета достоверно уменьшалось накопление биомассы мицелия. Это, по-видимому, связано с тем, что в процессе жизнедеятельности *Ph. gigantea* P-1-96 происходит истощение питательной среды, приводящее к снижению скорости метаболизма в организме гриба. Кроме того, накопление в питательном субстрате продуктов обмена также может частично тормозить рост флeбиопсиса гигантского. Не исключена вероятность и автолиза мицелия, так как дереворазрушающие базидиомицеты обладают способностью восполнять недостаток азота в субстрате посредством автолиза и повторного использования азотистых веществ собственного мицелия.

Таким образом, оптимальное время культивирования штамма *Ph. gigantea* P-1-96 в ферментере для получения ВПМ составляет 8 суток.

В дальнейших наших исследованиях штамм *Ph. gigantea* P-1-96 культивировали в лабораторном ферментере на протяжении 8 суток. Затем продукты жидкофазной ферментации в асептических условиях фильтровали через сито с отверстиями 1 мм, в результате чего была получена жидкая фракция, содержащая раствор непотребленных питательных компонентов и накопившиеся в среде продукты биосинтеза гриба-антагониста, и твердая, содержащая ферментированную лузгу семян подсолнечника и биомассу гриба. В культуральном фильтрате жидкой фракции была обнаружена целлюлазная и пероксидазная активность, которая составила 0,26 и 25,4 Ед./мл соответственно. Гриб не синтезировал внеклеточную лакказу при глубинном культивировании на исследованной питательной среде, что согласуется с литературными источниками [24, 25].

Следовательно, продукты жидкофазной ферментации растительных отходов содержали как ВПМ, так и ферменты, обеспечивающие деградацию целлюлозы и лигнина.

Подготовка субстрата из растительных отходов АПК и его ферментативный гидролиз. Согласно имеющейся научной информации [26], процесс ферментации на твердой среде (ФТС) обладает некоторыми преимуществами в производстве, такими, как высокая продуктивность, методическая простота, сниженные энергетические затраты, низкое количество отходов и высокое качество продукта. В отличие от глубинного культивирования в жидкой среде, ФТС приближена к природным условиям, в которых вид *Ph. gigantea* адаптирован к твердому субстрату. Споруляция исследованного гриба происходит в естественных условиях на воздушном мицелии [6]. Оидиогенезу при ФТС присущи следующие характерные черты:

1) титр оидий в среднем на порядок выше при поверхностном культивировании в сравнении с глубинным;

2) оидии, полученные на воздушном мицелии, сохраняются лучше при неблагоприятных условиях среды, чем оидии, полученные при жидкофазном культивировании;

3) клеточные стенки воздушных оидий толще, чем стенки спор, полученных при выращивании в жидкой среде. Клеточная стенка является первым барьером, противостоящим внешним воздействиям. Поэтому ее характеристики, возможно, влияют на жизнеспособность и сохранность спор, на способность биоконтрольного агента развиваться успешно;

4) воздушные оидии обладают гидрофобными свойствами, которые позволяют воздушным спорам быстро и эффективно адсорбироваться на поверхности разных частей растений, в том числе и на поверхности пней [9].

Для массовой наработки биопрепаратов путем твердофазной ферментации в разных странах мира используют отходы сельского и лесного хозяйства [26, 27]. Состав сред оказывает существенное влияние на рост и продуктивность грибов [28]. Ранее проведенные исследования показали, что наибольшая репродуктивная активность штамма *Ph. gigantea* P-1-96 наблюдается на растительном субстрате из лузги семян подсолнечника и пшеничной соломы [29]. Поэтому для производства биопрепарата нами были использованы отходы переработки масличных культур – лузга семян подсолнечника, в значительных количествах накапливающаяся на Российских маслоэкстракционных заводах. В зависимости от сорта масличной культуры, лузжистость семени может достигать 30 % от массы неочищенного семени.

Согласно литературным данным [15], частицы растительного субстрата при твердофазном культивировании грибов должны иметь размеры, не допускающие слеживания субстрата, обеспечивающие достаточную аэрацию субстрата и способствующие

максимально полному контакту посевного материала с перерабатываемым растительным сырьем. Опытным путем было установлено, что минимальные размеры частиц, удовлетворяющие этим требованиям, составляют для подсолнечной лузги 3–5 мм. Сырье с таким размером частиц получили с помощью механического измельчения на лабораторной мельнице с последующим просеиванием через сита.

Измельченную лузгу семян подсолнечника по 10 г помещали в колбы Эрленмейера объемом 250 мл, закрывали ватно-марлевыми пробками и стерилизовали в автоклаве при 1,2–1,4 атм. в течение 1 часа. После охлаждения субстрата в колбы заливали по 40 мл жидкой фракции продуктов жидкофазной ферментации для ферментативного гидролиза лузги семян подсолнечника.

Для определения оптимальных параметров ферментативного гидролиза подсолнечной лузги был разработан план трёхфакторного эксперимента с использованием композиционного униформ-ротатабельного планирования. В качестве варьируемых факторов были выбраны температура ($40\text{ }^{\circ}\text{C} \leq X_1 \leq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$), pH культурального фильтрата ($4,0 \leq X_2 \leq 6,0$) и продолжительность гидролиза ($12\text{ ч} \leq X_3 \leq 24\text{ ч}$). Концентрация подсолнечной лузги (25 %) во всех экспериментах оставалась на одном уровне. Функцией отклика являлось содержание РВ (Y, %) в полученном гидролизате.

Реализация эксперимента и обработка полученных данных позволили получить уравнение регрессии, описывающее влияние температуры, pH и продолжительности гидролиза на накопление редуцирующих веществ:

$$Y = -41,53 + 0,995X_1 + 6,354X_2 + 0,332X_3 - 0,01X_1^2 - 0,62X_2^2 - 0,008X_3^2.$$

Адекватность математической модели определяли по критерию Фишера (уровень значимости $q = 0,05$; степени свободы: $f_1 = 5$; $f_2 = 7$; $F_{\text{табл.}} = 4,0$; $F_{\text{расч.}} = 2,0$). Полученное уравнение адекватно описывает экспериментальные данные в реализованном диапазоне изменения параметров.

Установлены рациональные параметры ферментативного гидролиза подсолнечной лузги при использовании жидкой фракции продуктов жидкофазной ферментации: температура (X_1) – $53\text{ }^{\circ}\text{C}$; pH (X_2) – 4,62 и продолжительность гидролиза (X_3) – 19,6 ч.

Твердофазная ферментация. После ферментного гидролиза гидролизованную лузгу семян подсолнечника перемешивали с лузгой, обогащенной биомассой гриба *Ph. gigantea* P-1-96, полученной после фракционного разделения продуктов жидкофазной ферментации. Мицелиально-субстратный комплекс вносили в субстрат из гидролизованной лузги семян подсолнечника в концентрации 5 % от массы субстрата. В качестве контроля использовали субстрат из нативной лузги семян подсолнечника, который также инокулировали твердой фракцией продуктов жидкофазной ферментации. Твердофазное культивирование гриба *Ph. gigantea* P-1-96 проводили в термостате при температуре $26 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Мицелий флебиопсиса гигантского с большой скоростью колонизировал субстрат из гидролизованной лузги семян подсолнечника. Полная колонизация этого субстрата грибом-антагонистом произошла на 2 дня быстрее, чем в контроле. На 8-е сутки после начала твердофазной ферментации интенсивность оидиогенеза исследованного штамма гриба-антагониста составила $6,8 \times 10^6$ КОЕ/г, что в 1,5 раза была выше, чем в контроле.

Сушка и фасовка готового биопрепарата. После полного обрастания растительного субстрата мицелием *Ph. gigantea* культивирование гриба прекращали. Полученный продукт высыпали в кювету слоем 1,5–2 см и подвергали сушке в течение 1 часа в толще

подогретого до +41 °С воздуха при скорости его движения 0,7 м/с. При таком режиме сушки жизнеспособность оидий гриба в среднем снижалась на 10 % по сравнению с влажным препаратом. Хранили препарат в запаянных полиэтиленовых мешочках.

Результаты исследования влияния условий и продолжительности хранения препарата на жизнеспособность активной культуры *Ph. gigantea* представлены в таблице 3.

Таблица 3
Жизнеспособность оидий *Ph. gigantea* Р-1-96 в зависимости от температуры и срока хранения биопрепарата

Температура хранения, °С	Процент жизнеспособных оидий сразу после высушивания препарата	Процент жизнеспособных оидий спустя месяцев				
		2	4	6	8	10
24–26	90–95	60–64	30–35	12–16	–	–
12–14	90–95	68–75	44–48	20–25	–	–
0–4	90–95	82–85	60–63	41–47	22–26	12–15

Анализ результатов исследований показал, что биопрепарат лучше всего хранился при температуре 0–4 °С. Оидиоспоры *Ph. gigantea* Р-1-96 при данной температуре сохранили достаточно высокую жизнеспособность на протяжении шести месяцев хранения, в дальнейшем она снижалась до 12–15 % от исходной. Отсюда вытекает, что данный препарат целесообразно применять в практике лесозащиты в первые полгода после его производства.

На заключительном этапе наших исследований был проведен сравнительный анализ антагонистической активности исходной культуры *Ph. gigantea* Р-1-96 и моноартроконициальных культур, выделенных из опытного образца биопрепарата. Антагонистическую активность оценивали по степени нарастания моноартроконициальных культур и исходного штамма гриба-антагониста на мицелий патогенного изолята *H. annosum* НА-4-96 после встречи противокультур.

Установлено, что исследованный штамм *Ph. gigantea* Р-1-96 сохранил антагонистическую активность в отношении патогенного гриба *H. annosum* после твердофазного культивирования на гидролизованной лузге семян подсолнечника. Мицелий этого штамма фрагментировался на оидии – споры вегетативного размножения, из которых развивались моноартроконициальные культуры, различающиеся по уровню антагонистической активности в отношении патогенного изолята НА-4-96 корневой губки (табл. 4).

В исследованной выборке доминировали культуры (45 % от общего количества), у которых антагонистическая активность в отношении патогенного изолята *H. annosum* НА-4-96 находилась на одном уровне с исходным штаммом *Ph. gigantea* Р-1-96.

Высокая антагонистическая активность штамма *Ph. gigantea* Р-1-96 обусловлена большим количеством антимикробных метаболитов, которые гриб синтезирует в процессе твердофазного культивирования. Это обеспечивает сохранение его стабильности и отсутствие инфицирования посторонней микрофлорой в смеси биомассы штамма с растительными остатками. Микробиологический контроль при посеве на селективные питательные среды показал, что основную массу живых клеток в продукте составляет штамм *Ph. gigantea* Р-1-96.

Таблица 4

Антагонистическая активность моноартроконидиальных культур
штамма *Ph. gigantea* P-1-96

Моно- артроконидиальные культуры <i>Ph. gigantea</i>	Ширина зоны нарастания <i>Ph. gigantea</i> на мицелий <i>H. annosum</i> , мм			
	Время наблюдения, суток			
	4-е	6-е	8-е	10-е
P-1-96	4,6±0,11	6,8±0,24	8,9±0,10	11,2±0,17
№ 3	5,7±0,18	8,0±0,17	10,5±0,12	12,7±0,21
№ 7	4,4±0,17	6,6±0,25	8,8±0,15	11,6±0,18
№ 11	5,8±0,09	8,1±0,18	10,7±0,10	12,8±0,21
№ 12	4,9±0,18	6,2±0,17	8,7±0,12	11,4±0,18
№ 14	3,2±0,06	5,2±0,18	7,2±0,09	10,3±0,10
№ 15	4,1±0,24	6,5±0,17	8,7±0,12	11,6±0,22
№ 16	4,5±0,12	6,9±0,11	9,0±0,14	11,7±0,21
№ 17	3,1±0,14	5,4±0,17	7,8±0,18	10,2±0,15
№ 18	4,8±0,10	6,7±0,10	8,7±0,12	11,4±0,20
№ 19	4,5±0,10	6,5±0,12	8,8±0,10	11,5±0,18
№ 25	4,6±0,12	6,9±0,14	9,0±0,12	11,2±0,20
№ 28	5,9±0,17	8,2±0,21	10,2±0,14	12,9±0,24
№ 34	2,9±0,05	5,2±0,19	7,1±0,12	10,4±0,19
№ 36	5,4±0,15	8,1±0,25	10,8±0,11	12,7±0,10
№ 41	4,8±0,10	6,7±0,22	8,7±0,16	11,4±0,16
№ 42	5,6±0,11	8,3±0,17	10,2±0,10	12,4±0,09
№ 44	4,3±0,08	6,5±0,18	8,6±0,18	11,8±0,17
№ 45	3,3±0,17	5,0±0,22	7,1±0,14	10,0±0,16
№ 46	3,4±0,21	5,2±0,10	7,2±0,19	10,5±0,12
№ 48	5,7±0,11	8,1±0,14	10,4±0,12	12,8±0,25

Выводы. На основании проведенных исследований была предложена технологическая схема получения биопрепарата на основе живой культуры гриба *Ph. gigantea* P-1-96. Предлагаемая технология получения биопрепарата имеет преимущество в том, что жидкофазная ферментация растительных отходов позволяет за короткий срок получить значительное количество активной мицелиальной биомассы, которая используется в качестве посевного материала при твердофазном культивировании гриба. При этом удастся избежать губительного влияния посторонней микрофлоры, поскольку развитая культура гриба обладает более сильным антимикробным потенциалом. Жидкая фракция продуктов жидкофазной ферментации содержит гидролитические и окислительные ферменты, которые можно использовать для ферментативного гидролиза лигноцеллюлозного растительного сырья. Проведение твердофазной ферментации на гидролизованной лузге семян подсолнечника позволяет существенно увеличить репродуктивную способность исследованного штамма *Ph. gigantea* P-1-96 и сократить общее время переработки растительного сырья.

Мицелиальная и споровая культура *Ph. gigantea* P-1-96 сохраняют антагонистическую активность в отношении патогенных изолятов корневой губки после твердофазного культивирования на растительных отходах АПК. Относительно высокая жизнеспособность оидий сохраняется в течении 6 месяцев при хранении биопрепарата при температуре 0–4 °С.

Исследование выполнено в рамках государственного задания по теме «Биологические способы переработки растительных отходов агропромышленного комплекса» (№ госрегистрации 124012400346-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чураков Б.П. Зараженность древостоев сосны сосновой губкой в различных типах леса и ее влияние на выход деловой древесины / Б.П. Чураков, А.И. Кандрашкин // Лесной журнал. – 2009. – № 3. – С. 37–41.
2. Чураков Б.П. Древесная продукция сосны в очагах корневой губки / Б.П. Чураков, В.Д. Маслов, Р.А. Чураков // Ульяновский медико-биологический журнал. – 2014. – № 1. – С. 155–162.
3. Арёфьев Ю.Ф. Корневая губка (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.) в сосновых насаждениях Среднерусской лесостепи и Флориде – особенности контроля патогена / Ю.Ф. Арёфьев, В.А. Сенф // Лесотехнический журнал. – 2017. – № 2. – С. 6–11.
4. Василюскас А.П. Корневая губка и устойчивость экосистем хвойных лесов / А.П. Василюскас. – Вильнюс: Мокслас, 1989. – 176 с.
5. Негруцкий С.Ф. Корневая губка / С.Ф. Негруцкий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1986. – 196 с.
6. Федоров Н.И. Корневые гнили хвойных пород / Н.И. Федоров. – М.: Лесная промышленность, 1984. – 160 с.
7. Бабурина А. Г. Динамика очагов корневой губки в лесах России / А. Г. Бабурина // Макромицеты бореальной зоны: матер. Всерос. научн. практ. конф. – Красноярск, 2009. – С. 119–124.
8. Лыков И.В. Обзор современного состояния и эффективности мероприятий по защите сосновых насаждений от корневой губки (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.) / И.В. Лыков, П.А. Максимчук // Лесотехнический журнал. – 2021. – № 3. – С. 63–73.
9. Holdriender O. Biological methods of control / O. Holdriender, B. Greig // *Heterobasidion annosum: Biology, Ecology, Impact and Control*. – Oxon (UK) – New York (USA): CAB International, 1998. – P. 235–258.
10. Скрининг изолятов *Phlebiopsis gigantea*, перспективных для создания биопрепарата против корневой губки / Т.В. Романовская, А.А. Арашкова, А.М. Тригунович и др. // Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты: сб. науч. тр. – Т. 9. – Минск: Беларуская навука, 2017. – С. 92–103.
11. Демченко С.И. Скрининг природных штаммов *Phlebiopsis gigantea* (Fr.) Jülich., перспективных для биологической борьбы с корневой губкой / С.И. Демченко // Современная микология в России: материалы международного микологического форума. – Т. 10. – М.: Национальная академия микологии, 2024. – С. 296–297.
12. Демченко С.И. Антагонистическая активность природных штаммов *Phlebiopsis gigantea* (Fr.) Jülich. по отношению к фитопатогену *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. / С.И. Демченко // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2023. – № 1–2. – С. 77–84.
13. Демченко С.И. Антагонистическая активность аборигенного штамма *Phlebiopsis gigantea* P-1-96 на естественных субстратах // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2023. – № 4. – С. 53–58.
14. Демченко С.И. Влияние экзометаболитов грибов *Phlebiopsis gigantea* и *Heterobasidion annosum* на прорастание семян и рост проростков сосны обыкновенной / С. И. Демченко // Донецкие чтения – 2025: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы X Международной научной конференции, посвященной 60-летию создания Донецкого научного центра (Донецк, 5–7 ноября 2025 г.). – Т. 3: Биол. и мед. науки, экол. – Донецк: Изд-во ДонГУ, 2025. – С. 176–177.
15. Синицын А. П. Биоконверсия лигноцеллюлозных материалов: Уч. пособие. / А.П. Синицын, А.В. Гусаков, В.М. Черноглазов. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 224 с.
16. Семенов С.М. Лабораторные среды для актиномицетов и грибов: справ. / С.М. Семенов. – М.: Агропромиздат, 1990. – 240 с.
17. Методы экспериментальной микологии: справочник / И. А. Дудка, С. П. Вассер, И. А. Элланская и др.: [отв. ред. В. И. Билай]. – К.: Наук. думка, 1982. – 552 с.
18. Бухало А.С. Высшие съедобные базидиомицеты в чистой культуре / А.С. Бухало. – К.: Наук. думка, 1988. – 144 с.
19. Кинаш Т.А. Активность лигнолитических ферментов гибридного штамма *Pleurotus ostreatus* Д-2.3 в условиях жидкофазной ферментации / Т.А. Кинаш, С.И. Демченко // Донецкие чтения – 2025: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы X Международной научной конференции, посвященной 60-летию создания Донецкого научного центра (Донецк, 5–7 ноября 2025 г.). – Т. 3: Биол. и мед. науки, экол. – Донецк: Изд-во ДонГУ, 2025. – С. 185–187.
20. Приседський Ю.Г. Статистична обробка результатів біологічних експериментів: навч. посібник / Ю.Г. Приседський. – Донецьк: Кассіопея, 1999. – 210 с.

21. Кузнецов И.Н. Технология получения биопрепарата для защиты леса на основе гриба *Phlebiopsis gigantea* глубинным культивированием на послеспиртовой барде / И.Н. Кузнецов, Н.С. Ручай // Труды БГТУ. – 2017. – Серия 2, № 1. – С. 93–97.
22. Демченко С. И. Влияние источников углеродного и азотного питания на рост и спорообразовательную активность гриба *Phlebiopsis gigantea* (Fr.) Jülich. / С.И. Демченко // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2024. – № 3. – С. 57–65.
23. Демченко С. И. Оптимизация условий глубинного культивирования штамма *Phlebiopsis gigantea* P-1-96 / С.И. Демченко // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2024. – № 4. – С. 70–76.
24. Демченко, С. И. Ферментативная активность природных штаммов *Phlebiopsis gigantea* (Fr.) Jülich / С.И. Демченко // Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: материалы IX Международной научной конференции (Донецк, 15–17 октября 2024 г.). – Т. 3: Биол. и мед. науки, экол. – Донецк: Изд-во ДонГУ, 2024. – С. 143–145.
25. Żółciak A. Enzymatic activity of *Phlebiopsis gigantea* isolates / A. Żółciak, T. Korniłowicz-Kowalska, Z. Sierota, H. Iglík // Acta Mycol. – 2008. – Vol. 43, No 1. – P. 41–48.
26. Зиганшин Д.Д. Особенности глубинного и поверхностного культивирования грибов *Trichoderma* для получения биопрепаратов на основе клеток гриба / Д.Д. Зиганшин, А.С. Сироткин // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 10. – С. 155–158.
27. Бондарь П.Н. Использование отходов деревообрабатывающей промышленности для создания биопрепаратов на основе грибов рода *Trichoderma* / П.Н. Бондарь, В.С. Садыкова // Хвойные бореальной зоны. – 2015. – Т. XXXIII, № 5–6. – С. 286–290.
28. Гарибова Л. В. Основы микологии / Л.В. Гарибова, С.Н. Лекомцева. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2005. – 220 с.
29. Демченко С. И. Ростовая и спорообразовательная активность аборигенного штамма *Phlebiopsis gigantea* P-1-96 на субстратах из растительных отходов / С.И. Демченко // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2023. – № 3. – С. 36–43.

Поступила в редакцию 20.11.2025 г.

THE TECHNOLOGY FOR OBTAINING A BIOLOGICAL PRODUCT TO PROTECT PINE PLANTATIONS FROM ROOT ROT

S. I. Demchenko

An improved technology for obtaining a biological product has been developed to prevent the occurrence of centers of infection by *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. in the pine stands of Donbass. The technological process of obtaining a biological product includes liquid-phase fermentation of plant waste using a strain of the fungus *Phlebiopsis gigantea* (Fr.) Jülich. P-1-96; hydrolysis of plant raw materials with a liquid-phase fraction obtained during liquid-phase fermentation and containing enzymes that degrade cellulose and lignin; solid-phase fermentation in a layer of a mixture of products of liquid-phase fermentation and enzymatic hydrolysis of plant raw materials. The developed technology made it possible to shorten the technological cycle of obtaining a biological product and increase the yield of viable oidia to 6.5×10^6 CFU/g.

Keywords: biopreparation, root rot, antagonist fungus, plant waste, liquid-phase fermentation, solid-phase fermentation, enzymatic hydrolysis, viable oidia.

Демченко Светлана Ивановна

кандидат биологических наук, доцент;
заведующий кафедрой физиологии растений,
ведущий научный сотрудник,
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: sdemch5@mail.ru

Demchenko Svetlana Ivanovna

of Biological Sciences, Docent;
Head of the Department of Plant Physiology,
Leading Researcher,
Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

ОСОБЕННОСТИ АДАПТАЦИИ СТУДЕНТОВ РАЗНОГО МОРФО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СТАТУСА К ФИЗИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ РАЗЛИЧНОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

© 2025. Г. В. Лурье

В исследовании изучены особенности адаптации студентов разного морфо-функционального статуса к физическим нагрузкам различной направленности. В качестве основного метода изучения особенностей адаптации обучающихся использовалась оценка вариабельности сердечного ритма. Выявлено, что мезоморфы с автономным контуром регуляции (АК) демонстрируют наиболее эффективную адаптивность. Эндоморфы с центральным контуром (ЦК) наиболее уязвимы: у них регистрировались снижение спектральной мощности, рост стресс-индекса (SI) и выявление случаев срыва адаптации. АК-группы во всех соматотипах показывали благоприятные изменения, тогда как ЦК-группы — признаки дезадаптации. Анаэробные нагрузки оказывали более выраженное стрессорное воздействие, особенно на группы с исходным напряжением регуляторных механизмов. Результаты обосновывают необходимость персонализации физических нагрузок с учётом типа телосложения и вегетативной регуляции.

Ключевые слова: адаптация организма; вариабельность сердечного ритма; тип вегетативной регуляции; антропометрические особенности; тип телосложения; показатель активности регуляторных систем.

Введение. Изучение механизмов адаптации организма к физическим нагрузкам различной интенсивности и направленности представляет собой одно из ключевых направлений современной физиологии [1]. Особую актуальность приобретает анализ адаптационных реакций у лиц молодого возраста, в частности студентов [2, 3], которые испытывают комплексное воздействие учебных [4–6] и физических нагрузок [7]. В условиях интенсификации образовательного процесса и роста гиподинамии понимание физиологических закономерностей приспособления организма к двигательной активности становится необходимым для разработки научно обоснованных программ физического воспитания и профилактики функциональных нарушений [8].

Эффективность приспособительных реакций определяется множеством факторов, среди которых особое место занимают морфо-функциональные особенности организма и тип вегетативной регуляции. Соматотип задаёт определённые рамки функциональных возможностей сердечно-сосудистой, дыхательной и мышечной систем, а доминирующий контур вегетативной регуляции (автономный или центральный) определяет стратегию адаптации к нагрузке. Комплексное изучение этих параметров позволяет выявить группы риска по развитию дезадаптационных состояний и оптимизировать тренировочный процесс с учётом индивидуальных особенностей [9, 10].

Важнейшим инструментом оценки адаптационного потенциала служит анализ вариабельности сердечного ритма (ВСР) [11, 12], отражающий баланс между симпатическим и парасимпатическим отделами вегетативной нервной системы (ВНС) [13]. Показатели ВСР и рассчитываемые индексы, дают возможность количественно оценить степень напряжения регуляторных механизмов, лабильность сердечного ритма, активность подкорковых центров и уровень централизации управления функциями [14]. Их динамика в ответ на физические нагрузки различной направленности позволяет дифференцировать адаптивные и дезадаптивные типы реагирования у лиц с разными морфо-функциональными характеристиками.

Цель исследования – выявление факторов адаптации студентов разного морфо-функционального статуса к физическим нагрузкам различной направленности.

Материалы и методы. Исследование проводилось на базе ГАОУ ВО МГПУ, выборка составила 159 студентов 1–3 курсов (рис. 1). Для формирования контрольных групп учитывались тип телосложения по Хит-Картеру и вегетативной регуляции по Шлык Н.И.

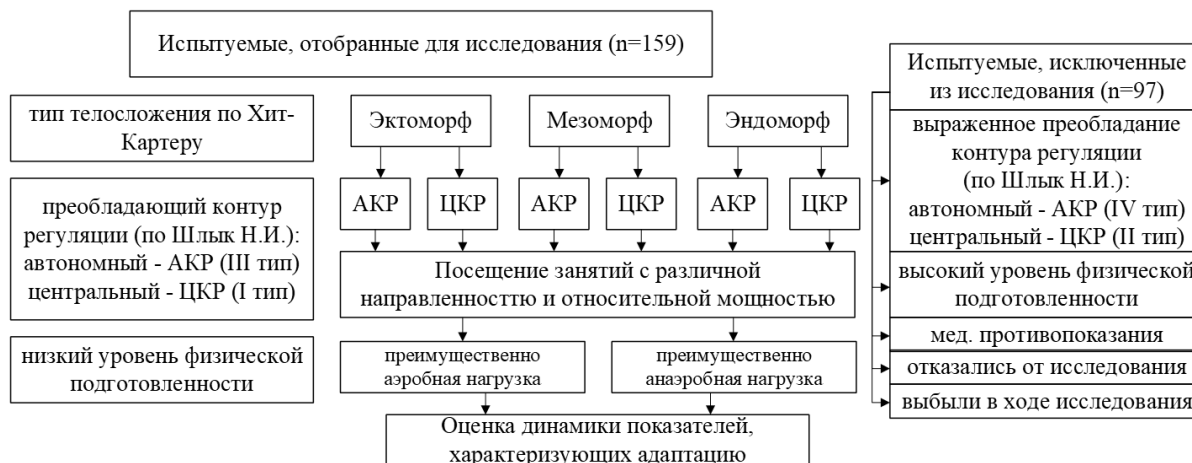


Рис. 1. Схема исследования

Основным методом изучения особенностей адаптации обучающихся явилась оценка кардиоинтервалографии (АПК «Варикард 2.52»). Учитывались следующие показатели: вариационный размах – dX , мс; квадратный корень из средней суммы квадратов разностей между соседними NN-интервалами – $RMSSD$, мс; общая мощность спектра – TP , $мс^2$; стресс-индекс – SI , ед.; индекс централизации – $IC (HF + LF)/VLF$, ед.; индекс напряжения центральных механизмов – $IC (LF + VLF)/HF$, ед.; индекс активации подкорковых нервных центров – $ISCA (LF/VLF)$, ед.; показатель активности регуляторных систем – $ПАРС$.

Для оценки динамики показателей использовались следующие методы математической статистики (Jamovi v. 2.6.44): тест Шапиро-Уилка (нормальность распределения); средние арифметические значения; стандартное отклонение; t-критерий Стьюдента при нормальном распределении и T-критерий Уилкоксона при ненормальном распределении (достоверность различий).

Результаты исследования. В таблице 1 представлены показатели, характеризующие адаптацию организма студентов.

Динамика dX продемонстрировала разнонаправленные изменения в зависимости от типа телосложения и контура регуляции. При преимущественно аэробной нагрузке у эктоморфов и мезоморфов с автономным контуром (АК) отмечен рост dX ($p < 0,05$), указывающий на повышение лабильности сердечного ритма. В то же время у эндоморфов с центральным контуром (ЦК) зафиксировано снижение показателя, свидетельствующее о нарастании симпатикотонии. При анаэробной нагрузке тенденция сохранилась: у АК-групп вариабельность ритма оставалась выше, чем с преобладанием ЦК, особенно у эндоморфов.

Таблица 1

Динамика показателей, характеризующих адаптацию организма к физической нагрузке различной направленности

Нагрузка Группы	Преимущественно аэробная						Преимущественно анаэробная					
	Экт.		Мез.		Энд.		Экт.		Мез.		Энд.	
	АК	ЦК	АК	ЦК	АК	ЦК	АК	ЦК	АК	ЦК	АК	ЦК
	n=19	n=16	n=11	n=13	n=9	n=13	n=13	n=11	n=13	n=12	n=13	n=16
Вариационный размах – dX, мс												
Исход	313 ±53	223 ±26	301 ±52	217 ±22	273 ±47	196 ±25	310 ±50	226 ±27	296 ±50	218 ±23	270 ±46	190 ±23
Итог	338 ±56*	230 ±27	325 ±57*	212 ±20	241 ±39*	162 ±16*	297 ±59	208 ±28*	307 ±54	215 ±21	265 ±43	184 ±19
Квадратный корень из средней суммы квадратов разностей между соседними NN-интервалами – RMSSD, мс												
Исход	53 ±7	28 ±5	65 ±8	31 ±6	50 ±7	21 ±5	54 ±7	26 ±5	62 ±8	33 ±6	49 ±7	20 ±5
Итог	64 ±8*	30 ±5	73 ±9	30 ±6	44 ±7	16 ±5*	51 ±7	23 ±5	66 ±9	32 ±6	47 ±6	19 ±5
Общая мощность спектра – TP, мс ²												
Исход	2767 ±370	941 ±147	2894 ±331	1076 ±183	2448 ±288	823 ±118	2750 ±365	950 ±152	2861 ±326	1108 ±197	2413 ±275	806 ±115
Итог	3075 ±392*	1028 ±152*	3157 ±358*	1014 ±170	2026 ±252*	784 ±113	2516 ±357	928 ±140	3025 ±349	1046 ±185	2307 ±261	788 ±106
Стресс-индекс – SI, ед.												
Исход	49 ±7	136 ±24	53 ±8	128 ±21	65 ±10	218 ±35	49 ±7	136 ±24	53 ±8	128 ±21	65 ±10	218 ±35
Итог	44 ±6	117 ±20*	45 ±8	135 ±23	78 ±11*	237 ±38*	52 ±7	145 ±26*	48 ±8	132 ±22	68 ±11	220 ±34
Индекс централизации – IC (HF + LF)/VLF, ед.												
Исход	4,21 ±0,5	1,92 ±0,3	4,45 ±0,5	1,90 ±0,3	3,77 ±0,4	1,64 ±0,2	4,15 ±0,5	1,95 ±0,3	4,37 ±0,5	1,86 ±0,3	3,85 ±0,4	1,61 ±0,2
Итог	4,48 ±0,6*	1,81 ±0,3	4,76 ±0,6*	1,78 ±0,3	3,56 ±0,4*	1,51 ±0,2	4,56 ±0,6*	1,67 ±0,3*	4,91 ±0,6*	1,64 ±0,3	3,42 ±0,4*	1,36 ±0,2*
Индекс напряжения центральных механизмов – IC (LF + VLF)/HF, ед.												
Исход	1,39 ±0,2	2,26 ±0,4	1,20 ±0,2	1,97 ±0,3	1,66 ±0,3	3,15 ±0,5	1,41 ±0,2	2,29 ±0,4	1,27 ±0,2	2,00 ±0,3	1,59 ±0,3	3,20 ±0,5
Итог	1,32 ±0,2	2,38 ±0,4	1,13 ±0,2	2,10 ±0,3	1,75 ±0,3	3,36 ±0,5*	1,25 ±0,2*	2,52 ±0,4*	1,06 ±0,2	2,28 ±0,3*	1,91 ±0,3*	3,65 ±0,5*
Индекс активации подкорковых нервных центров – ISCA (LF/VLF), ед.												
Исход	2,00 ±0,3	1,05 ±0,2	1,95 ±0,3	0,90 ±0,2	1,99 ±0,3	1,00 ±0,2	2,05 ±0,3	1,04 ±0,2	2,00 ±0,3	0,93 ±0,2	1,97 ±0,3	0,97 ±0,2
Итог	2,14 ±0,3	0,96 ±0,2	2,10 ±0,3	0,83 ±0,2	1,84 ±0,3	0,90 ±0,2	2,28 ±0,3*	0,87 ±0,2*	2,25 ±0,3*	0,75 ±0,2*	1,68 ±0,3*	0,79 ±0,2*

Примечание: * – $p < 0,05$; Экт – эктоморф, Мез – мезоморф, Энд – эндоморф; АК – автономный контур; ЦК – центральный контур.

Изменения показателя RMSSD подтвердили различия в парасимпатической активности между группами. У эктоморфов и мезоморфов с АК наблюдалось значимое увеличение RMSSD ($p < 0,05$) как после преимущественно аэробных, так и анаэробных нагрузок. У эндоморфов с ЦК показатель снижался, демонстрируя истощение адаптационных резервов. При анаэробной нагрузке у мезоморфов с АК зафиксирован самый высокий прирост RMSSD, тогда как у эндоморфов с ЦК минимальное значение, указывающее на ригидность ритма.

Динамика TP выявила наибольшую пластичность регуляторных систем у мезоморфов с АК: в случае с аэробной нагрузкой TP выросла на 9,6 % ($p < 0,05$), а

анаэробной – на 5,7 %. У эктоморфов с АК также отмечен прирост TP (11,1 % при аэробной нагрузке), однако у эндоморфов с ЦК наблюдалось снижение на 4,7 % при анаэробной нагрузке. Это подтверждает, что центральный контур регуляции ограничивает адаптационные возможности, особенно у лиц с избыточной массой тела.

Изменения SI отразили разную степень напряжения регуляторных систем. У эктоморфов и мезоморфов с АК после различных видов нагрузок SI снижался (на 10,2 % и 15,1 % соответственно), что говорит о благоприятной адаптации. У эндоморфов с ЦК, напротив, индекс увеличился на 8,7 % при аэробной и на 1,0 % при анаэробной нагрузке, указывая на переход к централизации управления ритмом. Наибольший рост SI зафиксирован у эндоморфов с ЦК после преимущественно аэробной нагрузки (+20,0 %), что свидетельствует о значительном напряжении механизмов адаптации.

Сравнительный анализ групп по типу телосложения показал, что мезоморфы обладают наивысшей адаптивностью: у них отмечены наибольшие показатели прироста dX, RMSSD и TP при преобладании АК, а эктоморфы демонстрируют схожую динамику, но с меньшей амплитудой изменений. Эндоморфы, особенно с ЦК, характеризуются наименьшими резервами — у них чаще регистрировались снижение TP и рост SI, что коррелирует с доминированием симпатической регуляции и низкой вариабельностью ритма.

Влияние контура регуляции оказалось ключевым фактором: АК-группы во всех соматотипах показывали более благоприятные изменения (рост dX, RMSSD, TP; снижение SI), тогда как ЦК-группы – признаки дезадаптации (снижение вариабельности, повышение SI). Это подтверждает, что автономный контур обеспечивает гибкую настройку регуляторных механизмов, а центральный сопряжён с риском истощения резервов, особенно при высоких нагрузках. Наиболее уязвимыми являются эндоморфы с ЦК, у которых сочетание конституциональных особенностей и типа регуляции создаёт предпосылки для срыва адаптации.

Далее проведем анализ трех ключевых индексов вариабельности сердечного ритма (BCP): IC (HF + LF)/VLF (индекс централизации), IC (LF + VLF)/HF (индекс напряжения центральных механизмов) и ISCA (LF/VLF) (индекс активации подкорковых центров). Они отражают баланс между автономными и центральными механизмами регуляции сердечно-сосудистой системы. Выявлены принципиальные различия между группами с автономным контуром регуляции и центральным контуром регуляции: АК-группы демонстрируют усиление автономного контроля и активацию подкорковых центров, тогда как ЦК-группы — централизацию регуляции и угнетение подкорковых механизмов.

При преимущественно аэробной нагрузке у АК-групп наблюдается умеренный рост IC (на 5,7–7,0 %), указывающий на усиление парасимпатического влияния, а у ЦК-групп — снижение IC (на 5,7–7,9 %) из-за доминирования центральных эрготропных механизмов. Преимущественно анаэробная нагрузка усиливает эти тенденции: у АК-групп прирост IC достигает 9,9–12,4 % (максимально у мезоморфов), а у ЦК-групп снижение составляет 11,8–15,5 % (наиболее выражено у эндоморфов). Таким образом, высокая интенсивность нагрузки стимулирует адаптивные механизмы у АК и усугубляет дезадаптацию у ЦК.

Индекс IC (LF + VLF)/HF растёт у ЦК-групп (на 5,3–14,0 %) и снижается у АК-групп (на 5,0–16,5 %), что отражает напряжение центральных механизмов у первых и преобладание автономного контроля у вторых. Индекс ISCA увеличивается у АК-групп (на 7,0–12,5 %) и падает у ЦК-групп (на 7,8–19,4 %), свидетельствуя об активации

сосудистого компонента у АК и угнетении подкорковых центров у ЦК. Наибольшая устойчивость выявлена у мезоморфов АК (максимальные приросты IC и ISCA), а наибольшая уязвимость — у эндоморфов ЦК (критические снижения IC и ISCA).

Мезоморфы с АК демонстрируют наилучшую адаптацию к физическим нагрузкам, показывая максимальный рост IC (HF+LF)/VLF (+12,4 %, $p<0,05$), наибольшее снижение IC (LF+VLF)/HF (–16,5 %) и наивысший прирост ISCA (+12,5 %). Напротив, эндоморфы с ЦК выявляют наибольшую дезадаптацию: у них зафиксировано наибольшее падение IC (HF+LF)/VLF (–15,5 %), наибольший рост IC (LF+VLF)/HF (+14,1 %) и самое выраженное снижение ISCA (–19,4 %). Преимущественно анаэробная нагрузка усиливает как адаптивные, так и дезадаптивные тенденции, что требует индивидуального подхода к дозированию нагрузок с учётом типа регуляции (АК/ЦК) и телосложения.

Далее, в таблице 2 отражены показатели активности регуляторных систем в начале и в конце исследования.

Таблица 2

Показатель активности регуляторных систем студентов

Группа	Этап исслед.	Показатель активности регуляторных систем – ПАРС (%)							
		Удовлетворительная (1–3)		Напряжение (4–5)		Неудовлетворительная (6–7)		Срыв адаптации (8 и более)	
		Аэр.	Анаэр.	Аэр.	Анаэр.	Аэр.	Анаэр.	Аэр.	Анаэр.
Экто АК	Исход.	31,6	30,8	52,6	53,8	15,8	15,4	0	0
	Итог	21,1	15,4	47,4	38,5	31,6	30,8	0	15,4
Экто ЦК	Исход.	18,8	18,2	43,8	45,5	31,3	27,3	6,3	9,1
	Итог	12,5	0	31,3	36,4	43,8	45,5	12,5	18,2
Мезо АК	Исход.	45,5	38,5	45,5	53,8	9,1	7,7	0	0
	Итог	27,3	38,5	54,5	53,8	18,2	7,7	0	0
Мезо ЦК	Исход.	23,1	25	61,5	50	15,4	16,7	0	8,3
	Итог	7,7	8,3	46,2	41,7	38,5	41,7	7,7	8,3
Эндо АК	Исход.	20	25	70	50	10	25	0	0
	Итог	0	16,7	40	33,3	40	41,7	20	8,3
Эндо ЦК	Исход.	16,7	17,6	25	29,4	41,7	47,1	16,7	5,9
	Итог	0	0	16,7	47,1	58,3	35,3	25	17,6

Анализ показателя активности регуляторных систем (ПАРС) продемонстрировал чёткую зависимость адаптационных возможностей студентов от сочетания двух ключевых факторов: типа телосложения и преобладающего контура вегетативной регуляции (автономного — АК или центрального — ЦК). Высокий уровень устойчивости к физическим нагрузкам выявлена у мезоморфов с АК, тогда как максимальная уязвимость характерна для эндоморфов с ЦК.

Мезоморфы с АК продемонстрировали наиболее благоприятный профиль адаптации: несмотря на снижение доли удовлетворительной адаптации с 45,5 % до 27,3 % (аэробные нагрузки) и с 38,5 % до 38,5 % (анаэробные), у них полностью отсутствовали случаи срыва адаптации на обоих этапах исследования. При этом рост доли «напряжения» (до 54,5 % при аэробных и 53,8 % при анаэробных нагрузках) не перешёл в дезадаптивные формы, что указывает на достаточные функциональные резервы.

Эндоморфы, особенно с ЦК, показали наихудшие результаты: у них зафиксировано полное исчезновение удовлетворительной адаптации (с 16,7 % до 0,0 % при аэробных и с 17,6 % до 0,0 % при анаэробных нагрузках), критическое увеличение доли «неудовлетворительной» адаптации (до 58,3 % при аэробных и 35,3 % при анаэробных) и существенный рост случаев срыва адаптации (до 25,0 % при аэробных и 17,6 % при анаэробных нагрузках). Это подтверждает, что сочетание эндоморфного типа телосложения и ЦК создаёт высокий риск функционального истощения.

Эктоморфы заняли промежуточное положение, но проявили заметную дифференциацию в зависимости от типа регуляции: при АК наблюдалось ухудшение показателей (снижение удовлетворительной адаптации с 31,6 % до 21,1 % при аэробных и с 30,8 % до 15,4 % при анаэробных нагрузках), а при ЦК – выраженная дезадаптация, включая появление случаев срыва адаптации (до 12,5 % при аэробных и 18,2 % при анаэробных нагрузках). Особенно «тревожная» динамика отмечена при анаэробных нагрузках, провоцирующих более резкое ухудшение показателей.

Сравнительный анализ аэробных и анаэробных нагрузок выявил, что анаэробные воздействия оказывают более выраженное стрессорное влияние на все группы, но особенно на лиц с исходно сниженными адаптационными резервами (эндоморфы, эктоморфы с ЦК). Например, у эндоморфов с АК при анаэробных нагрузках доля «неудовлетворительной» адаптации выросла на 16,7 % (с 25,0 % до 41,7 %), а у эктоморфов с ЦК отмечено увеличение случаев срыва адаптации на 9,1 %, что подчёркивает необходимость дифференцированного подхода к включению таких нагрузок в тренировочные программы.

Ключевым фактором, определяющим адаптационный потенциал, выступает сочетание конституциональных особенностей и типа вегетативной регуляции. Центральный контур, напротив, связан с повышенной напряжённостью регуляторных систем, доминированием симпатической активности и риском истощения адаптационных резервов, особенно у эндоморфов. В связи с тем, что занятия с преимущественно анаэробной работой вызывает более интенсивный ответный импульс со стороны организма, чем аэробные, это требует дифференцированного подхода к их включению в программы физического воспитания. Полученные данные обосновывают необходимость персонализации тренировочного процесса с учётом соматотипа и вегетативного профиля студентов для профилактики дезадаптации и сохранения здоровья.

Заключение. В ходе исследования продемонстрировано, что адаптационные возможности студентов к физическим нагрузкам различной направленности определяются комплексом факторов, среди которых ключевую роль играют тип телосложения и доминирующий контур вегетативной регуляции. Наибольшей устойчивостью к нагрузкам обладают мезоморфы с АК: у них зафиксированы максимальные приросты показателей variability сердечного ритма (dX, RMSSD, TP), снижение стресс-индекса (SI) и отсутствие случаев срыва адаптации. Напротив, эндоморфы с ЦК проявили наибольшую склонность – у них наблюдалось снижение TP, рост SI, а также значительное увеличение доли неудовлетворительной адаптации и случаев срыва регуляторных механизмов.

Установлено, что автономный контур регуляции обеспечивает более гибкую настройку физиологических механизмов: у АК-групп у всех соматотипов отмечались признаки благоприятной адаптации (усиление парасимпатического влияния, активация подкорковых центров, экономичная работа сердечно-сосудистой системы). В то же время центральный контур сопряжён с повышенным напряжением регуляторных систем, доминированием симпатической активности и потенциалом к снижению адаптационного потенциала, особенно при физических нагрузках с анаэробной

направленностью. При этом анаэробные нагрузки оказывали более выраженное стрессорное воздействие по сравнению с аэробными, что наиболее критично для групп с исходно сниженными функциональными резервами (эндоморфы, эктоморфы с ЦК).

Полученные результаты обосновывают необходимость персонализации программ физического воспитания студентов: дозирование нагрузок должно учитывать как конституциональные особенности, так и индивидуальный профиль вегетативной регуляции. Такой дифференцированный подход позволит минимизировать риск дезадаптации, оптимизировать процессы восстановления и повысить эффективность тренировочного процесса, способствуя сохранению здоровья и улучшению функциональных возможностей организма обучающихся.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криволапчук И.А., Баранцев С.А., Герасимова А.А. Нагрузки различной метаболической направленности и двигательная подготовленность школьников: специфичность адаптационных эффектов // Новые исследования. – 2016. – № 1 (46). – С. 81-88.
2. Горбачева А.К., Ковалева А.В., Сухова А.В., Федотова Т.К. Показатели вариабельности сердечного ритма в структуре общей конституции как алгоритма адаптации к современной антропогенной среде (пилотное исследование) // Вестник Московского университета. Серия 23: Антропология. – 2021. – № 1. – С. 42-53.
3. Kim H.J., Park Y., Lee J. The Validity of Heart Rate Variability (HRV) in Educational Research and a Synthesis of Recommendations // Educ Psychol Re. – 2024. – No 36(2). – DOI: 10.1007/s10648-024-09878-x
4. Гуманюк К.А., Коваленко З.М., Рыбченко Н.В., Бородин П.В., Тютюков В.Г. Влияние учебных стрессогенных факторов на состояние центральной нервной системы студентов-спортсменов вузов г. Хабаровска // Флагман науки. – 2024. – № 11 (22). – С. 135-142.
5. Малмыцкая В.С., Насырова Г.Х. Влияние учебной нагрузки на физическое состояние студентов // Студенческий научный форум 2024: сборник статей XI Международной научно-практической конференции. Пенза. – 2024. – С. 200-204.
6. Кашина Ю.В., Покровский В.М., Чередник И.Л., Бурлуцкая А.В. Комплексная оценка адаптации студентов к процессу обучения в ВУЗЕ // Человек. Спорт. Медицина. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 73-79.
7. Евсеев А.В. Влияние четырёхнедельной программы аэробных нагрузок на вариабельность сердечного ритма и стрессоустойчивость студентов ВУЗА // Парадигма. – 2025. – № 5-1. – С. 63-67.
8. Дубиков Н.В. Влияние инклюзивного подхода в рамках элективной физической культуры на функциональное состояние студентов // Известия Тульского государственного университета. Физическая культура. Спорт. – 2025. – № 7. – С. 31-38.
9. Постнова М.В. Соматотипирование как подход к индивидуализации здоровьесберегающего сопровождения человека на этапах образования и профессионального самоопределения // Вестник Волгоградского государственного университета. – 2015. – №5 – С. 40-47.
10. Сетко Н.П., Жданова О.М., Сетко А.Г. Индивидуально-типологический подход в анализе функционального состояния организма студентов-медиков // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – 2024. – Т. 23, № 2. – С. 6-18.
11. Саркисов А.К., Гаврилова Е.А. Оценка уровня стресса студентов медицинского университета на основе вариабельности сердечного ритма // Актуальные проблемы физической культуры студентов медицинских вузов. Под редакцией Е. О. Явдошенко. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 237-242.
12. Щербакова А.Э., Попова М.А., Хабибуллин Е.В., Лакомкина А.С., Чистова В.В. Показатели функционального состояния центральной нервной системы и вегетативной регуляции сердечного ритма студентов с разным уровнем личностного адаптационного потенциала // Современные вопросы биомедицины. – 2024. – № 2, Т. 8. – С. 196-204.
13. Жумабаева Т.Т., Ажибекова З.Ы. Вариабельность сердечного ритма как состояние регуляторных механизмов физиологической адаптации организма // Бюллетень науки и практики. – 2022. – Т. 8, № 11. – С. 350-356.
14. Князева Е.С., Ляжкин С.В., Мищенко Н.В., Трифонова Т.А. Оценка функционального состояния организма студентов с использованием параметров вариабельности сердечного ритма // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 1 (127). – DOI: 10.23670/IRJ.2023.127.8

Поступила в редакцию 24.10.2025 г.

**PECULIARITIES OF ADAPTATION OF STUDENTS OF DIFFERENT MORPHOLOGICAL
AND FUNCTIONAL STATUS TO PHYSICAL ACTIVITIES OF DIFFERENT ORIENTATION**

G. V. Lurye

The study examines the peculiarities of adaptation of students of different morphological and functional status to physical exertion of various orientations. Assessment of heart rate variability was used as the main method of studying the peculiarities of students' adaptation. It was revealed that mesomorphs with an autonomous regulation circuit (AK) demonstrate the most effective adaptivity. Endomorphs with a central contour (CC) are the most vulnerable: They recorded a decrease in spectral power, an increase in the stress index (SI), and the detection of cases of adaptation failure. The AK groups in all somatotypes showed favorable changes, while the CC groups showed signs of maladaptation. Anaerobic loads had a more pronounced stress effect, especially on groups with initial stress on regulatory mechanisms. The results substantiate the need to personalize physical activity, taking into account body type and autonomic regulation.

Keywords: body adaptation; heart rate variability; type of autonomic regulation; anthropometric features; body type; indicator of activity of regulatory systems.

Лурье Герман Владиславович

ассистент департамента физической культуры,
спорта и медиакоммуникаций, младший научный
сотрудник института естествознания и спортивных
технологий, Московский городской педагогический
университет, г. Москва, Россия.
E-mail: germanlurye@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-0534-1333
AuthorID: 1109736

Lurye German Vladislavovich

assistant of the department of physical education,
sports and media communications, junior researcher of
the Research Center, Moscow City University,
Moscow, Russia,
E-mail: germanlurye@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-0534-1333
AuthorID: 1109736

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЕ ПЛЕНКИ ФЕРРИТА-ГРАНАТА НА ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТОМАКИРОВАННЫХ КЛЕТОК

© 2025. Ю. А. Сирюк, В. В. Кононенко, Р. А. Капшуков

Экспериментально изучены фазовые переходы в решетках цилиндрических магнитных доменов (ЦМД) магнитоодноосной пленки феррита-граната, индуцированные магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки сонаправленным намагниченности внутри доменов. Показано, что структура доменных границ определяет полевой интервал устойчивости решетки цилиндрических магнитных доменов и определяет род этих фазовых переходов. Показано, что при транспортировке магнитомаркированных клеток разного размера над решеткой ЦМД в управляющих полях типа знакопеременный меандр в области увеличения периода решетки ЦМД можно организовать сортировку клеток по размеру.

Ключевые слова: магнитомаркированные клетки, градиентные магнитные поля, феррит-гранатовые пленки, решетка цилиндрических магнитных доменов, фазовые переходы в доменных структурах, знакопеременный меандр.

Введение. Использование феррит-гранатовых пленок с решеткой цилиндрических магнитных доменов в качестве подложек в устройствах типа «лаборатория на чипе» для транспортировки парамагнитных микрообъектов [1] и магнитомаркированных (ММ) клеток [2] активно исследуется в настоящее время. При этом обычно амплитуда индукции управляющего магнитного поля не превышает величину, при которой сохраняется постоянство периода решетки ЦМД [1]. Так как для сохранения жизнеспособности магнитомаркированных клеток количество захваченных клетками магнитных наночастиц должно быть ограничено, то объемная магнитная восприимчивость жизнеспособных магнитомаркированных клеток обычно не превышает величину 0,001. Исследования, проведенные в [2] показывают, что при такой величине магнитной восприимчивости и амплитуде управляющего магнитного поля, при которой остается постоянным период решетки ЦМД, можно осуществить передвижение ММ клеток над решеткой ЦМД для клеток с размерами 4 мкм и выше. Для того, чтобы заставить двигаться ММ клетки малого размера (≈ 1 мкм) необходимо повышать амплитуду индукции управляющего магнитного поля выше 5 мТл. При этом решетка ЦМД работает в режимах, которые ранее не исследованы и в которых возможно наличие фазовых переходов как в доменных границах, так и в самой решетке ЦМД.

Неоднородность доменной структуры ферритов-гранатов уже много лет привлекает внимание исследователей, что объясняется интересами как фундаментальной науки, так и прикладной [3]. Основы теории доменных структур ферромагнетиков были заложены в работе Ландау и Лифшица [4]. В этой работе они показали, что возникновение доменной структуры (ДС) в кристалле обусловлено уменьшением общей энергии образца за счет уменьшения энергии магнитного дипольного взаимодействия, и установили связь размеров доменов с геометрическими и магнитными параметрами образца. Эта работа позволила навести определенный порядок в хаосе экспериментальных данных, накопленных к этому времени, а также стимулировала широкие исследования доменной структуры, в результате которых выяснилось, что доменная структура (особенно у поверхности образца) сложная, и на ее конкретный вид существенное влияние оказывает не только ориентация

поверхностей по отношению к кристаллографической оси, но и чистота поверхности, поверхностные деформации, толщина образца и т.д. [5].

Первые систематические исследования ДС в тонких пленках, помещенных во внешнее магнитное поле, были выполнены Коем и Энцем [6], а также Кацером и Гемперле [7, 8]. В этих работах показано, что под действием внешнего магнитного поля полосовая ДС становится неустойчивой, и домены, в которых намагниченность направлена против поля, распадаются на цилиндрические магнитные домены (ЦМД). Они обладают высокой подвижностью и малыми размерами. Центральные силы взаимодействия между ними приводят к образованию гексагональной решетки ЦМД. В некотором приближении ЦМД можно рассматривать как двумерные частицы, обладающие внутренней структурой и магнитным зарядом. В зависимости от структуры доменных границ (ДГ) и наличия в них вертикальных блоховских линий (ВБЛ), различают «мягкие» и «жесткие» ЦМД. Они отличаются подвижностью и возможностью обратно изменить свою форму и размеры при воздействии магнитного поля или температуры, что сказывается на поведении решетки ЦМД.

После того, как Бобек предложил использовать ЦМД в устройствах вычислительной техники для записи и хранения информации, начался этап бурных исследований ДС разных материалов – носителей ЦМД.

Прогресс в понимании закономерностей поведения изолированных ДС был достигнут в работах Тиля [9, 10], Драйвестейна, Дорлейна [11] и Кейпа, Лемана [12], в которых использован феноменологический подход, заключающийся в следующем. На основе экспериментальных данных строится геометрическая модель ДС и рассчитывается ее полная энергия. Путем минимизации полной энергии образца рассчитываются равновесные параметры ДС: размеры доменов и период структуры. В [9–12] энергии различных периодических ДС были минимизированы численными методами и получены зависимости параметров ДС от напряженности внешнего магнитного поля.

Аналитическая теория статических и динамических свойств решеток ЦМД была построена Барьяхтаром В.Г., Горобцом Ю.И. и Денисовым С.И. [13–15]. В рамках этой теории получены уравнения, определяющие параметры решетки ЦМД как функции напряженности магнитного поля и магнитных характеристик пленки, изучен спектр собственных колебаний решеток ЦМД и определены условия их устойчивости.

При изменении температуры и внешнего магнитного поля в решетках ЦМД происходят фазовые переходы (ФП). Для объяснения экспериментальных результатов был применен термодинамический подход, при котором проблема фазовых переходов в ДС рассматривалась как часть общей проблемы физики фазовых переходов [16].

В работе [17] изучены спонтанные и индуцированные магнитным полем фазовые переходы в жесткой решетке ЦМД магнитоодноосной пленки феррита-граната. Показано, что температурный и полевой интервалы устойчивости решетки зависят от структуры доменных границ.

Как видно из приведенных примеров, интерес к исследованию фазовых переходов сохраняется до настоящего времени.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований фазовых переходов решетки цилиндрических магнитных доменов, индуцированных внешним магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки и, в отличие от работы [17], сонаправленным намагниченности внутри домена. Работа является продолжением исследования ФП, индуцированных магнитным полем, антипараллельным намагниченности внутри ЦМД [17].

Цель настоящей работы:

1. Изучить влияние постоянного внешнего магнитного поля, перпендикулярного плоскости пленки (поле смещения) сонаправленного намагниченности внутри ЦМД на решетку ЦМД и на доменные границы;
2. Показать, что ФП в доменной границе вызывают ФП в решетке ЦМД и определяют род этих переходов;
3. Изучить влияние переменного внешнего поля вида знакопеременный меандр на особенности движения ММ клеток над решеткой ЦМД.

Такие исследования актуальны как для фундаментальной науки (физики твердого тела, физики магнитных явлений и т.д.), так и в прикладном плане. Поскольку домены феррит-гранатовых пленок генерируют сильные градиенты магнитного поля, то исследователи многих стран последние десятилетия пытаются использовать эти свойства для направленной транспортировки магнитных микрочастиц и биоклеток по поверхности пленки, находящейся под воздействием магнитных полей [18]. Но эти поля влияют и на доменную структуру, вызывая в ней фазовые переходы. Такое влияние необходимо учитывать при контролируемой транспортировке магнитных микрообъектов по поверхности пленки.

Общие сведения об особенностях доменных границ в решетке ЦМД в магнитоодноосной пленке феррита-граната. Магнитная доменная структура является термодинамической системой, стремящейся при любых внешних воздействиях занять наиболее устойчивое состояние, соответствующее минимуму энергии. Магнитные доменные структуры представляют собой периодически чередующиеся области с антипараллельным направлением намагниченности, разделенные доменными границами. Доменные границы (ДГ) также являются неоднородными структурами, в которых происходят изменения ориентации спинов от направления спинов в одном домене к направлению спинов в соседнем домене. Структура ДГ зависит от выбранного кристаллографического направления пленки, ее толщины, температуры и действия магнитных полей. При рассмотрении распределения спинов в ДГ предполагается, что при переходе через границу нормальная составляющая спинового магнитного момента не испытывает изменений, так как в этом случае полная магнитостатическая энергия минимальна. При этом намагниченность доменной границы лежит в плоскости стенки, и на поверхности стенки не возникают магнитные заряды.. Это означает, что поворот спинов по толщине ДГ можно уподобить винтовому вращению. Такие доменные стенки называются доменными границами Блоха и представляют собой наиболее общий тип доменных границ в ЦМД-материалах, так как они минимизируют энергию размагничивания. Симметрия допускает два возможных направления поворота намагниченности в ДГ – правовинтовое и левовинтовое.

Если в пленке формировать решетку ЦМД монополярным импульсным магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки, то создается доменная граница ЦМД, имеющая сложную структуру. В границе ЦМД создается большое число поворотов спинов двух направлений (полярностей), как левовинтовых, так и правовинтовых. Линия, разделяющая два участка стенки Блоха с различными полярностями, проходит вертикально через пленку, и такую структуру назвали вертикальной линией Блоха (ВБЛ). Число линий Блоха в ЦМД должно быть четным, т.е. в стенке ЦМД могут находиться только пары линий Блоха. Длина окружности ЦМД представляет собой граничное условие, которое заставляет линии Блоха сближаться до интервала $s = \pi d / 2N$, где d – диаметр ЦМД, N – число оборотов спинов, s – расстояние

между ВБЛ. Для ЦМД с диаметром 4–13 мкм получено максимальное число оборотов спинов $N_0 = 90$, что соответствует 180 линиям ВБЛ.

Как было сказано ранее, доменная структура является термодинамической системой. Поэтому распределение доменов происходит таким образом, чтобы общая энергия системы была минимальна. Внешнее магнитное поле, перпендикулярное плоскости пленки (поле смещения), нарушает магнитное равновесие доменов. Под его воздействием область доменов с противоположной полю намагниченностью уменьшается. Если это полосовые домены, то уменьшается их ширина, если цилиндрические магнитные домены – то уменьшается диаметр. При определённой величине $H \leq H_c$ такие домены исчезают, т.е. коллапсируют. Первыми коллапсируют полосовые домены, затем решетка ЦМД, а потом и ЦМД.

Аналитическая теория решетки ЦМД развита в работах [13, 14], согласно которым учет поля не изменяет энергию доменных границ и магнитостатическую энергию. В то же время учет поля приводит к необходимости учета энергии взаимодействия намагниченности с магнитным полем. При приближении поля смещения к полю коллапса происходит перестройка доменов, связанная с развитием неустойчивости [15]. При этом должен коллапсировать каждый третий ЦМД и увеличиваться период решетки. В [18] экспериментально наблюдалась перестройка решетки ЦМД вблизи поля коллапса, связанная с появлением динамической неустойчивости. Было обнаружено, что значения поля, при которых проходит перестройка, отделены друг от друга конечными интервалами, уменьшающимися с ростом периода решетки.

Фазовые переходы в доменной структуре пленки феррита-граната. Для исследования выбрана пленка с развитой поверхностью $\langle 111 \rangle$, выращенная методом жидкофазной эпитаксии на гадолиний-галлиевой подложке состава $(TmBi)_3(FeGa)_5O_{12}$. Толщина пленки $h = 8,4$ мкм. При комнатной температуре фактор качества $Q > 5$. При такой величине фактора качества в доменной границе действием импульсного магнитного поля создаются вертикальные блоховские линии. Температурно-полевые характеристики пленки приведены на рис.1.

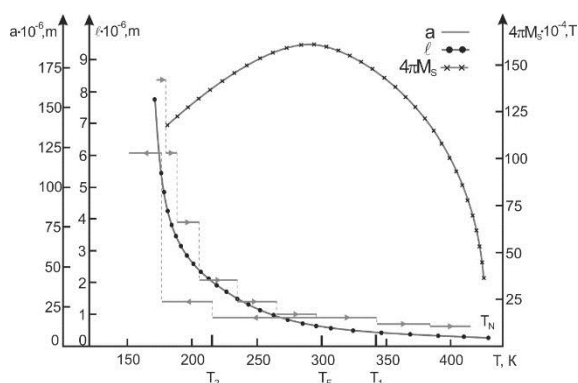


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности насыщения $4\pi M_s$,

характеристической длины ℓ и параметра решетки ЦМД a пленки

В работе используются два внешних магнитных поля с векторами напряженности, перпендикулярными плоскости пленки: постоянное двух направлений (поле смещения H_c) и монополярное импульсное. Исследования проведены при температуре $T = 300$ К. Доменная структура наблюдается благодаря эффекту Фарадея. Решетка ЦМД формируется монополярным импульсным магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки. При этом создается доменная граница, имеющая сложную структуру.

В работе исследуются два вида решеток ЦМД. Первая – РЦД₁, формируется импульсным магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки, при отсутствии поля смещения; вторая – РЦД₂, формируется импульсным полем в присутствии поля смещения. Затем импульсное поле выключается. Обе решетки являются равновесными, но при наложении поля смещения РЦД₁ оказывается неравновесной, а РЦД₂, формируемая при разных полях смещения, является равновесной. На рисунке 2

показаны полевые зависимости параметров решеток (a – период решетки, d – диаметр ЦМД). На рис. 3, а показан общий вид гексагональной решетки ЦМД в исходном состоянии. Под действием импульсного магнитного поля создаются жесткие доменные границы с большим числом ВБЛ. Как было рассказано, в идеальных условиях импульсным магнитным полем при отсутствии поля смещения в доменных границах изолированного ЦМД создается $N = 180$ вертикальных блоховских линий. В реальных условиях в доменной границе решетки ЦМД создается меньшее число ВБЛ: $N_1 < 180$, т.е. в относительных единицах $N_1/N_0 < 1$. Плотность упаковки такой решетки ЦМД $y = \frac{d}{a} = 0,74$.

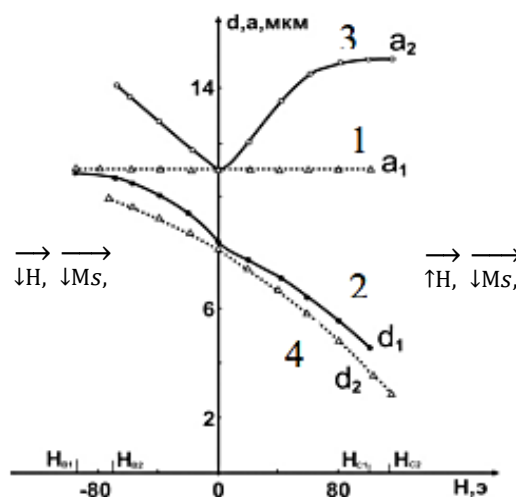


Рис. 2 Полевая зависимость параметров РЦД₁ и РЦД₂ пленки: 1, 2– a , d РЦД₁, 3, 4– a , d РЦД₂

Фазовые переходы в доменной структуре, индуцированные полем смещения, сонаправленным намагниченности внутри ЦМД. При наложении поля смещения, сонаправленного намагниченности внутри ЦМД, диаметры обеих решеток увеличиваются, период РЦД₁ остается постоянным, а период РЦД₂ увеличивается (рис. 2). При величине поля смещения $H = H_{S1}$ в решетке РЦД₁ каждый ЦМД приобретает форму шестиугольника, а гексагональная решетка превращается в сотовую структуру СДС₁ (рис. 3, Б). Число ВБЛ в доменной границе сохраняется, они группируются в углах шестиугольника. В РЦД₁ происходит фазовый переход второго рода.

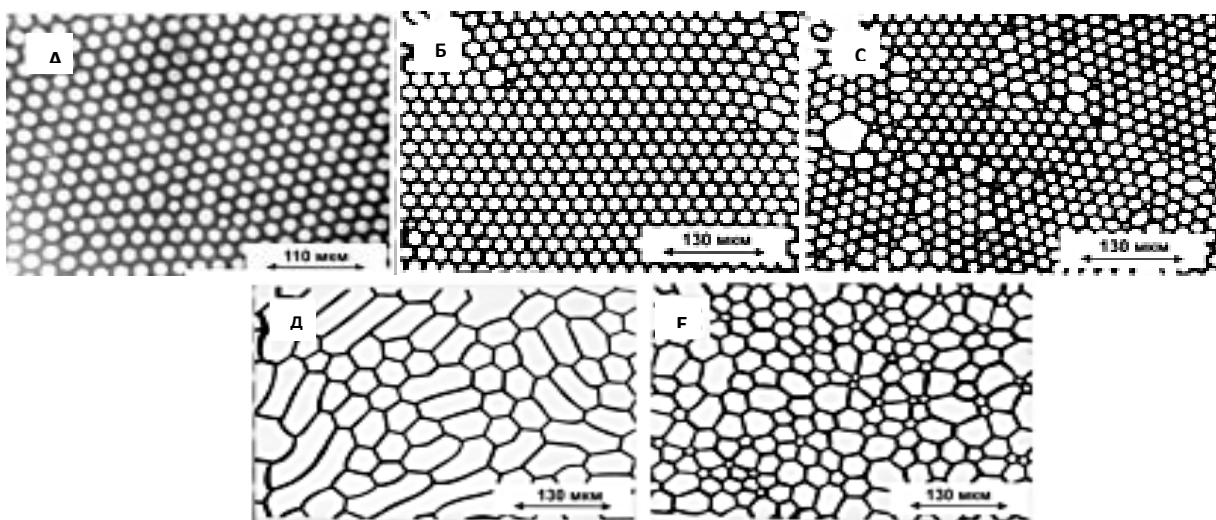


Рис. 3. Виды ДС при разных величинах поля смещения, сонаправленного с намагниченностью внутри домена: А – РЦД ($H = 0$), Б – сотовая ДС ($H < 0$), В – переход СДС₁ в ячеистую ДС, Д – СДС₁ («сети»), Е – переход СДС₂ в ячеистую ДС.

При величине поля $H = H_{S2}$ в решетке РЦД₂ тоже происходит фазовый переход второго рода в сотовую структуру СДС₂. Соотношение числа ВБЛ в доменных границах обеих решеток ЦМД сохраняется: $N_1 > N_2$. Величины полей смещения, при которых

происходят фазовые переходы второго рода: в РЦД₁ $H = H_{S1} = |-20Э|$; в РЦД₂ $H = H_{S2} = |-45Э|$, т.е. $|H_{S2}| > |H_{S1}|$. Таким образом, при фазовом переходе второго рода в решетках РЦД₁ и РЦД₂ наблюдается следующая закономерность: если $N_1 > N_2$, то $|H_{S2}| > |H_{S1}|$, т.е. решетка ЦМД с меньшим количеством ВБЛ в доменной границе более устойчива.

Это соотношение между количеством вертикальных блоховских линий ($N_1 > N_2$) в решетках ЦМД и величинами полей перехода в сотовую структуру $|H_{S1}| < |H_{S2}|$ можно объяснить следующим образом. Учитывая, что магнитные домены являются термодинамической системой, при определенной величине магнитного поля H_{S2} , сонаправленного с намагниченностью внутри домена, структура переходит в более устойчивое состояние из решетки ЦМД в сотовую структуру. Длина стенки домена увеличивается, а ВБЛ распределяются по углам ячейки сот, что приводит к уменьшению магнитостатической энергии структуры. Чем жестче доменная структура, то есть, чем больше количество ВБЛ в доменной границе, тем при меньшей величине поля смещения происходит фазовый переход второго рода.

При дальнейшем увеличении поля смещения, сонаправленного с намагниченностью внутри домена, при $H_c > H'_{S1}$ в сотовой структуре СДС₁ происходит фазовый переход первого рода в ячеистую структуру (рис. 2, кривые 1 и 2; рис. 3, С). При кратковременном действии импульсным магнитным полем эта структура превращается в новую сотовую структуру с большими параметрами (рис. 3, А).

В сотовой структуре СДС₂ при поле $H_c = H'_{S2}$ происходит фазовый переход первого рода в ячеистую структуру (рис. 2, кривые 3 и 4; рис. 3).

Соотношение величин полей, при которых происходят фазовые переходы первого рода $|H'_{S1}| > |H'_{S2}|$ при $N_1 > N_2$.

При фазовых переходах первого рода в сотовых структурах СДС₁ и СДС₂ число ВБЛ в доменных границах уменьшается путем раскручивания. Таким образом, чем больше количество ВБЛ находится в углах сотовой ячейки, тем более устойчива сотовая структура. Для разрушения такой структуры требуется магнитное поле большей напряженности.

Исследование особенностей движения магнитомаркированных клеток разного размера при наличии фазовых переходов в решетке ЦМД. Одним из перспективных применений упорядоченных доменных структур является их возможное использование в устройствах типа «лаборатория на чипе» для управления движением магнитных микрочастиц и биологических клеток [18]. Манипуляции с субмикронными и наночастицами, а также их разделение необходимы во многих областях химии, биологии, медицины и экологии. Стремительное развитие микрофлюидики позволило осуществлять точную сортировку и выделение наночастиц с более высоким разрешением и эффективностью, чем при использовании традиционных технологий [19]. Для формирования направленного движения магнитомаркированных (ММ) клеток над феррит-гранатовой пленкой, содержащей решетку ЦМД, необходимо над поверхностью феррит-гранатовой пленки поместить суспензию ММ клеток и приложить к этой системе внешнее переменное управляющее магнитное поле, имеющее нормальную и латеральную к поверхности пленки составляющие [2]. Исследование влияния фазовых переходов, наблюдаемых в решетках ЦМД, проводили в экспериментах, аналогичных описанным в работе [2] при приложении внешнего поля в виде знакопеременного меандра, описываемого формулой (1).

$$\mathbf{H}^e = (H_{x0} \operatorname{sgn}(\sin 2\pi\nu t), 0, H_{z0} \operatorname{sgn}(\sin 2\pi\nu t)) \equiv (H_x^e, 0, H_z^e), \quad (1)$$

где H_{x0} , H_{z0} – постоянные амплитуды, ν – частота внешнего поля.

Однако в работе [2] диапазон амплитуд нормальной составляющей индукции управляющего поля ограничили областью от 0 до 4 мТл. Согласно рис. 3 из работы [2] в этом диапазоне амплитуд управляющего поля период решетки ЦМД остаётся постоянным и, следовательно, решетка ЦМД не испытывает ФП 1 рода. При повышении амплитуды управляющего поля выше 5 мТл период решетки ЦМД, согласно рис. 3 из работы [2], начинает существенно возрастать.

Процесс действия магнитного поля формы знакопеременного меандра на решетки ЦМД можно разбить на две части.

I. При увеличении напряженности внешнего магнитного поля, антипараллельного намагниченности внутри домена, диаметр ЦМД уменьшается, и при $H \geq H_{k1}$ должен исчезать каждый центральный домен гексагональной упаковки решетки, т.е. наблюдается начало ФП I рода [17]. Но он не успевает завершаться, т.к. магнитное поле меняет свою полярность, наступает вторая часть процесса.

II. При увеличении напряженности H управляющего магнитного поля, сонаправленного с намагниченностью внутри домена, диаметр домена увеличивается. При $H=H_{k2}$ домен приобретает форму шестиугольника, наблюдается сотовая структура (рис. 3, Б). Таким образом происходит ФП II рода.

В местах, где исчезают центральные домены гексагональной решетки ЦМД при ФП I рода образуется пространство с минимальным магнитостатическим давлением и минимальным, дипольным взаимодействием. Соседние домены, приобретая форму шестиугольника при ФП II рода, занимают это пространство и увеличиваются в размере.

Таким образом, при действии магнитного поля в форме знакопеременного меандра в доменной структуре наблюдается результат наложения двух процессов, происходящих при ФП I рода и ФП II рода.

Для получения и описания направленного движения магнитомаркированных клеток над ЦМД структурой используем терминологию, введенную в работе [2] Согласно работе [2] внешнее управляющее магнитное поле $\vec{B}(t) = \vec{B}_{xy}(t) + \vec{B}_z(t)$. Здесь $\vec{B}_{xy}(t)$ – горизонтальная составляющая вектора управляющего поля (лежащая в плоскости феррит-гранатовой плёнки), $\vec{B}_z(t)$ – вертикальная составляющая вектора управляющего поля (направленная перпендикулярно плоскости феррит-гранатовой пленки). Составляющая $\vec{B}_{xy}(t)$ задаёт направление движения в плоскости параллельной магнитной пленки, $\vec{B}_z(t)$ изменяет диаметр ЦМД. При этом, в зависимости от направления $\vec{B}_z(t)$ изменяется диаметр и расстояние между ЦМД.

Временная форма управляющих полей, – знакопеременный меандр. Т.е. направление поля, с течением времени, меняется скачкообразно на противоположное, при неизменной амплитуде. Поля $\vec{B}_{xy}(t)$ и $\vec{B}_z(t)$, в зависимости от поставленных задач, могут быть сдвинуты по фазе друг относительно друга.

Для получения движения ММ клеток, сопоставимых размерами с диаметром ЦМД (примерно 4–6 мкм), используется $|\vec{B}_{xy}(t)|$ в пределах 2–5 мТл. В данном эксперименте амплитуда $|\vec{B}_{xy}(t)|$ было установлена 3 мТл и не изменялась. Сдвиг фазы между $|\vec{B}_z(t)|$ и $|\vec{B}_{xy}(t)|$ задаётся оператором.

При увеличении амплитуды $|\vec{B}_z(t)|$ в пределах от 0 до 4 мТл диаметр ЦМД увеличивается плавно, при почти неизменном периоде решетки ЦМД (см рис. 3 из работы [2]). Т.е. происходит увеличение диаметра ЦМД за счёт уменьшения области противоположной намагниченности между доменами. По достижению амплитуды напряженности нормальной составляющей внешнего поля $|\vec{B}_z(t)|$ примерно 5 мТл происходит фазовый переход 1-го рода. Начиная с этого момента, дальнейшее увеличение $|\vec{B}_z(t)|$ приводит к резкому увеличению и диаметра ЦМД, и периода решетки ЦМД, что создаёт условия для перемещения ММ клеток малого размера

(≈ 1 мкм). Дальнейшее увеличение $|\vec{B}_z(t)|$ приводит к разрушению сначала решетки ЦМД, а затем и самих ЦМД (см. рис. 3, Д). Для исследования влияния ФП в решетке ЦМД на особенности движения ММ клеток провели следующий эксперимент.

Над пленкой феррит-граната с решеткой ЦМД и начальным периодом доменной структуры $\lambda = 10$ мкм (аналогично работе [2]) помещалась суспензия, состоящая из смеси магнитомаркированных (ММ) дрожжевых клеток (средний диаметр 5 мкм, магнитная восприимчивость $\chi = 0,0011 \pm 0,0002$) и магнитомаркированных спор *Bacillus clausii* (длина ≈ 2 мкм, диаметр ≈ 1 мкм, магнитная восприимчивость $\chi = 0,0013 \pm 0,0002$). Магнитная маркировка дрожжевых и бактериальных клеток проводилась с помощью магнитных наночастиц магнетита, синтезированных по методике [20] и стабилизированных цитрат-анионами по методике, описанной в работе [21]. Результаты эксперимента показали, что в диапазоне амплитуды индукции $|\vec{B}_z(t)|$ от 5 мТл до 8 мТл наблюдается передвижение маленьких ММ клеток бактерий и колебательный режим движения больших дрожжевых клеток (см. рис. 4).

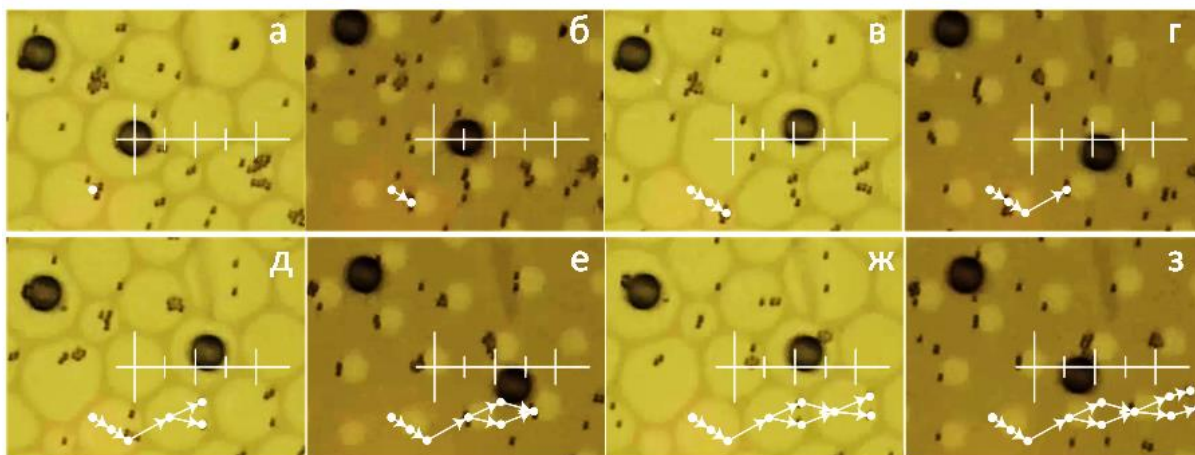


Рис. 4. Последовательность кадров видеозаписи эксперимента, показывающих движение ММ клеток дрожжей диаметром $D \approx 5$ мкм и ММ бактерий *Bacillus clausii* $D \approx 1$ мкм под действием управляющего магнитного поля в виде синфазно изменяющихся векторов с модулями $|\vec{B}_z(t)| = 8$ мТл, $|\vec{B}_{xy}(t)| = 3$ мТл. Тип временной формы, знакопеременный меандр. Цена деления линейки 5 мкм. Траектория движения ММ бактерий размером ≈ 1 мкм сформирована белыми стрелками.

На рис. 4 приведены фотографии, полученные после обработки видео, записанного при проведении эксперимента. Из анализа рис. 4 видно, что две большие дрожжевые ММ клетки, совершают колебательные движения в пределах периода решетки ЦМД. В то время как ММ бактерии перемещаются от домена к домену. Траектория перемещения бактериальных клеток показана последовательностью белых стрелок и составляет перемещение вправо не менее 30 мкм. При увеличении амплитуды индукции $|\vec{B}_z(t)|$ более 8 мТл решетка ЦМД начинает разрушаться и направленное движение ММ бактериальных клеток и колебательное движение ММ дрожжевых клеток прекращается.

Обсуждение результатов исследования. В работе исследуются индуцированные магнитным полем смещения фазовые переходы в двух решетках цилиндрических магнитных доменов: РЦД₁ и РЦД₂. Решетки формируются монополярным импульсным магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки. При этом создается сложная доменная граница ЦМД с большим количеством вертикальных блоховских линий. Количество ВБЛ ограничено длиной границы ЦМД. РЦД₁ формируется импульсным полем при отсутствии поля смещения. В доменной границе ЦМД создается

максимальное число поворотов спинов, в реальном случае $N_1 \leq N_0 \geq 90$. РЦД₂ формируется импульсным полем в присутствии поля смещения. В границе ЦМД создается меньшее количество поворотов спинов ($N_2 < N_1$). Затем импульсное поле выключается. При наложении поля смещения РЦД₁ оказывается неравновесной, а РЦД₂, формируемая при поле смещения, является равновесной.

Под действием поля смещения, сонаправленного с намагниченностью внутри домена, диаметры ЦМД обеих решеток увеличивается, период РЦД₁ остается постоянным, а период РЦД₂ увеличивается (см. рис. 2). При поле смещения $H_{sf} = H_{s1}$ ЦМД приобретает форму шестиугольника, решетка ЦМД превращается в сотовую структуру. Вертикальные блоховские линии распределяются в углах шестиугольника. Сохраняется как число доменов, так и количество ВБЛ в доменных границах. При этом магнитостатическая энергия доменной структуры уменьшается. Создается устойчивая равновесная сотовая структура СДС₁. В доменной границе происходит фазовый переход второго рода, который вызывает фазовый переход второго рода во всей доменной структуре.

В доменных границах РЦД₂ находится меньшее количество ВБЛ, чем в доменных границах РЦД₁ ($N_2 < N_1$). Поэтому фазовый переход второго рода РЦД₂ в сотовую структуру СДС₂ происходит при большей величине напряженности поля смещения, т.е. $H_{s2} > H_{s1}$.

В таблице 1 показано соотношение параметров РЦД₁ и РЦД₂ при фазовом переходе второго рода в сотовую структуру.

Таблица 1

Соотношение параметров при фазовом переходе РЦД₁ в СДС₁ и РЦД₂ в СДС₂ ($\downarrow H_{sf}, \downarrow M_s$)

Доменная структура	Количество ВБЛ	Поле смещения и количество ВБЛ при ФП		Конечная структура	Соотношения количества ВБЛ и $H_{sf} = H_s$
РЦД ₁	$2N_1$	$2N_1 = \text{const}$	H_{s1}	СДС ₁	$N_1 > N_2$
РЦД ₂	$2N_2$	$2N_2 = \text{const}$	H_{s2}	СДС ₂	$H_{s1} < H_{s2}$

Из таблицы 1 видно, что при меньшем количестве ВБЛ в доменной границе РЦД₂ обладает большей полевой устойчивостью по сравнению с РЦД₁: $H_{s2} > H_{s1}$.

При дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля смещения, сонаправленного намагниченности внутри домена, СДС₁ переходит в ячеистую структуру (рис. 3, С). При кратковременном действии импульсным полем эта структура превращается в новую сотовую структуру («сети») с большими параметрами и меньшим числом ВБЛ (рис. 3, Д). Эта структура устойчива даже при длительных действиях импульсного поля и напоминает «сети».

Структура СДС₂ с увеличением напряженности поля смещения также переходит в ячеистую структуру (рис. 3, Е). При кратковременном действии импульсным полем она превращается в сотовую структуру с большими параметрами: так называемые «сети».

В структурах СДС₁ и СДС₂ произошли ФП первого рода в новые сотовые структуры с большими параметрами. Соотношение величин напряженностей полей фазового перехода: $H'_{s1} > H'_{s2}$ (рис. 2), что отражено в таблице 2.

Таблица 2

Соотношение количества ВБЛ и напряженностей полей в СДС₁ и СДС₂ при фазовом переходе первого рода ($\downarrow H_{sf}, \downarrow M_s$)

Вид структур	Количество ВБЛ	Поле перехода	Соотношение количества ВБЛ и напряженностей магнитных полей
СДС ₁	$2N_1$	H'_{s1}	$N_1 > N_2$
СДС ₂	$2N_2$	H'_{s2}	$H'_{s1} > H'_{s2}$

Из таблицы 2 видно, что СДС_1 более устойчива чем СДС_2 при $N_1 > N_2$.

Выводы. Впервые экспериментально исследованы индуцированные магнитным полем смещения, сонаправленным с полем внутри ЦМД, ФП в двух видах решеток ЦМД: РЦД₂- равновесная и РЦД₁ – неравновесная. Соотношение поворотов спинов в доменных границах этих решеток: $N_1 > N_2$.

При поле смещения, сонаправленном с намагниченностью внутри домена, в решетках РЦД₁ и РЦД₂ происходят фазовые переходы второго рода в сотовые структуры СДС_1 и СДС_2 . Соотношение полей фазовых переходов: $|H_{S1}| > |H_{S2}|$ при $N_1 > N_2$. При фазовом переходе второго рода цилиндрический магнитный домен приобретает форму шестиугольника. При этом сохраняется число доменов и число вертикальных блоховских линий в доменных границах.

При дальнейшем увеличении поля в сотовых структурах СДС_1 и СДС_2 происходят фазовые переходы первого рода в ячеистые структуры. При кратковременном действии импульсным магнитным полем ячеистые структуры переходят в новую сотовую структуру с большими параметрами, так называемую «сети». Соотношение полей фазовых переходов: $|H'_{S1}| > |H'_{S2}|$ при $N_1 > N_2$. Таким образом, экспериментально доказано, что фазовые переходы в доменной границе не только вызывают фазовые переходы в доменной структуре, но и определяют род этих фазовых переходов.

Также на примере магнитомаркированных биоклеток, показано, что при транспортировке над решетками ЦМД парамагнитных микрообъектов с близкой магнитной восприимчивостью, отличающихся размером, можно подобрать параметры управляющего магнитного поля и реализовать режимы движения таких микрообъектов, которые позволят их сепарировать.

Работа выполнена в рамках государственного задания (регистрационный номер 124012400345-8)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tierno P. Localized and delocalized motion of colloidal particles on a magnetic bubble lattice / P. Tierno, T.H. Jokansen, M. Fischer // Physical Review Letters. – 2007. – Vol. 99. – P. 038303 (4 p.). – DOI: 10.1103/PhysRevLett.99.038303.
2. Особенности управления движением магнитомаркированных клеток над решеткой цилиндрических магнитных доменов / В. Н. Павлов, Ю. А. Легенький, А. А. Губарев, С. В. Беспалова // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2024. – № 4. – С. 83-93. – DOI 10.5281/zenodo.14507779. – EDN AAFLUE.
3. Эшенфельдер А. Физика и техника цилиндрических магнитных доменов / А. Эшенфельдер. – М.: Мир, 1983. – 496 с.
4. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982. – 624 с.
5. Кандаурова Г.С. Хаос, порядок и красота в мире магнитных доменов / Г.С. Кандаурова // Известия Уральского государственного университета. – 1977. – №5. – С. 31-52.
6. Kooy C. Experimental and theoretical study of the domain configuration in thin layers of BaFe₁₂O₁₉ / C. Kooy, U. Enz // Phil. Res. Rep. – 1960. – Vol. 15, No 1. – P. 7-29.
7. Kaczer I. Honeycomb domain structure / I. Kaczer, R. Gamperle // Czech. J. Phys. – 1961. – Vol. 11, No 7. – P. 510-522.
8. Kaczer I. On the magnetization curves of bubble lattices / I. Kaczer, R. Gamperle // Czech. J. Phys. – 1960. – Vol. 10, No 8. – P. 614-616.
9. Thiele A.A. The theory of cylindrical magnetic domains / A.A. Thiele // Bell. System. Tech. J. – 1969. – Vol. 48, No 10. – P. 3287-3335.
10. Thiele A.A. Theory of the static stability of cylindrical domains in uniaxial platelets / A.A. Thiele // J. Appl. Phys. – 1970. – Vol. 41, No 3. – P. 1139-1145.
11. Druyvesteyn W.F. Calculation of some periodic magnetic domain / W.F. Druyvesteyn, J.W.F. Dorleyn. // Phys. Rev. Repts. – 1971. – Vol. 26, No 1. – P. 11-28.

12. Cape J. A. Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity / J. A. Cape, G.W. Lehman // J. Appl. Phys. – 1971. – Vol. 42, No 13. – P. 5732-5736.
13. Барьяхтар В. Г. Цилиндрические магнитные домены и их решетки / В. Г. Барьяхтар, Ю. И. Горобец. – Киев: Наукова думка, 1988. – 168 с.
14. Барьяхтар В. Г. Теория цилиндрической доменной структуры в тонких ферромагнитных пленках / В. Г. Барьяхтар, В. В. Ганн, Ю. И. Горобец // Журнал технической физики. – 1975. – Т. 45. – С. 386-395.
15. Горобец Ю. И. Дисперсия эллиптических колебаний и устойчивость решетки цилиндрических магнитных доменов / Ю. И. Горобец, С. И. Денисов // Физика твердого тела. – 1983. – Т. 25, № 9. – С. 2832-2834.
16. Термодинамический анализ фазовых переходов в решетке ЦМД / В. Г. Барьяхтар, Э.А. Завадский, Ю.А. Мамалуй и др. // Физика твердого тела. – 1984. – Т. 26, № 8. – С. 2381-2386.
17. Phase Transitions in a Hard Domain Structure of a Ferrite Garnet Film / Y. A. Siryuk, A. V. Bezus, E. D. Bondar, V. V. Kononenko // Physics of the Solid State. – 2019. – Vol. 61, No. 7. – P. 1191-1198. – DOI 10.1134/S1063783419070266. – EDN TGSLQ.
18. Colloidal transport on magnetic garnet films / P. Tierno, F. Sagués, T.H. Johansen et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2009. – Vol. 11. – P. 9615-9625.
19. Recent microfluidic advances in submicron to nanoparticle manipulation and separation / S. Hettiarachchi, H. Cha, L. Ouyang et al. // Lab on a Chip. – 2023. – Vol. 23. – P. 982-1010.
20. Massart R. Preparation of aqueous magnetic liquids in alkaline and acidic media / R. Massart // IEEE Trans. Magn. – 1981. – Vol. 17. – P. 1247-1249.
21. Солопов М. В. Биосорбент на основе комплекса дрожжевых клеток и магнитных наночастиц для удаления ионов тяжелых металлов / М. В. Солопов, Ю. А. Легенький, С. В. Беспалова // Актуальные вопросы биологической физики и химии. – 2018. – Т. 3, № 2. – С. 451-457.

Поступила в редакцию 05.12.2025 г.

INFLUENCE OF PHASE TRANSITIONS IN THE FERRITE-GARNET FILM DOMAIN STRUCTURE ON THE MOTION FEATURES OF MAGNETICALLY ACTIVATED CELLS

Yu. A. Siryuk, V. V. Kononenko, R. A. Kapshukov

Phase transitions in lattices of cylindrical magnetic domains in a ferrite-garnet film with uniaxial anisotropy, induced by a magnetic field perpendicular to the film plane, were experimentally studied. It's shown that the structure of domain boundaries determines the field stability interval of the lattice of cylindrical magnetic domains and determines the type of these phase transitions. It is shown that when transporting magnetically labeled cells of different sizes over a lattices of cylindrical magnetic domains in alternating meander-type control fields, it is possible to organize cell sorting by size in the region of increasing the lattice period of a lattices of cylindrical magnetic domains.

Keywords: magnetically labeled cells, gradient magnetic fields, ferrite-garnet films, lattice of cylindrical magnetic domains, phase transitions in domain structures, alternating meander

Сирюк Юлия Андреевна

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет, г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: juliasiryuk@gmail.com

Siryuk Yulia Andreevna

Doctor of Physics and Mathematics, Leading Researcher, Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

Кононенко Виктория Вадимовна

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, ДНР, РФ.

Kononenko Victoria Vadimovna

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, A.A. Galkin Donetsk Institute of Physics and Technology, Donetsk, DPR, RF.

Капшуков Роман Анатольевич

ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет, г. Донецк, ДНР, РФ.

Kapshukov Roman Anatolyevich

Donetsk State University, Donetsk, DPR, RF.

ОЦЕНКА ПОДОБИЯ ГУМУСО-АККУМУЛЯТИВНОГО ГОРИЗОНТА ПОЧВ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ШАХТЕРСКОГО РАЙОНА ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

© 2025. Ю. А. Штирц

Проведено исследование структурного состава гумусо-аккумулятивного горизонта почв южной части Шахтерского района Донецкой Народной Республики. Проанализирована представленность различных фракций и проведена оценка сходства почв исследуемых участков. В большинстве случаев выявлено преобладание структурной фракции с размером частиц 2–1 мм. Наибольшая степень сходства участка с режимом абсолютного заповедания, выбранного в качестве контрольного, выявлена для склоновых участков полей под озимой пшеницей и под паром после пшеницы в с. Рассыпное Шахтерского района.

Ключевые слова: агроэкосистема, почва, гумусо-аккумулятивный горизонт, структурный состав, кластерный анализ.

Введение. Почва – важнейший компонент биосферы и один из основных природных ресурсов, обуславливающих социальное и экономическое развитие общества. Используя почву в качестве объекта труда и средства производства, человек активно вмешивается в почвообразовательный процесс, изменяя естественные условия почвообразования [1].

Интенсивное использование почв в сельском хозяйстве значительно изменяет их агрохимические, биологические и физические показатели [2].

Физическая организация почв, как одного из важнейших компонентов экосистем, определяет все их функциональные свойства и режимы, свидетельствует о приоритетном значении исследований почв в этом направлении [3].

Способность почвы распадаться на агрегаты называется структурностью, а совокупность агрегатов различной величины, формы и качественного состава называется почвенной структурой [4]. Структура почвы имеет большое значение в практике сельскохозяйственного производства, оказывает положительное влияние на физические свойства, водно-воздушный режим и в целом на плодородие почв [4, 5].

Большая положительная роль структурно-агрегатного состояния как важного показателя плодородия почвы общеизвестна. Плодородие почв в основном обусловлено их структурным состоянием, как основой благоприятных агрофизических свойств почв. Использование почв в сельскохозяйственном производстве приводит к изменению структурных качеств [6].

Агрономическое значение структуры заключается в том, что она оказывает существенное влияние на физические свойства, водно-воздушный, тепловой, окислительно-восстановительный, микробиологический и питательный режим почвы, а также обеспечивает противозрозионную устойчивость почвы [7, 8]. При наличии агрономической ценной структуры в почве создаются благоприятное сочетание капиллярной и некапиллярной пористости [4].

Цель исследования – оценка подобия структурного состава гумусо-аккумулятивного горизонта почв южной части Шахтерского района Донецкой Народной Республики.

Оценка подобия почвенных характеристик, в том числе структурного состава, дает информацию о разнообразии почвенных условий исследуемого района.

Реализация поставленной цели предусматривала решение следующих задач:

- проанализировать представленность различных структурных фракций гумусо-аккумулятивного горизонта исследуемых участков;
- на основе представленности различных фракций в составе гумусо-аккумулятивного горизонта оценить степень сходства выбранных модельных участков.

Материал и методика исследования. При выборе модельных участков для исследования почвенного покрова агроэкосистем учитывалась степень их антропогенной трансформации. Были выбраны следующие участки южной части Шахтерского района Донецкой Народной Республики, а также два участка Новоазовского района, выбранные в качестве контрольных.

Участок № 1. Участок со степной растительностью, режим абсолютного заповедания (с. Самсоново, Новоазовский район, 47°17'18.42"N, 38°10'47.75"E) – контроль.

Участок № 2. Участок со степной растительностью для выгона скота (с. Самсоново, Новоазовский район, 47°17'25.66"N, 38°10'25.32"E) – условный контроль.

Участок № 3. Поле под озимой пшеницей (с. Розовка, Шахтерский район, 48°10'04.6"N 38°12'32.7"E).

Участок № 4. Склоновый участок поля под озимой пшеницей, второй год монокультуры (с. Новоселовка, Шахтерский район, 48°09'40.1"N 38°08'16.7"E).

Участок № 5. Склоновый участок поля под подсолнечником (с. Верхняя Крынка, Шахтерский район, 48°10'47.9"N 38°08'58.0"E).

Участок № 6. Поле под паром, первый год после подсолнечника (с. Розовка, Шахтерский район, 48°10'41.8"N 38°15'07.2"E).

Участок № 7. Склоновый участок поля под яровой пшеницей (г. Ждановка, Шахтерский район, 48°10'37.5"N 38°16'06.1"E).

Участок № 8. Склоновый участок поля под озимой пшеницей (пгт. Нижняя Крынка, Шахтерский район, 48°06'13.9"N 38°12'05.9"E).

Участок № 9. Поле под пшеницей, второй год монокультуры (с. Ровное, Шахтерский район, 48°06'28.8"N 38°33'51.9"E).

Участок № 10. Поле под пшеницей, первый год после кукурузы (с. Ровное, Шахтерский район, 48°06'21.9"N 38°33'57.5"E).

Участок № 11. Склоновый участок поля под озимой пшеницей (с. Рассыпное, Шахтерский район, 48°08'43.5"N 38°35'49.3"E).

Участок № 12. Склоновый участок поля под паром после пшеницы (с. Рассыпное, Шахтерский район, 48°08'46.6"N 38°35'43.7"E).

Участок № 13. Склоновый участок поля под паром после кукурузы (с. Рассыпное, Шахтерский район, 48°08'38.7"N 38°35'49.9"E).

Отбор почвенных образцов проводили в 2023 г. в соответствии с методикой [9]. Исследование структурного состава проведено по методу Н. И. Саввинова (сухое просеивание) [10].

Для оценки степени подобия структурного состава исследуемых участков применен кластерный анализ с использованием средних арифметических невзвешенных значений евклидова расстояния. Кластерный анализ проведен в программе Statistica 10.0. Построение дендрограмм сходства проводилось на основании долевого участия почвенных фракций в структурном составе гумусо-аккумулятивного горизонта выделяемых участков.

Анализ результатов. Структурный состав гумусо-аккумулятивного горизонта почв исследуемых участков представлен на рис. 1.

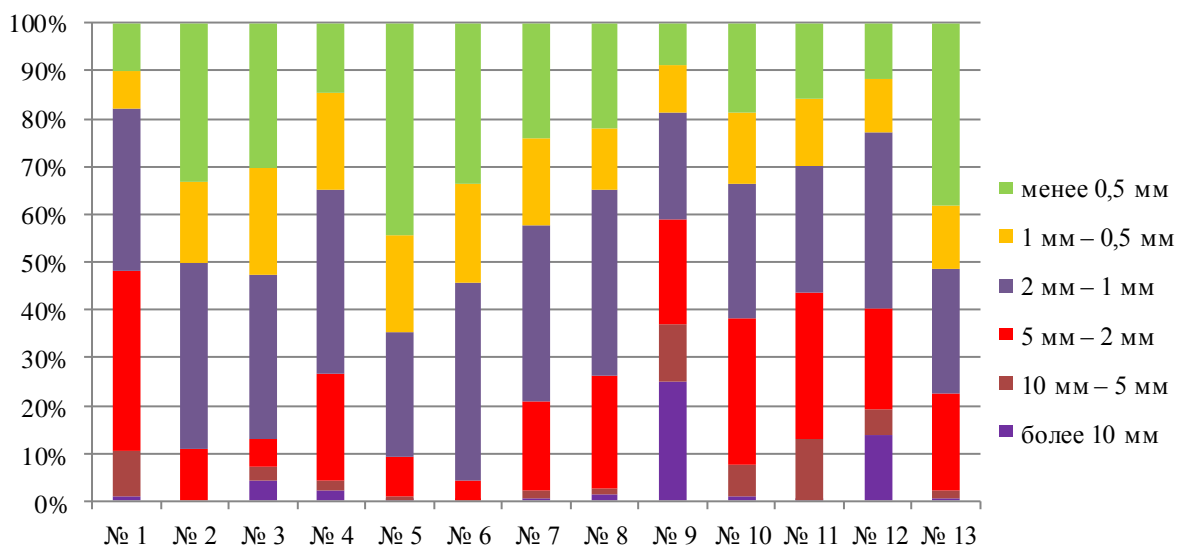


Рис. 1. Структурный состав гумусо-аккумулятивного горизонта почв исследуемых участков

В большинстве случаев сравнений выявлено преобладание частиц фракции 2–1 мм (7 из 13 исследуемых участков). Участки № 1, 10, 11 являются исключением (преобладает фракция частиц размером 5–2 мм), также как участок № 9 (преобладает фракция частиц более 10 мм) и участки № 5, 13 (преобладает фракция менее 0,5 мм). Участок № 2 характеризуется отсутствием фракции более 5 мм, участок № 6 – отсутствием фракции более 10 мм.

Ранее был проведен анализ гумусо-аккумулятивного горизонта почв северной части Шахтерского района ДНР [11]. В большинстве случаев, в составе почв агроэкосистем северной части Шахтерского района ДНР выявлено преобладание фракции с размером частиц менее 0,1 мм (5 из 8 сравниваемых участков).

Результаты кластерного анализа отражены на рис. 2.

Евклидово расстояние

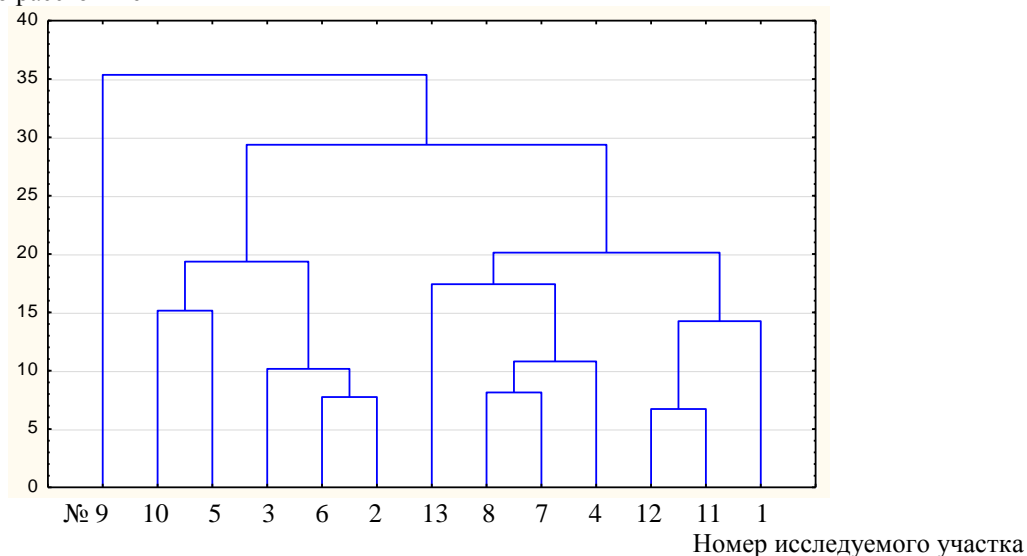


Рис. 2. Дендрограмма сходства структурного состава гумусо-аккумулятивного горизонта почв исследуемых участков

В соответствии с результатами кластерного анализа наибольшая степень сходства участка № 1 (участок с режимом абсолютного заповедания), выбранного в качестве контрольного, отмечена с участками № 11 и 12.

В целом, по итогам кластерного анализа можно выделить три крупных кластера: 1) участок № 9 (отмечена максимальная степень различия со всеми остальными исследуемыми участками); 2) участки № 2, 3, 5, 6, 10; 3) участки № 1, 4, 7, 8, 11, 12, 13.

Во втором кластере можно выделить две подгруппы сходных участков: а) участки № 5 и 10; б) участки № 2, 3, 6. Наибольшая степень сходства внутри этого кластера отмечена между участками № 2 и 6.

В третьем кластере также участки следует разделить на две подгруппы по степени сходства: а) № 4, 7, 8, 13; б) участки № 1, 11, 12. В первой подгруппе наибольшая степень сходства выявлена между участками № 7 и 8, во второй подгруппе – между участками № 11 и 12 (отмечена максимальная степень сходства для всех сравниваемых участков).

Выводы. Согласно результатам проведенного структурного анализа гумусо-аккумулятивного горизонта почв агроэкосистем южной части Шахтерского района ДНР в большинстве случаев выявлено преобладание фракции с размером частиц 2–1 мм.

Структурный состав гумусо-аккумулятивного горизонта почв большинства из ранее исследованных агроэкосистем северной части Шахтерского района отличается от агроэкосистем южной части Шахтерского района большей долей фракции с размером частиц менее 0,1 мм.

В соответствии с результатами кластерного анализа можно выделить три крупных кластера: 1) участок № 9 (отмечена максимальная степень различия со всеми остальными исследуемыми участками); 2) участки № 2, 3, 5, 6, 10; 3) участки № 1, 4, 7, 8, 11, 12, 13.

Наибольшая степень сходства участка с режимом абсолютного заповедания, выбранного в качестве контрольного, выявлена для склоновых участков полей под озимой пшеницей и под паром после пшеницы в с. Рассыпное Шахтерского района.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Донецкий ботанический сад» по теме: «Качественные и функциональные характеристики почв сельскохозяйственных угодий в степной зоне и пути восстановления их биологической продуктивности» (регистрационный № 123101300198-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дыдышко С. В. Взаимосвязь гумуса и гранулометрического состава дерново-палево-подзолистых легкосуглинистых почв разной степени агрогенной трансформации / С. В. Дыдышко, Т. Н. Азаренок, С. В. Шульгина // Почвоведение и агрохимия. – 2018. – № 2. – С. 20–31.
2. Наговицына М. Н. Изменение структурно-агрегатного состояния в постагрогенных почвах / М. Н. Наговицына, М. М. Умрилова, Н. Г. Зыкина // Зыряновские чтения: Матер. Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Курган, 7–8 декабря 2023 г.). – Курган: Курганский гос. ун-т, 2023. – С. 136–137. – EDN : ELKUOG.
3. Блохин А. Н. Ускоренный метод оценки агрегатного состояния почв с использованием лазерной дифрактометрии / А. Н. Блохин, Е. Ю. Милановский, С. П. Кулижский // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 1 (64). – С. 35–39. – EDN : ООСОСОВ.
4. Махмудова Э. П. Влияние минеральных удобрений на агрегатное состояние и физические свойства горных черноземных почв агроценозов картофеля на фоне органо-минеральных компонентов / Э. П. Махмудова // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 2. – С. 205–207. – EDN : TOQUKH.
5. Кауричев И. С. Почвоведение / И. С. Кауричев. – М.: Агропроиздат, 1989. – 718 с.
6. Воронцов В. А. Зависимость структурно-агрегатного состояния чернозема типичного от различных систем основной обработки почвы / В. А. Воронцов, Ю. П. Скорочкин // Владимирский земледелец. – 2019. – № 2 (88). – С. 24–27. – DOI : 10.24411/2225-2584-2019-10062. – EDN : NGFMMJ.

7. Влияние селена на содержание азота в растениях и аминокислотный состав надземных органов ячменя / Л. П. Воронина, А. Л. Кирюшина, А. В. Ксенофонтов и др. // *Агрохимия*. – 2018. – № 9. – С. 20–28. – DOI : 10.1134/S0002188118090168. – EDN : XWNNFB.
8. Определение активного органического вещества в свежем подстилочном навозе биокинетическим методом / Паутова Н. Б., Семенова Н. А., Хромычкина Д. П. и др. // *Агрохимия*. – 2018. – № 9. – С. 29–39. – DOI : 10.1134/S0002188118090107. – EDN : XWNNFR.
9. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под. ред. Д. Г. Звягинцева. – М. : Изд-во МГУ, 1991. – 304 с.
10. Агрофизические и агрохимические методы исследования почв : уч.-метод. пособие / сост. В. И. Терпелец, В. Н. Слюсарев. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – 65 с.
11. Сыщиков Д. В. Оценка подобия гумусо-аккумулятивного горизонта почв северной части Шахтерского района ДНР на основе гранулометрического состава / Д. В. Сыщиков, Ю. А. Штирц // *Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона*. – 2023. – № 4. – С. 59–63. – EDN : RRMTVO.

Поступила в редакцию 30.10.2025 г.

ASSESSMENT OF THE SIMILARITY OF THE HUMUSO-ACCUMULATIVE HORIZON IN SOILS OF THE SOUTHERN PART OF THE SHAKHTERSKY DISTRICT OF THE DONETSK PEOPLE'S REPUBLIC

Yu. A. Shtirts

A study was conducted to determine the structural composition of the humus-accumulative horizon in soils in the southern part of the Shakhtersky district of the Donetsk People's Republic. The representation of various fractions was analyzed and the similarity of soils in the studied areas was assessed. The highest degree of similarity between the site and the absolute conservation regime, selected as a control, was found for sloping areas of fields under winter wheat and under fallow after wheat in the Rassypnoe, Shakhtersky district.

Keywords: Key words: agroecosystem, soil, humus-accumulative horizon, structural composition, cluster analysis.

Штирц Юлия Алексеевна

Кандидат биологических наук, доцент;
научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий
ботанический сад», г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: yu.shtirts@mail.ru
ORCID: 0009-0006-5102-2033
AuthorID: 963882

Shtirts Yulia Alekseevna

Candidate of Biological Sciences,
Associate Professor;
Researcher of the Donetsk Botanical Garden,
Donetsk, DPR, RF.

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия А: Естественные науки**

2025. – № 6

Технический редактор: *М.В. Фоменко*

Свидетельство о регистрации СМИ ДНР Серия ААА № 000077 от 21.11.2016 г.

Адрес редакции:
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
ул. Университетская, 24,
283001, г. Донецк, ДНР, РФ.
Тел: +7 (856) 302-92-56, 302-09-92.
E-mail: vestnikdonnu_a@mail.ru
URL: <http://donnu.ru/vestnikA>, <http://dongu-vestnik01.ru/>
