

**ФИЗИКА:  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ  
И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ,  
ОБРАЗОВАНИЕ**

**Хабаровск 2020**

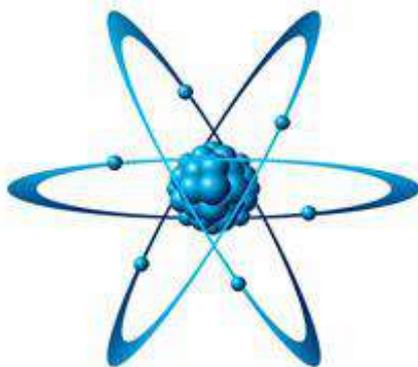
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Правительство Хабаровского края  
Министерство науки и высшего образования Хабаровского края  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тихоокеанский государственный университет»

## **ФИЗИКА: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБРАЗОВАНИЕ**

Материалы XVIII региональной научной конференции

(Хабаровск, 10–12 ноября 2020 г.)

Под редакцией канд. физ.-мат. наук, доц. А. И. Мазура  
и канд. техн. наук, доц. К. А. Драчева



Хабаровск  
Издательство ТОГУ  
2020

УДК 53:37.061.3  
ББК В 3л0  
Ф503

*Рецензенты:*

*Ведущий научный сотрудник ФГУП Государственного  
НИИ прикладных проблем, доктор техн. наук В. В. Березин.  
С.н.с. лаборатории численных методов математической физики  
ВЦ ДВО РАН, канд. физ.-мат. наук А. Н. Чибисов*

**Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование :**  
Ф503 материалы XVIII региональной научной конференции, Хабаровск, 10–12 ноября  
2020 г. / под ред. А. И. Мазура и К. А. Драчева; Министерство науки и высшего  
образования Российской Федерации, Тихоокеанский государственный  
университет. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2020. – 243 [1] с.

ISBN 978-5-7389-3226-7

В сборнике представлены материалы докладов восемнадцатой региональной научной конференции «Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование», проведенной в октябре 2020 года. В них отражены результаты работы академических институтов, преподавателей вузов Дальневосточного региона (Хабаровск, Владивосток, Благовещенск), а также сотрудников Юго-западного государственного университета в области физики и физического образования.

Сборник предназначен для научных работников и аспирантов, преподавателей и студентов вузов, а также для специалистов предприятий и организаций.

УДК 53:37.061.3  
ББК В 3л0

ISBN 978-5-7389-3226-7

© Тихоокеанский государственный  
университет, 2020

## Секция «Общая и техническая физика. Оптика»

УДК 537.87

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В НАНОЦИЛИНДРЕ

Б. Б. Авербух

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск,  
e-mail: [averbukh@pnu.edu.ru](mailto:averbukh@pnu.edu.ru)

*Наночилиндр состоит из плоскопараллельных монослоев, составленных из точечных элементов Гюйгенса. Расчитаны отраженное поле и поле внутри цилиндра. Показана возможность усиления излучения, а также получения близкого к единице показателя преломления.*

Теория оптических явлений, основанная на уравнениях Максвелла не объясняет, как и почему возникают отраженная и преломленная волны. Ответ на эти вопросы может дать только анализ, основанный на молекулярных представлениях о строении вещества. С точки зрения молекулярной оптики среда рассматривается как вакуум, в котором находятся молекулы вещества, которые в дипольном приближении моделируются диполями. Под действием внешнего поля эти диполи становятся источниками вторичных когерентных электромагнитных волн. Интерференция этих волн и определяет структуру электромагнитного поля в среде. Вторичные волны, распространяющиеся назад (по отношению к падающей волне), интерферируя, дают отраженную волну. Вторичные волны, распространяющиеся вперед, интерферируя между собой и с падающей волной, дают преломленную волну.

В работе рассматривается распространение плоской монохроматической  $s$ -поляризованной волны в наночилиндре и отражение от него с точки зрения молекулярной оптики. Наночилиндр представляется как цилиндр (с радиусом основания  $R$ ), состоящий из плоскопараллельных монослоев, скомпонованных из элементов Гюйгенса. Под элементами Гюйгенса понимаются частицы с электрической  $A_d = A_d' - iA_d''$  и магнитной ( $A_m = A_m' - iA_m''$ ) поляризуемостями. Индуцированные электрические  $\mathbf{d}$  и магнитные  $\mathbf{m}$  дипольные моменты взаимно перпендикулярны и пропорциональны падающему на них электрическому и магнитному полям соответственно. Поля диполей учитываются полностью. Все монослои лежат в плоскостях  $xy$ , пересекающих ось цилиндра  $z$  в точках  $z_1, z_2, z_3, \dots$ . Расстояния между всеми монослоями элементов Гюйгенса по оси  $z$  равны  $a$ , причем  $a \ll \lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны излучения. Элементы одного монослоя расположены неупорядоченно (с плотностью  $N$ ) и не взаимодействуют между собой. Предполагается, что размеры элементов много меньше расстояний между ними, а также величин  $a$  и  $\lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны излучения.

Распространяющееся вперед внешнее поле рассеивается монослоями элементов вперед и назад. Модель слоистой среды, рассматриваемая в данной работе, содержит много монослоев. Рассеяние излучения дипольными монослоями и вперед и назад приводит к тому, что каждый монослой находится в поле излучения всех других монослоев.

В установленном режиме полное поле в точке нахождения элемента  $n$ -го монослоя

внутри среды складывается из полей, распространяющихся вперед, и полей, отраженных последующими ( $n+1, n+2, \dots$ ) монослоями. В работе получены выражения для отраженного наностержнем поля, поля внутри среды, а также для показателя преломления среды.

Пусть на первый монослой со стороны  $z < z_1$  под углом  $\alpha$  падает поляризованное вдоль оси  $x$  монохроматическое поле  $\mathbf{E}_0 = E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_0 \mathbf{r})$  с частотой  $\omega$ , волновым вектором  $\mathbf{k}_0$  и вектором поляризации  $\mathbf{e}_0$ . Вектор  $\mathbf{k}_0$  лежит в плоскости  $yz$  и имеет две ненулевые составляющие, т.е.  $\mathbf{k}_0 = (0, k_{0y}, k_{0z})$ . Индуцированные этим полем диполи первого монослоя излучают. Для получения полей  $\mathbf{E}_{I0}$  и  $\mathbf{H}_{I0}$ , рассеянных этим монослоем в точке  $(x_2, y_2, z_2)$  нахождения элемента второго монослоя, надо проинтегрировать поля электрического и магнитного диполей по координатам всех элементов первого монослоя. В результате для рассеяния вперед получаем [1]

$$\mathbf{E}_{I0}(x_2, y_2, z_2 > z_1) = -iP_{dm} q E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - ik_{0y} y_2 - ik_{0z} z_2), \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_{I0}(x_2, y_2, z_2 > z_1) = -iP_{dm} q E_0 (\cos \alpha \mathbf{e}_y - \sin \alpha \mathbf{e}_z) \exp(i\omega t - ik_{0y} y_2 - ik_{0z} z_2), \quad (2)$$

$$P_{dm} = P_d + P_m = P_{dm}' - iP_{dm}'', \quad P_d = P_d' - iP_d'' = 2\pi N A_d k^2 / k_{0z},$$

$$P_m = P_m' - iP_m'' = 2\pi N A_m k^2 / k_{0z},$$

где  $k = \omega/c$ , а  $\mathbf{e}_y$  и  $\mathbf{e}_z$  – единичные векторы вдоль осей  $y$  и  $z$ . Величина  $q$  определяется выражением  $q = 1 - \exp[-ik_{0z}(b-a)]$ , а  $b^2 \approx a^2 + 4R^2$ .

Поля  $\mathbf{E}_{IR}$  и  $\mathbf{H}_{IR}$ , рассеянные первым монослоем назад (отражение), имеют вид

$$\mathbf{E}_{IR}(x, y, z < z_1) = -iP_{dm} q E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - ik_{0y} y + ik_{0z} z - 2ik_{0z} z_1), \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_{IR}(x, y, z < z_1) = iP_{dm} q E_0 (\cos \alpha \mathbf{e}_y + \sin \alpha \mathbf{e}_z) \exp(i\omega t - ik_{0y} y + ik_{0z} z - 2ik_{0z} z_1). \quad (4)$$

На второй монослой падают внешнее поле и поле, рассеянное первым монослоем, т.е.  $\mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_{I0}$  и  $\mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{I0}$ . Индуцированный электрический дипольный момент  $\mathbf{d}$  диполя второго монослоя пропорционален вынуждающему электрическому полю, т.е.  $\mathbf{d} = A_d(\mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_{I0})$ . Поле  $\mathbf{E}_{20}(x_3, y_3, z_3)$ , рассеянное вторым монослоем, получают интегрированием поля электрического диполя по координатам всех диполей этого монослоя. В результате получают следующие выражения для рассеяния вперед

$$\mathbf{E}_{20}(x_3, y_3, z_3 > z_2) = -iP_{dm} q (1 - iP_{dm} q) E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - ik_{0y} y_3 - ik_{0z} z_3), \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_{20}(x_3, y_3, z_3 > z_2) = -iP_{dm} q (1 - iP_{dm} q) E_0 (\cos \alpha \mathbf{e}_y - \sin \alpha \mathbf{e}_z) \exp(i\omega t - ik_{0y} y_3 - ik_{0z} z_3). \quad (6)$$

Поле, рассеянное вторым монослоем назад (отражение), имеет вид

$$\mathbf{E}_{2R}(x, y, z < z_2) = -iP_{dm} q (1 - iP_{dm} q) E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - ik_{0y} y + ik_{0z} z - 2ik_{0z} z_2), \quad (7)$$

$$\mathbf{H}_{2R}(x, y, z < z_2) = iP_{dm} (1 - iP_{dm}) E_0 (\cos \alpha \mathbf{e}_y + \sin \alpha \mathbf{e}_z) \exp(i\omega t - ik_{0y} y + ik_{0z} z - 2ik_{0z} z_2). \quad (8)$$

На третий монослой падают внешнее поле и поля, рассеянные первым и вторым монослоями, т.е.  $\mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_{I0} + \mathbf{E}_{20}$  и  $\mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{I0} + \mathbf{H}_{20}$ . Диполь третьего монослоя “чувствует” поле  $(1 - iP_{dm} q)^2 E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - ik_{0y} y_3 - ik_{0z} z_3)$ . И так далее.

Отраженная средой волна формируется волнами, отраженными от всех монослоев. В случае бесконечного числа монослоев получаем

$$\mathbf{E}_R(x, y, z < z_1) = R_s E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - ik_{0y} y + ik_{0z} z - 2ik_{0z} z_1), \quad (9)$$

$$\mathbf{H}_R(x, y, z < z_1) = -R_s E_0 (\cos \alpha e_y + \sin \alpha e_z) \exp(i\omega t - ik_{0y}y + ik_{0z}z - 2ik_{0z}z_1), \quad (10)$$

где коэффициент отражения Френеля  $R_s = -iP_{dm}qB$ , а  $B = [1 - (1 - iP_{dm}q) \exp(-2ik_{0z}a)]^{-1}$ .

Полное поле в точках нахождения диполей  $n$ -го монослоя в установившемся режиме складывается из полей, распространяющихся вперед, и полей, отраженных от всех последующих ( $n+1, n+2 \dots \infty$ ) монослоев. Распространяющиеся вперед поля в точках нахождения элементов  $n$ -го монослоя равны

$$\mathbf{E}_n(x_n, y_n, z_n) = (1 - iP_{dm}q)^{n-1} E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - ik_{0y}y_n - ik_{0z}z_n), \quad (11)$$

$$\mathbf{H}_n(x_n, y_n, z_n) = (1 - iP_{dm}q)^{n-1} (\cos \alpha e_y - \sin \alpha e_z) E_0 \exp(i\omega t - ik_{0y}y_n - ik_{0z}z_n). \quad (12)$$

Поле отраженных от всех последующих монослоев волн равно

$$\mathbf{E}_{n+1,R}(x_n, y_n, z_n) = -iP_{dm}qB(1 - iP_{dm}q)^n E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - ik_{0y}y_n - ik_{0z}z_n - 2ik_{0z}a), \quad (13)$$

$$\mathbf{H}_{n+1,R}(x_n, y_n, z_n) = iP_{dm}qB(1 - iP_{dm}q)^n (\cos \alpha e_y - \sin \alpha e_z) E_0 \exp(i\omega t - ik_{0y}y_n - ik_{0z}z_n - 2ik_{0z}a). \quad (14)$$

Полное поле в точках нахождения диполей  $n$ -го монослоя равно

$$\mathbf{E}(x_n, y_n, z_n) = D_s (1 - iP_{dm}q)^{n-1} E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - ik_{0y}y_n - ik_{0z}z_n), \quad (15)$$

$$\mathbf{H}(x_n, y_n, z_n) = (1 - iP_{dm}q)^{n-1} E_0 [(1 + Q) \cos \alpha e_y - (1 - Q) \sin \alpha e_z] \exp(i\omega t - ik_{0y}y_n - ik_{0z}z_n) \quad (16)$$

где  $Q = iP_{dm}q(1 - iP_{dm}q)B \exp(-2ik_{0z}a)$ , а  $D_s = 1 - Q$  – коэффициент пропускания Френеля.

Можно показать, что теорема погашения справедлива для каждого дипольного монослоя. Набег фазы волны, прошедшей вперед  $n$  монослоев, (при  $|P_{dm}q| \ll 1$ ) равен

$$P_{dm}q(n-1) + k_{0z}a(n-1) = k_{2z}a(n-1), \text{ где } k_{2z} - z \text{ компонента волнового вектора}$$

$\mathbf{k}_2 = (0, k_{0y}, k_{2z} = k_{2z}' + ik_{2z}'')$  волны.

При  $|k_{0z}a| \ll 1$  коэффициенты Френеля принимают вид:  $R_s = (k_{0z} - k_{2z}) / (k_{0z} + k_{2z})$  и  $D_s = 2k_{0z} / (k_{0z} + k_{2z})$ . Поле  $\mathbf{H}(x_n, y_n, z_n)$  можно представить в виде

$$\mathbf{H}(x_n, y_n, z_n) = (k_2 / k) D_s (1 - iP_{dm}q)^{n-1} E_0 \mathbf{e}_1 \exp(i\omega t - ik_{0y}y_n - ik_{0z}z_n), \quad (17)$$

где  $\mathbf{e}_1$  - вектор поляризации магнитного поля и  $\mathbf{e}_1 \perp \mathbf{k}_2$ .

Если  $k_{0z}(b-a) \ll 1$ , и  $|P_{d(m)}| \ll 1$ , то  $q \approx ik_{0z}(b-a)$  и  $(1 - iP_{dm}q)^{n-1} \approx \exp[-iP_{dm}q(n-1)]$ .

Значит

$$-iP_{dm}q \approx P_{dm}' k_{0z} (b-a) = (P_{dm}' - iP_{dm}'') k_{0z} (b-a) = P_{dm}' k_{0z} (b-a) - iP_{dm}'' k_{0z} (b-a).$$

При этом в точке нахождения диполя  $n$ -го монослоя распространяющееся вперед поле равно

$$\mathbf{E}(x_n, y_n, z_n) = E_0 \mathbf{e}_0 \exp[i\omega t - ik_{0y}y_n - ik_{0z}z_n + P_{dm}' k_{0z} (b-a)(n-1) - iP_{dm}'' k_{0z} (b-a)(n-1)]. \quad (18)$$

Видно, что вещественная часть  $P_{dm}'$  определяет усиление (т.к. при малых  $R$  и  $a$  разность фаз полей излучения различных диполей очень мала), а мнимая – преломление. Учитывая, что  $z_n = z_1 + a(n-1)$ , поле  $\mathbf{E}(x_n, y_n, z_n)$  можно представить в виде

$$\mathbf{E}(x_n, y_n, z_n) = E_0 \mathbf{e}_0 \exp[i\omega t - ik_{0y}y_n - ik_{0z}z_1 + P_{dm}' k_{0z} (b-a)(n-1) - ik_{2z}' a(n-1)], \quad (19)$$

где  $k_{2z}' = k_{0z} [1 + P_{dm}'' (b-a) / a]$ .

Можно сказать, что в среде распространяется поле с волновым вектором  $\mathbf{k}_2 = (0, k_{0y}, k_{2z})$ .

Видно, что при отсутствии поглощения ( $P_{dm}'' = 0$ ) отсутствует и преломление.

Таким образом, наноцилиндр из прозрачного материала может вести себя как среда с близким к единице показателем преломления. Кроме того, вследствие малых размеров наноцилиндра составляющие его элементы переизлучают так, как будто находятся в пределах одной зоны Френеля, чем и определяется возможность усиления.

## ЛИТЕРАТУРА

Авербух Б. Б., Авербух И. Б. Нелинейное резонансное рассеяние света многоатомной системой // Изв. вузов. Физика. 2009. 52. № 12. С. 8-13.

УДК 537.87

## УСИЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗОННОЙ ПЛАСТИНКОЙ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛА

**Б. Б. Авербух**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск,  
e-mail: [averbukh@pnu.edu.ru](mailto:averbukh@pnu.edu.ru)

*В модели молекулярной оптики показана возможность усиления электромагнитного излучения зонной пластинкой из элементов Гюйгенса.*

Рассмотрим кольцевую структуру (зонную пластинку) в плоскости  $xu$ . Центральная зона занимает область  $r \leq R_1$ . Первая – область  $R_1 < r \leq R_2$ , вторая – область  $R_2 < r \leq R_3$  и т.д. Средняя плотность распределения диполей в центральной области  $N_1$ , поляризуемость  $A_1 = A_1' - iA_1''$ . В  $j$ -й зоне –  $N_j$  и  $A_j = A_j' - iA_j''$ . На структуру под углом  $\alpha$  падают монохроматические поля

$$\mathbf{E}_0 = E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega_0 t - i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}), \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_0 = E_0 (\cos \alpha \mathbf{e}_y - \sin \alpha \mathbf{e}_z) \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}) \quad (2)$$

с частотой  $\omega$  и волновым вектором  $\mathbf{k}_0 = (0, k_{0y}, k_{0z})$ . Здесь  $\mathbf{e}_x = \mathbf{e}_0, \mathbf{e}_y$  и  $\mathbf{e}_z$  – единичные векторы вдоль соответствующих осей. Индуцированные электрический  $\mathbf{d} = A_d \mathbf{E}_0$  и магнитный  $\mathbf{m} = A_m \mathbf{H}_0$  дипольные моменты  $p$ -го элемента Гюйгенса (с радиус-вектором  $\mathbf{r}_p = (x_1, y_1, z_1)$ ) первого монослоя излучают. Для получения полей  $\mathbf{E}_{1dm}$  и  $\mathbf{H}_{1dm}$ , рассеянных элементами центральной зоны в точке наблюдения  $(x, y, z + a)$  надо проинтегрировать поля электрического и магнитного диполей по координатам всех элементов этой зоны.

Для рассеяния вперед получаем

$$\mathbf{E}_{1dm}(x_2, y_2, z_2 = z + a) = -iP_{dm1} q_1 E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - ik_{0y} y_2 - ik_{0z} z_2), \quad k_0 = \omega/c, \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_{1dm}(x_2, y_2, z_2 = z + a) = -iP_{dm1} q_1 E_0 (\cos \alpha \mathbf{e}_y - \sin \alpha \mathbf{e}_z) \exp(i\omega t - ik_{0y} y_2 - ik_{0z} z_2), \quad (4)$$

$$P_{dmj} = P_{dj} + P_{mj} = P_{dmj}' - iP_{dmj}'', \quad P_{d(m)j} = P_{d(m)j}' - iP_{d(m)j}'' = 2\pi N_j A_{d(m)j} k^2 / k_{0z},$$

$$q_1 = 1 - \exp[-ik_{0z}(b_1 - a)], \text{ а } b_1^2 \approx a^2 + R_1^2. \quad (5)$$

Поля, рассеянные вперед элементами первой зоны ( $R_1 < r \leq R_2$ ), даются выражениями

$$\mathbf{E}_{2dm}(x_2, y_2, z_2) = -iP_{dm2}q_2E_0\mathbf{e}_0 \exp[i\omega t - ik_{0y}y_2 - ik_{0z}z_2 - ik_{0z}(b_1 - a)], \quad (6)$$

$$\mathbf{H}_{2dm}(x_2, y_2, z_2) = -iP_{dm2}q_2E_0(\cos \alpha \mathbf{e}_y - \sin \alpha \mathbf{e}_z) \exp[i\omega t - ik_{0y}y_2 - ik_{0z}z_2 - ik_{0z}(b_1 - a)], \quad (7)$$

$$q_2 = 1 - \exp[-ik_{0z}(b_2 - b_1)], \text{ а } b_2^2 \approx a^2 + R_2^2. \quad (8)$$

Поля, рассеянные вперед элементами второй зоны ( $R_2 < r \leq R_3$ ), даются выражениями

$$\mathbf{E}_{3dm}(x_2, y_2, z_2) = -iP_{dm3}q_3E_0\mathbf{e}_0 \exp[i\omega t - ik_{0y}y_2 - ik_{0z}z_2 - ik_{0z}(b_2 - a)], \quad (9)$$

$$\mathbf{H}_{3dm}(x_2, y_2, z_2) = -iP_{dm3}q_3E_0(\cos \alpha \mathbf{e}_y - \sin \alpha \mathbf{e}_z) \exp[i\omega t - ik_{0y}y_2 - ik_{0z}z_2 - ik_{0z}(b_2 - a)], \quad (10)$$

$$q_3 = 1 - \exp[-ik_{0z}(b_3 - b_2)], \text{ а } b_3^2 \approx a^2 + R_3^2. \quad (11)$$

И так далее.

Полные поля, рассеянные вперед всей структурой, равны

$$\mathbf{E}_{1dm} + \mathbf{E}_{2dm} + \mathbf{E}_{3dm} + \dots = E_0\mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - ik_{0y}y_2 - ik_{0z}z_2) \times \\ \times \{1 - iP_{dm1}q_1 - iP_{dm2}q_2 \exp[-ik_{0z}(b_1 - a)] - iP_{dm3}q_3 \exp[-ik_{0z}(b_2 - a)] + \dots\} \quad (12)$$

$$\mathbf{H}_{1dm} + \mathbf{H}_{2dm} + \mathbf{H}_{3dm} + \dots = E_0(\cos \alpha \mathbf{e}_y - \sin \alpha \mathbf{e}_z) \exp(i\omega t - ik_{0y}y_2 - ik_{0z}z_2) \times \\ \times \{1 - iP_{dm1}q_1 - iP_{dm2}q_2 \exp[-ik_{0z}(b_1 - a)] - iP_{dm3}q_3 \exp[-ik_{0z}(b_2 - a)] + \dots\}. \quad (13)$$

В частном случае зонной пластинки Френеля

$$b_1 - a = b_2 - b_1 = b_3 - b_2 = \dots = \lambda / 2, \quad k_{0z} = k_0, \quad N_1 = N_2 = \dots = N, \\ A_{dj} = d_j / E_0, \quad q_j = 1 - \exp(-i\pi) = 2, \\ \exp[-ik_0(b_{2j-1} - a)] = \exp(-i\pi) = -1, \quad \exp[-ik_0(b_{2j} - a)] = \exp(-2i\pi) = 1. \quad (14)$$

Подставляя это в (13), получаем

$$\mathbf{E}_{1dm} + \mathbf{E}_{2dm} + \mathbf{E}_{3dm} + \dots = -2iE_0\mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - ik_{0y}y_2 - ik_{0z}z_2) \times \\ \times (P_{dm1} - P_{dm2} + P_{dm3} - \dots). \quad (15)$$

Подставляя выражения (5) для  $P_{dmj}$  в (15) и учитывая соотношения Френеля  $d_{2j-1} / 2 - d_{2j} + d_{2j-1} / 2 = 0$ , получаем известный результат: поле в точке наблюдения создается половиной первой зоны.

Это следствие того, что излучение от соседних зон взаимно ослабляет друг друга из-за разности хода  $\lambda / 2$ .

Значит, для того, чтобы излучение от соседних зон взаимно усиливало друг друга надо изменить знаки перед четными (или нечетными) слагаемыми в (15).

Сделать это можно, изменив знаки у поляризуемостей элементов Гюйгенса четных (или нечетных) зон.

## ПРЕЛОМЛЕНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ МОНОСЛОЕМ ИЗ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КВАДРУПОЛЕЙ

**Б. Б. Авербух**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [averbukh@pnu.edu.ru](mailto:averbukh@pnu.edu.ru)

*В модели молекулярной оптики получены выражения для отраженного поля и поля за монослоем. Введен показатель преломления эквивалентной среды. Показана возможность реализации магнитного зеркала.*

В последнее время активно исследуется квадрупольный отклик метаматериалов на падающее электромагнитное поле. В частности, имеются работы по рассеянию излучения квадрупольными метаматериалами [1, 2], в которых на определенной частоте отсутствует электрический дипольный отклик, а реализуются дипольный магнитный и электрический квадрупольный отклики. Со временем, видимо, будут созданы и материалы с только квадрупольным откликом на внешнее поле. Среди естественных материалов свойствами квадрупольной среды возможно обладает, например, молекулярный кристалл твердого  $CO_2$  (сухой лед), т. к. линейные неполярные молекулы типа  $CO_2$  можно моделировать линейными электрическими квадрупольями.

Пространственное распределение квадрупольного излучения существенно отличается от пространственного распределения дипольного. Это открывает новые возможности с точки зрения различных практических приложений.

В настоящей работе рассматривается распространение плоской электромагнитной волны через квадрупольную среду. Получены выражения для прошедшего и отраженного полей. Показана возможность реализации магнитного зеркала на границе квадрупольной среды, не имеющей дипольного отклика на падающее поле.

В данной работе процесс распространения монохроматической электромагнитной волны в метаматериале рассматривается с точки зрения молекулярной оптики. Среда представляет собой монослой (слой толщиной в один квадруполь) в плоскости  $xz$ , состоящий из точечных электрических линейных квадрупольей. Линейные квадрупольи расположены вдоль оси  $z$  и представляют собой пары двух одинаковых электрических диполей (с дипольной поляризуемостью  $A_d = A_d' - iA_d''$ ), расположенных по одной прямой и осциллирующих в противофазе. Расстояние между центрами диполей равно  $b$ . Дипольные моменты такой системы равны нулю, а электрический квадрупольный момент имеет одну отличную от нуля компоненту. Квадрупольи монослоя распределены неупорядоченно со средней плотностью  $N$  и не взаимодействуют между собой. Точечность квадрупольи означает, что его размеры много меньше расстояний между квадрупольями, а также величин  $a$  и  $\lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны излучения. Поля квадрупольей учитываются полностью.

Пусть на первый монослой со стороны  $z < z_1$  падает под углом  $\alpha$  поляризованное в плоскости  $yz$  монохроматическое поле

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{e}_0 E_0 \exp(i\alpha t - i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}), \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_0 = E_0 \mathbf{e}_x \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}) \quad (2)$$

с волновым вектором  $\mathbf{k}_0 = (0, k_{0y}, k_{0z})$ , вектором поляризации  $\mathbf{e}_0 = -\mathbf{e}_y \cos \alpha + \mathbf{e}_z \sin \alpha$  (где  $\mathbf{e}_y$  и  $\mathbf{e}_z$  - единичные векторы вдоль соответствующих осей) и частотой  $\omega$ . Чтобы получить поля  $\mathbf{E}_{I0}$  и  $\mathbf{H}_{I0}$ , рассеянные монослоем в точке наблюдения  $(x_2, y_2, z_2)$ , надо проинтегрировать поля электрического линейного квадрупольного по координатам всех квадрупольных монослоев. Расчет аналогичен проведенному в [3]. Для рассеяния вперед получаем

$$\mathbf{E}_{I0}(x_2, y_2, z_2 > z_1) = P \mathbf{E}_0(x_2, y_2, z_2) = [(1 + P) - 1] \mathbf{E}_0(x_2, y_2, z_2), \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_{I0}(x_2, y_2, z_2 > z_1) = P \mathbf{e}_x E_0(x_2, y_2, z_2) = [(1 + P) - 1] \mathbf{e}_x E_0(x_2, y_2, z_2), \quad (4)$$

где  $P = 2\pi N D k k_{0y}$ ,  $D = b A_d$ . Можно сказать, что излучение монослоя гасит падающую волну и формирует преломленную (теорема погашения Эвальда-Озеена [4]).

Пусть  $1 + P = F_q \exp(-i\varphi_q)$ , где  $F_q = \sqrt{(1 + P_q')^2 + P_q'^2}$  и  $\varphi_q = \arctg[P_q' / (1 + P_q')]$  дают изменения амплитуды и фазы волны, вызванные излучением квадрупольного монослоя. Падающее поле достигает квадрупольного монослоя, имея по оси  $z$  фазу  $k_{0z} z_1$ . Излучение всех квадрупольных монослоев добавляет к этой фазе величину  $\varphi_q$ , делая общий набег фазы равным  $k_{0z} z_1 + \varphi_q$ . Выражения

$$(1 + P) \mathbf{E}_0(x_2, y_2, z_2) = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_{I0} = \mathbf{e}_0 E_0 F_q \exp(i\omega t - ik_{0y} y_2 - ik_{0z} z_1 - ik_{2z} a), \quad (5)$$

$$(1 + P) \mathbf{E}_0(x_2, y_2, z_2) = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_{I0} = F_q E_0 (\cos \alpha \mathbf{e}_y - \sin \alpha \mathbf{e}_z) \exp(i\omega t - ik_{0y} y_2 - ik_{0z} z_1 - ik_{2z} a) \quad (6)$$

фактически представляют собой распространяющуюся вперед преломленную волну с волновым вектором  $\mathbf{k}_2 = (0, k_{0y}, k_{2z})$ ,  $z$ -компонента которого равна  $k_{2z} = k_{0z} + \varphi_q / a$ .

Представляя модуль вектора  $\mathbf{k}_2$  в виде  $k_0 n_q$ , видим, что квадрупольный монослой "преломляет" падающее на него поле  $\mathbf{E}_0$  как граница среды с показателем преломления  $n_q = \sqrt{1 + 2k_{0z} \varphi_q / a k_0^2 + \varphi_q^2 / a^2 k_0^2}$ .

Отраженные квадрупольным монослоем поля равны

$$\mathbf{E}_{I0R}(x, y, z < z_1) = P \mathbf{E}_0(-\mathbf{e}_y \cos \alpha - \mathbf{e}_z \sin \alpha) \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_{0y} y - 2ik_{0z} z_1 + ik_{0z} z), \quad (7)$$

$$\mathbf{H}_{I0R}(x, y, z < z_1) = -P \mathbf{E}_0 \mathbf{e}_x \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_{0y} y - 2ik_{0z} z_1 + ik_{0z} z). \quad (8)$$

При нормальном падении  $k_{0y} = 0 = P = \varphi_q$  и  $n_q = 1$ . Преломление и отражение отсутствуют, как будто падающее поле не взаимодействует с квадрупольными. В случае наклонного падения, если  $P' < 0$ , то тангенциальные компоненты электрических полей падающей и отраженной волн противоположны, а магнитные - параллельны друг другу. Это соответствует обычному (электрическому) зеркалу. При  $P' > 0$  тангенциальные компоненты электрических полей падающей и отраженной волн параллельны (т.е. полное (падающее плюс отраженное) электрическое поле увеличивается), а магнитные - противоположны друг другу. Это соответствует магнитному зеркалу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Shevchenko A.V., Kivijarvi V., Grahn P., Kaivola M., Lindfors K. Bifacial Metasurface with Quadrupole Optical Response // *Physical Review Applied*. 4. 2015. P.024019-1–0240196.
2. Grahn P., Shevchenko A., Kaivola M. Electric dipole-free interaction of visible light with pairs of subwavelength-size silver particles // *Phys. Rev.* 2012. В 86. P.035419-1–035419-4.
3. Авербух Б. Б., Авербух И. Б. Нелинейное резонансное рассеяние света многоатомной системой // *Изв. Вузов: Физика*. 2009. 52. № 12. С.8-13.
4. Борн М., Вольф В., Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.

УДК 535

### МАГНИТНОЕ ЗЕРКАЛО НА ГРАНИЦЕ СРЕДЫ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ ГЮЙГЕНСА

**Б. Б. Авербух, Т. А. Ишмияров**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [2017101886@pnu.edu.ru](mailto:2017101886@pnu.edu.ru)

*В модели молекулярной оптики получено условие реализации оптического магнитного зеркала на границе раздела вакуум – среда из элементов Гюйгенса.*

При отражении нормально падающей плоской электромагнитной волны от проводящей поверхности (металлического зеркала) напряженности электрического поля падающей и отраженной волн противоположны друг другу. Полное (падающее плюс отраженное) тангенциальное электрическое поле на отражающей поверхности равно нулю (узел стоячей волны). Направления магнитных полей этих волн совпадают. Магнитных проводников в природе нет. Поэтому считается, что подобный отклик для магнитного поля (когда магнитные поля падающей и отраженной волн противоположны, а электрические по направлению совпадают) возможен только при отражении от “искусственной магнитной поверхности” или от “магнитного зеркала” [1, 2]. Считается, что создать это зеркало можно, только используя метаматериалы. Экспериментально это наблюдалось для рельефной металлической поверхности [3], металл-диэлектрической структуры [1,2,4] и диэлектрической поверхности [5, 6]. Оптическое магнитное зеркало рассматривается как новый эффект, демонстрирующий необычные граничные условия.

Опубликованные работы – в основном экспериментальные. В них исследуются метаматериалы с различными формами (куб, диск...) резонаторов, параметры которых определяются рабочей частотой. При теоретическом анализе среды характеризуются диэлектрической  $\varepsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостями или показателем преломления. Широко используются численные методы. Обычно считается, что эффект магнитного зеркала обусловлен магнитным откликом среды на падающее электромагнитное поле. Но макроскопический подход и численные методы оставляют скрытыми многие детали физического механизма явления, которые при таком подходе не могут быть исследованы. Каково общее условие наблюдения явления? Действительно ли магнитное зеркало возможно только на границе искусственной среды? Можно ли его наблюдать на границе среды, состоящей только из электрических диполей? Почему можно наблюдать явление на границе

слоя с квази нулевым показателем преломления, и будет ли оно наблюдаться на границе среды с отрицательным показателем преломления? Общий ответ на эти вопросы, как и микроскопическая модель явления отсутствует. Не исследовалась также связь с законом отражения и формулами Френеля.

В данной работе на основании анализа, проведенного ранее [7] показано, что в случае плоской поверхности существование магнитного зеркала следует из формул Френеля. Получено общее микроскопическое условие реализации магнитных зеркал для случаев диэлектрических сред, скомпонованных из элементов Гюйгенса. В частности, это могут быть среды с почти нулевым показателем преломления ( $n \approx 0$ ) [2], Или среды с отрицательным показателем преломления (такие эксперименты нам не известны).

Рассмотрим отражение поляризованной вдоль оси  $x$  плоской электромагнитной волны

$$\mathbf{E}_0 = E_0 \mathbf{e}_0 \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}) \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_0 = (\cos \alpha \mathbf{e}_y - \sin \alpha \mathbf{e}_z) E_0 \exp(i\omega t - i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}) \quad (2)$$

с частотой  $\omega$ , волновым вектором  $\mathbf{k}_0 = (0, k_{0y}, k_{0z})$  и вектором поляризации  $\mathbf{e}_0$  от границы раздела вакуум – среда из электрических диполей. Здесь  $\mathbf{e}_y$  и  $\mathbf{e}_z$  - единичные векторы вдоль соответствующих осей. Среда состоит из плоскопараллельных монослоев, состоящих из элементов Гюйгенса. Под элементами Гюйгенса понимаются частицы с электрической  $A_d = A_d' - iA_d''$  и магнитной  $A_m = A_m' - iA_m''$  дипольными поляризуемостями [8]. Индуцированные электрические  $\mathbf{d}$  и магнитные  $\mathbf{m}$  дипольные моменты взаимно перпендикулярны и пропорциональны падающему на них электрическому и магнитному полям соответственно. Такая ситуация реализуется, например, когда рассеивающими элементами среды являются наносферы [8]. Поля диполей учитываются полностью. Монослои лежат в плоскостях  $xy$ , пересекающих ось  $z$  в точках  $z_1, z_2, z_3, \dots$ . Расстояния между монослоями равны  $a$  и  $a \ll \lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны излучения. Элементы в монослоях расположены неупорядоченно (с плотностью  $N$ ) и не взаимодействуют между собой. Размеры диполей много меньше расстояний между диполями, а также величин  $a$  и  $\lambda$ .

В работе [7] показано, что отраженная от среды волна определяется следующими выражениями для электрического и магнитного полей соответственно.

$$\mathbf{E}_R(x, y, z < z_1) = -iPB \mathbf{e}_0 E_0 \exp(i\omega t - ik_{0y}y + ik_{0z}z - 2ik_{0z}z_1), \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_R(x, y, z < z_1) = iPB E_0 (\cos \alpha \mathbf{e}_y + \sin \alpha \mathbf{e}_z) \exp(i\omega t - ik_{0y}y + ik_{0z}z - 2ik_{0z}z_1), \quad (4)$$

где  $P = 2\pi N A_{dm} k^2 / k_{0z} = P_d + P_m$ ,  $A_{dm} = (A_d + A_m)$ ,  $k = \omega / c$ ,

$B = [1 - (1 - iP) \exp(-2ik_{0z}a)]^{-1}$ . Величина  $(-iPB)$  определяет коэффициент отражения. В оптическом диапазоне длин волн ( $k_{0z}a \ll 1$ ), раскладывая в ряд функцию  $\exp(-2ik_{0z}a)$  и учитывая член первого порядка малости, при  $|P| \ll 1$  получаем

$$\mathbf{E}_R(x, y, z < z_1) = R_s \mathbf{e}_0 E_0 \exp(i\omega t - ik_{0y}y + ik_{0z}z - 2ik_{0z}z_1), \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_R(x, y, z < z_1) = -R_s E_0 (\cos \alpha \mathbf{e}_y + \sin \alpha \mathbf{e}_z) \exp(i\omega t - ik_{0y}y + ik_{0z}z - 2ik_{0z}z_1), \quad (6)$$

где  $R_s = (k_{0z} - k_{2z}) / (k_{2z} + k_{0z})$  - коэффициент отражения Френеля. Здесь выражения

$$k_{2z} = k_{0z} + \varphi / a, \quad \varphi = \arctg[P' / (1 - P'')] \quad (7)$$

определяют  $z$  компоненту волнового вектора  $k_2$  волны в среде и изменение фазы волны,

обусловленное излучением монослоя [7]. Совокупность полей (5) и (6) определяет поперечную отраженную волну. При нормальном падении  $\alpha = 0$  и  $z$  компонента магнитного поля и в падающей и в отраженной волнах исчезает. Если  $\varphi < 0$ , то  $0 < k_{2z} < k_{0z}$  и  $R_s > 0$ . Электрические поля падающей и отраженной волн параллельны друг другу. Магнитные поля этих волн направлены противоположно друг другу. Это соответствует магнитному зеркалу. При наклонном падении, как видно из соотношений (5), (6), при  $0 < k_{2z} < k_{0z}$  электрические поля падающей и отраженной волн по-прежнему параллельны.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Schwanecke A. S., Fedotov V. A., Khardikov V. V., Prosvirnin S. L., Chen Y., Zheludev N.I. Optical magnetic mirrors // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2007. V. 9, P. L1-L2.
2. Choi. S. B., Park D. J., Byun S. J., Kyoung J. Jisoo, Hwang S. W. Near-Zero Index: Optical Magnetic Mirror for Field Enhancement Imaging Applications // Adv. Optical Mater. 2015. V. 3, P.1719- 1725.
3. J. Zhang, J-Y Ou, K F. MacDonald, N. I. Zheludev. Optical response of plasmonic relief meta-surfaces // J. Opt. 2012. V. 14, 114002 (6pp).
4. Fedonov V. A., Rogacheva A. V., Zheludev N. I., Mladyonov P. L., Prosvirnin S. L. Mirror that does not change the phase of reflected waves // Applied Physics Letters. - 2006. V. 88, P. 091119-1–091119-3.
5. Liu S., Sinclair M.B., Manony T.S., Jun Y.C., Campione S., Ginn J., Bender D.A., Wendt J.R., Ihlefeld J.F., Glem P.G., Wright J.B., Brener I. Optical magnetic mirrors without metals // Optica. 2014. V.1. №4, P. 250-256.
6. L. Lin, Z.H. Jiang, D. Ma, Z. Liu, D.H. Werner, T.S. Mayer. Dielectric nanoresonator based lossless optical perfect magnetic mirror with near-zero reflection phase // Applied Physics Letters. 2016. V.108. P. 171902-1 – 171902-5.
7. Авербух Б. Б., Авербух И. Б. Формирование отраженной и преломленной  $s$  – поляризованных электромагнитных волн в задаче Френеля с точки зрения молекулярной оптики // Изв. вузов: Физика, 2015. V. 58, № 12, С 83-88.
8. Краснок А. Е., Максимов И. С., Денисюк А. И., Белов П. А., Мирошниченко А. Е., Симовский К. Р., Кившарь Ю. С. // УФН. 2013. Т.183. № 6. С. 561-589.
9. Авербух Б. Б., Авербух И. Б. Формирование отраженной и преломленной  $s$ -поляризованных электромагнитных волн на плоской границе раздела вакуум-среда из электрических и магнитных диполей // Изв. вузов: Физика, 2016. V.59, № 5, С. 117-122.

УДК 534.6

## ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ

**П. В. Базылев<sup>1</sup>, В. А. Луговой<sup>1</sup>, В. И. Римлянд<sup>2</sup>, Р. Э. Шарыпов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Дальневосточный филиал ФГУП ВНИИФТРИ, г. Хабаровск

<sup>2</sup> Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

e-mail: [000292@pnu.edu.ru](mailto:000292@pnu.edu.ru)

*В работе приведены результаты применения метода корреляционных функций для расчета скорости продольных ультразвуковых волн на основе экспериментальных цифровых осциллограмм, полученных на установке ИЗУ-3, являющейся эталоном 1 разряда для измерения скорости распространения и коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн в твердых средах.*

## Введение

Основной задачей данной работы являлось автоматизация процесса определения скорости звука и коэффициента затухания на основе данных, получаемых в результате экспериментальных измерений на установке ИЗУ-3 [1]. Данная установка предназначена для прецизионных измерений скорости распространения и коэффициента затухания продольных ультразвуковых (УЗ) волн в твердых средах эхо-импульсным и резонансным методами измерений. Установка является рабочим эталоном 1 разряда, предназначенным для хранения и передачи единицы скорости распространения продольных УЗ волн в твердых средах рабочим эталонам и средствам измерений. Блок-схема установки при работе в эхо-импульсном режиме показана на рис. 1.

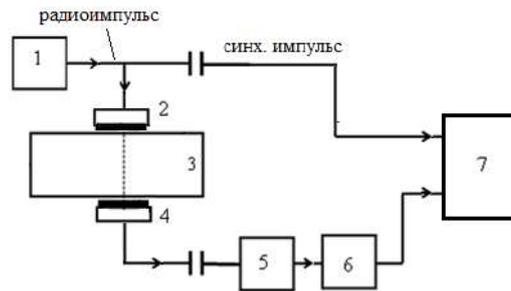


Рис. 1. Блок-схема установки

Радиопульс, формируемый генератором радиопульсов 1, с помощью излучающего емкостного преобразователя 2 [2] преобразуется в акустические колебания среды, т.е. образца. Переотраженные в образце 3 УЗ импульсы, регистрируются емкостным преобразователем 4. Сигнал с приемного преобразователя через предусилитель 5 и полосу-усилитель 6 подается на вход цифрового запоминающего осциллографа 7 (ЦО), использовался LeCroy WaveSurfer 422. На емкостные преобразователи подается постоянное поляризирующее напряжение – 200 В.

Переотраженные УЗ импульсы регистрируются в режиме работы ЦО «усреднение», который существенно повышает отношение сигнал–шум. На рис. 2 приведена характерная цифровая осциллограмма, получаемая с помощью ЦО.

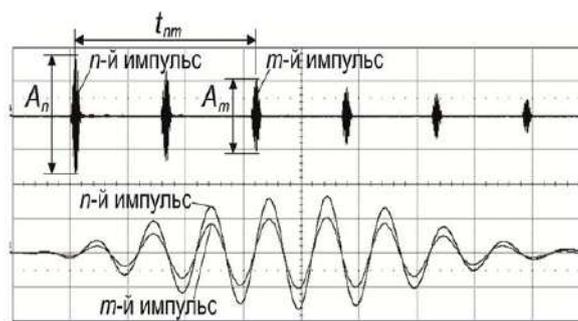


Рис. 2. Цифровая осциллограмма, получаемая с помощью ЦО

Для расчета скорости звука определяется время  $t_{nm}$  между приходом переотраженных импульсов  $n$  и  $m$ . Для определения  $t_{nm}$  используется метод совмещения импульсов на экране ЦО [3, 4] (рис. 2). Скорость звука  $C$  рассчитывается по формуле

$$C = \frac{2d(m-n)}{t_{nm}} + \Delta C_{\text{диф}}, \quad (1)$$

где  $n, m$  – номера переотраженных УЗ импульсов,  $d$  – толщина образца  $\Delta C_{\text{диф}}$  – дифракционная поправка.

### Применения метода автокорреляционных функций для расчёта времени $t_{nm}$

Определение интервала времени между импульсами  $t_{nm}$  в «ручном режиме» достаточно трудоемкий процесс, результат которого зависит от квалификации оператора. Соответственно возникает необходимость автоматизации данного этапа измерения акустических параметров при заданной погрешности измерений.

Основой предлагаемого метода является вычисление автокорреляционной функции  $R_{uu}(\tau)$  сигнала  $u(t)$ . Функция  $R_{uu}(\tau)$  показывает связь сигнала со своей копией, смещенной на величину  $\tau$  [5,6]:

$$R_{uu}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t)u(t + \tau)dt, \quad (2)$$

где  $\tau$  – сдвиг по времени. В реальной задаче  $T$  конечно, и интегрирование проводится по ограниченному временному интервалу. Соответственно, и  $R_{uu}(\tau)$  можно определить на том же временном интервале, где определен сигнал  $u(t)$ . При расчете  $R_{uu}(\tau)$  на основе дискретных цифровых осциллограмм  $u_i(t_i)$ , ( $i$  номер точки в осциллограмме), получаем дискретную функцию  $R_{uu}(\tau_j)$ , ( $j$  – номер точки в последовательности  $\tau_j$ ).

Если у исходного сигнала есть периодичность, то у автокорреляционной функции будут наблюдаться локальные максимумы. Разница во времени между этими максимумами и является периодом исходного сигнала ( $t_{nm} = \tau_{nm}$ ). Автокорреляционный метод обычно позволяет получать надежные и воспроизводимые результаты во многих случаях, особенно в ситуациях, когда визуальное обнаружение импульса затруднено. Таким образом, алгоритм вычисления расчета времени между переотраженными УЗ импульсами должен включать расчет автокорреляционной функции исходного сигнала, отыскание максимумов этой функции и определение периода их следования.

Для решения задачи была разработана программа на языке C++. В ней используются следующие данные (помимо цифровой осциллограммы):  $d$  – толщина образца;  $f$  – частота заполнения радиоимпульса;  $a$  – радиус электродов емкостных преобразователей (для расчета дифракционной поправки); тактовая частота работы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ЦО;  $\delta$  – продолжительность радиоимпульса; зависимость амплитуды (высоты) локального максимума от частоты УЗ; зависимость “продолжительности” (ширины) пика от частоты УЗ.

Цифровая осциллограмма представляет собой бинарный файл, который специальными средствами можно конвертировать в текстовый (использовалась программа WaveStudio [7], с которым и будет работать алгоритм, решающий задачу.

Автокорреляционная функция, т.е. интеграл (2) для каждого  $\tau_j$  вычисляется методом трапеций, затем нормируется на величину

$$\|u\| = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t)dt. \quad (3)$$

Таким образом, для каждого  $\tau_j$   $|R_{uu}(\tau)| \leq 1$ .

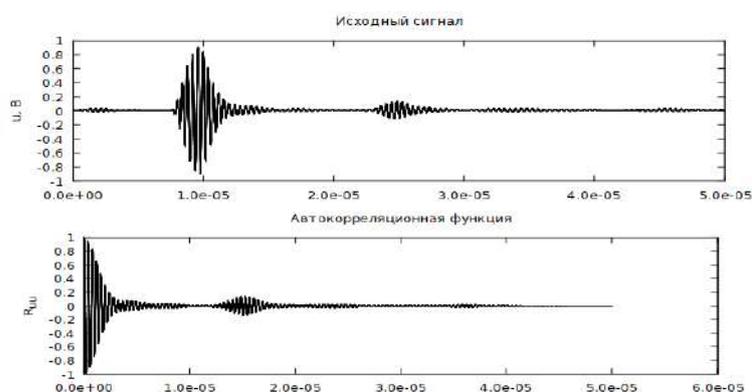
На рис. 3 и 4 представлены осциллограммы исходных сигналов и соответствующие им автокорреляционные функции для образцов из сплава алюминия Д16Т (рис. 3) и оргстекла (рис. 4).

Алгоритм работы программы можно описать такой последовательностью действий:

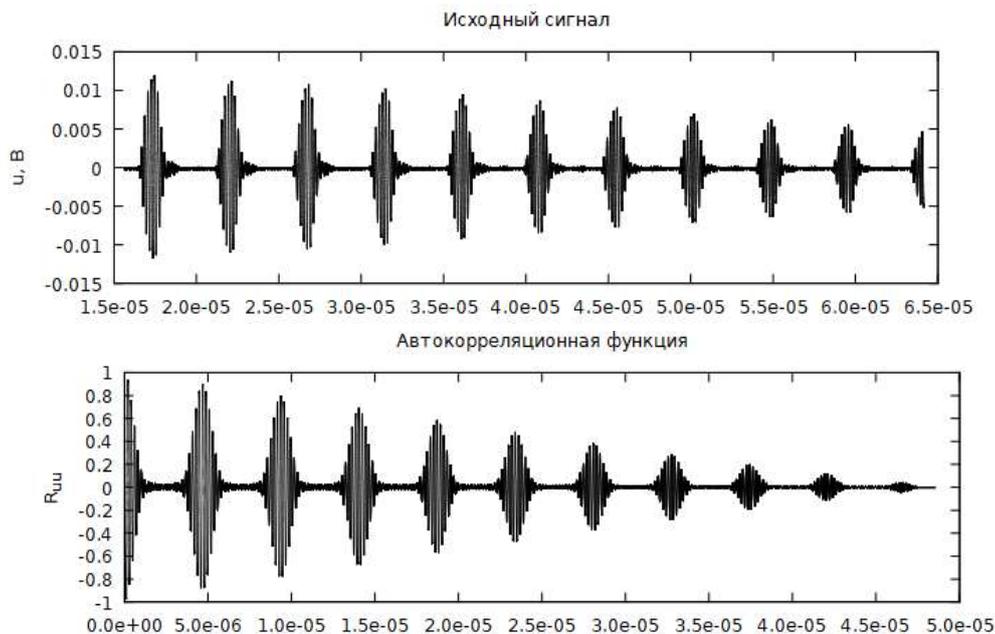
1. Вычисляем автокорреляционную функцию (если “режим” поиска максимумов).
2. Модифицируем  $\delta = \delta(f)$ .
3. Вычисляем некоторое усредненное значение амплитуды сигнала.
4. Используя полученное усредненное значение, отсеиваем шум.
5. Используя зависимость ширины импульса от частоты:  $\delta = \delta(f)$ , ищем локальные максимумы.
6. Отсеиваем неподходящие импульсы, если такие есть.

7. Вычисляем скорость УЗ волн на основе полученного набора максимумов.
8. Вычисляем поправки, выводим результаты.

Вычисление автокорреляционной функции для большого количества точек требует существенных вычислительных затрат, так как для каждого  $\tau_j$  требуется вычислить значение функции автокорреляции (для  $10^6$  точек  $\tau_j$  потребуются вычислить соответственно  $10^6$  интегралов или выполнить сложение  $\sum_{i=0}^{10^6} (10^6) \cong 5 \cdot 10^{11}$  элементов интегральных сумм). Поэтому необходимо распараллелить процесс вычисления интегралов. Это было сделано при помощи библиотеки параллельных вычислений OpenMP: вычисления автокорреляционной функции для разных  $\tau_j$  выполняются параллельно. Применение библиотеки OpenMP стандарта 2.0 [8] позволило сократить полное время вычислений с приблизительно 620 сек до 155 сек, т. е. в 4 раза. Вычисления проводились на CPU Intel Core i7 3770 ~4.5 GHz в 8-поточном режиме при динамическом распределении потоков. Директива OpenMP для распараллеливания цикла – `pragma omp parallel for schedule (dynamic, 100)`.



**Рис. 3.** Осциллограммы исходных сигналов и соответствующие им автокорреляционные функции для образцов из сплава алюминия Д16Т



**Рис. 4.** Осциллограммы исходных сигналов и соответствующие им автокорреляционные функции для образцов оргстекла

Количество потоков можно задавать явно как num\_threads(N), но необходимости в этом нет, т. к. автоматически создается столько потоков, сколько есть логических процессоров.

### Результаты определения скорости звука

В таблице приведены результаты определения скорости звука продольных УЗ волн  $C_L$  для двух образцов: сплава алюминия Д16Т ( $d = 15,02$  мм) и оргстекла ( $d = 20,45$  мм). Параметры работы установки ИЗУ-3: частота заполнения радиоимпульса  $f = 5$  МГц, частота повторения радиоимпульса 100 Гц, количество усреднений ЦО при записи цифровых осциллограмм – 100. Длина усреднённой цифровой осциллограммы составляла для Д16Т  $10^5$  точек, а для оргстекла –  $10^6$  точек. Параметры для вычисления автокорреляционной функции  $R_{uu}(\tau_j)$ : диапазон изменения  $\tau_j$  от 0 до  $10^{-5}$  с.

В столбце «вручную» приведены результаты расчетов скорости по формуле (1) при определении между переотраженными импульсами  $t_{nm}$  оператором на экране ЦО методом совмещения (рис. 2). В столбце «поиск максимумов» приведены значения скорости, которые рассчитаны на основе значений  $t_{nm} = t_n - t_m$ , где  $t_m$  и  $t_n$  время, соответствующее максимальному значению амплитуды соответственно  $m$  и  $n$  УЗ импульсов. Время  $t_m$  и  $t_n$  автоматически определялось дополнительным модулем созданной программы. В столбце «Автокорреляция» приведены значения  $C_L$  полученные на основе расчета  $t_{nm} = t_n - t_m$ , где  $t_m$  и  $t_n$  время, соответствующее максимальному значению амплитуды соответственно  $m$  и  $n$  максимумов нормированной корреляционной функции.

### Результаты измерения скорости продольных волн для образца из алюминия

№	материал: алюминий			материал: оргстекло		
	$C_L$ , м/с			$C_L$ , м/с		
	вручную	поиск максимумов	автокорреляция	вручную	поиск максимумов	автокорреляция
1	6402.19	6413.80	6414.48	2680.94	2680.24	2678.96
2	6426.35	6413.98	6416.72	2680.77	2680.29	2678.90
3	6421.28	6420.92	6418.18	2680.24	2679.88	2678.91
4	6417.30	6421.27	6418.53	2681.65	2680.51	2679.14
5	6414.62	6413.24	6418.72	2680.77	2680.98	2679.21
6	6422.87	6423.65	6418.16	2680.07	2679.53	2679.20
7	6418.77	6415.51	6418.93	2680.59	2682.14	2679.24
8	6416.03	6416.26	6418.31	-	-	-
9	6418.78	6423.85	6417.68	-	-	-
$C_{Lcp}$	6417.58	6418.05	6417.75	2680.72	2680.51	2679.08
$\Delta C_L$	6.41	4.10	1.31	0.48	0.79	0.14

В таблице также были рассчитаны средние значения  $C_{Lcp}$  скорости и среднеквадратичное отклонение  $\Delta C_L$ . Как видно из таблицы для алюминиевого сплава  $C_{Lcp}$  определенными методами «вручную» и «автокорреляция» фактически не отличаются. Несколько больше получаем значение методом «поиск максимумов». Значения  $\Delta C_L$  4-6 раз меньше для метода «автокорреляция», для двух других. Аналогичную картину мы наблюдаем и для значений скорости, определенных для оргстекла. Таким образом, примененный метод расчета корреляционной функции позволяет не только автоматизировать процесс обработки результатов, но и уменьшает погрешность измерений, возникающую при определении времени прихода переотраженных УЗ импульсов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Базылев П. В., Кондратьев А. И., Луговой В. А. Эталонная установка для комплексного измерения акустических параметров в конденсированных средах. Хабаровск, Россия. <https://refdb.ru/look/1004402.html>
2. Kondratev A.I., Lugovoy V.A. Datchik akusticheskikh signalov dlya vysokotochnykh izmereniy // Defektoskopiya. 1990. № 3. S. 30-38
3. Базылев П. В., Изотов А. В., Кондратьев А. И., Луговой В. А., Окишев К. Н. Государственный первичный эталон единиц скоростей распространения продольных, сдвиговых и поверхностных ультразвуковых волн в твердых средах // Измерительная техника № 7. 2013. С 6-10.
4. Архипов В. И. Стандартная лазерная установка для аттестации акустических эталонных образцов по скорости ультразвука // Измерительная техника. № 2. 1984. С. 60-61.
5. Hull David R., Kautz Harold E. and Vary Alex Ultrasonic Velocity Measurement Using Phase-Slope and Cross-Correlation Methods [Conference] // 1984 Spring Conference of the American Society for Nondestructive Testing. - Denver : [s.n.], 1984.
6. Aussel J. -D. и J. -P. Monchalin Precision laser-ultrasonic velocity measurement and elastic constant determination [Журнал] // Ultrasonics. May 1989. 3 : Т. 27. С. 165-177. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0041624X89900590>
7. Teledyne LeCroy WaveStudio. URL: <https://teledynelecroy.com/support/softwaredownload/wavestudio.aspx>.
8. OpenMP in Visual C++ URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/cpp/parallel/openmp/openmp-in-visual-cpp?view=vs-2019>.

УДК 621.315

### РЕЛАКСАЦИЯ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ОКСИДА ВИСМУТА, ПОДВЕРЖЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЮ ПЛАЗМЫ ВЧ РАЗРЯДА

**Т. В. Бондарева<sup>1</sup>, С. А. Пячин<sup>1</sup>, И. Н. Егоршин<sup>1</sup>, М. С. Круглов<sup>1</sup>,  
И. А. Астапов<sup>2</sup>, Д. С. Штарев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

<sup>2</sup>Институт тектоники и геофизики ДВО РАН им. Ю. А. Косыгина, г. Хабаровск  
e-mail: [tanchotep@bk.ru](mailto:tanchotep@bk.ru)

*Покрытие из порошка оксида висмута было облучено плазмой емкостного высокочастотного разряда низкого давления в течение 5 и 10 минут. Установлено, что после плазменной обработки коэффициент диффузного отражения оксида висмута уменьшился с максимального 90% до 5% практически во всем оптическом диапазоне длин волн. После семидневного хранения облученного порошка в условиях отсутствия света коэффициент диффузного отражения увеличился до 20%.*

Металлооксидные полупроводники находят все более широкое применение в качестве фотокаталитических материалов разрушения органических загрязнителей воды и воздуха [1]. Среди них оксид висмута (Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) весьма перспективен как полупроводник, ширина запрещенной зоны которого в зависимости от способа получения может изменяться в широком диапазоне от 2 до 3,96 эВ [2]. Это делает его чувствительным к поглощению светового излучения как ультрафиолетовой, так и видимой области.

Однако оксид висмута уступает по своей активности распространенным фотокатализаторам на основе диоксида титана [3]. Исследования по улучшению фотореакционной способно-

сти оксида висмута идут по направлению модифицирования его структуры и состава, прежде всего за счет введения дополнительных химических элементов и создания гетероструктурных материалов.

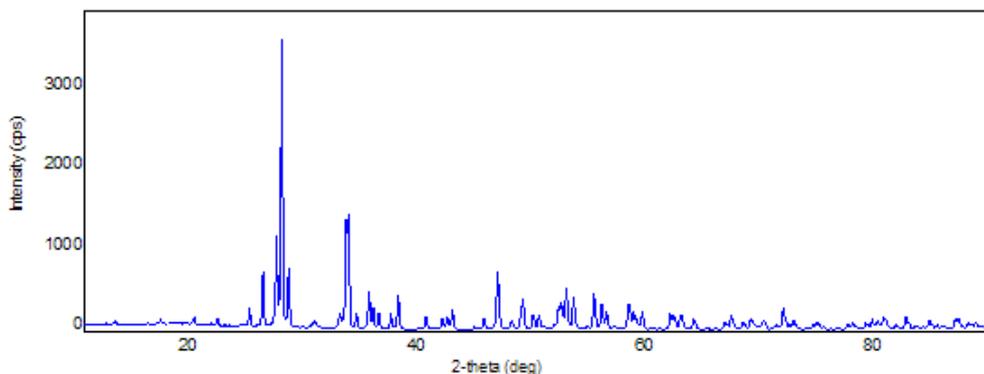
Тем не менее, одним из эффективных способов улучшения каталитических свойств оксидных соединений является обработка их плазмой высокочастотного разряда [4, 5]. Поскольку метод активирования оксида висмута воздействием низкотемпературной плазмой изучен не в полной мере, то проведение исследований в этом направлении имеет особый научный и практический интерес. Целью данной работы являлось изучение оптических характеристик частиц оксида висмута, подверженных воздействию плазмой высокочастотного газового разряда низкого давления, на основе анализа спектров диффузного отражения, а также определение стабильности этих свойств.

Порошок оксида висмута, смоченный в спирте, наносили тонким слоем на стеклянную подложку с размерами 15x15x2 мм. После высушивания образцы помещали в вакуумную камеру, которая представляет собой полый стеклянный цилиндр с внутренним диаметром 74 мм и толщиной стенок камеры 3 мм. Длина цилиндра – 16 см. Металлические электроды прикладывали к внешним поверхностям стеклянных торцов камеры. Это позволило уменьшить загрязнение камеры продуктами испарения электродов. На электроды подавали напряжение частотой 8,5 МГц амплитудой 2 кВ от генератора с максимальной мощностью порядка 500 Вт. Образец располагался вблизи активного электрода таким образом, что осажденный на подложку слой был обращен в сторону области свечения газового разряда. При проведении опытов остаточное давление воздуха в камере составляло 50-70  $10^{-3}$  мм. рт. ст. Продолжительность плазменной обработки была равна 5 и 10 минутам.

Исследование оптических характеристик облученных слоев оксида висмута проводили с помощью спектрофотометра СФ-2000 методом спектроскопии диффузного отражения. Фазовый состав изучен с использованием рентгеновского дифрактометра Rigaku.

В ходе проведенных экспериментов установлено, что под действием облучения исходный слой оксида висмута с желтой окраской приобретает серый оттенок, а затем чернеет. При продолжительности воздействия плазмы высокочастотного разряда 10 минут коэффициент диффузного отражения оксида висмута снижается с максимального 90 % (при 570 нм) до 5% практически во всем оптическом диапазоне длин волн.

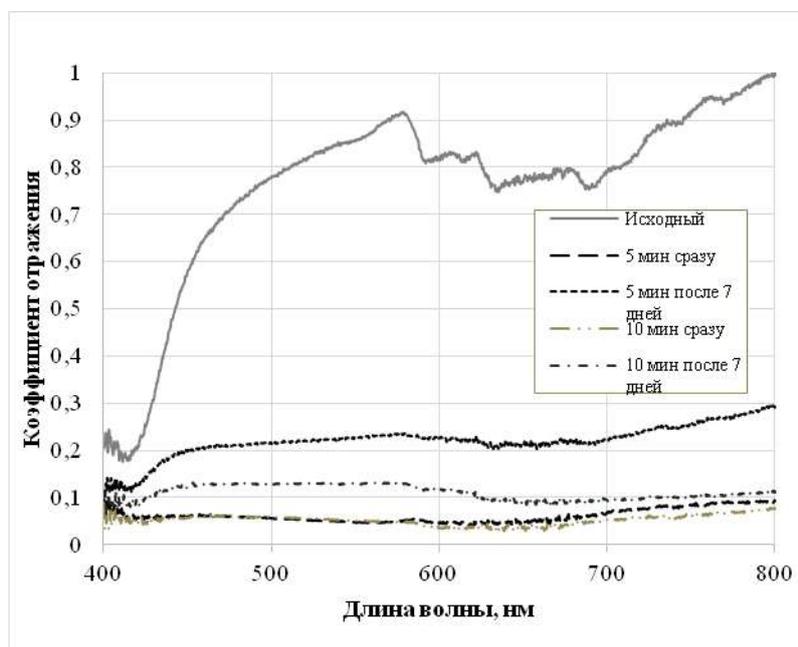
Рентгеновский дифракционный анализ показал, что фазовый состав слоев из оксида висмута после облучения не изменился (рис. 1). Таким образом, почернение поверхности не связано с образованием металлического висмута. Все пики на дифрактограмме соответствуют  $\alpha$ - $\text{Bi}_2\text{O}_3$ .



**Рис. 1.** Рентгеновская дифрактограмма оксида висмута после плазменной обработки

После облучения образцы держались в светонепроницаемом боксе в течение 7 дней. Анализ повторно снятых спектров диффузного отражения после выдержки в отсутствии

освещения показал, что коэффициент отражения образца, облученного в течение 5 минут возрос до 22%, а коэффициент отражения образца, облученного в течение 10 минут – до 13% (рис. 2).



**Рис. 2.** Коэффициент диффузного отражения слоя из оксида висмута, облученного в течение 5 минут (образец А) и 10 минут (образец В), в зависимости от длины волны и времени регистрации спектров

Таким образом, в результате проведенных экспериментов было установлено, что облучение плазмой высокочастотного разряда оксида висмута приводит к изменению его коэффициентов отражения. Однако приобретенное после облучения состояние оксида висмута является неравновесным. Продолжительная выдержка образцов в отсутствие освещения приводит к увеличению коэффициента отражения, что связано, по-видимому, с процессами релаксации электронной структуры. Наблюдаемый эффект требует дальнейшего детального исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Iyyapushpam S., Nishanthi S. T., Pathinettam Padiyan D. Photocatalytic degradation of methyl orange using  $\alpha$ - $\text{Bi}_2\text{O}_3$  prepared without surfactant // Journal of Alloys and Compounds. 2013. V. 563. P. 104-107.
2. Leontie L., Caraman M., Visinoiu A., Rusu G.I. On the optical properties of bismuth oxide thin films prepared by pulsed laser deposition // Thin Solid Films. 2005. V. 473. P. 230-235.
3. Xu D., Hai Y., Zhang X., Zhang S., He R.  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  cocatalyst improving photocatalytic hydrogen evolution performance of  $\text{TiO}_2$  // Applied Surface Science. 2017. V. 400. P. 530-536.
4. Qin P., Xu H., Long H., Ran Y., Shang S., Yin Y., Dai X. Ni/MgO catalyst prepared using atmospheric high-frequency discharge plasma for  $\text{CO}_2$  reforming of methane // Journal of Natural Gas Chemistry. 2011. V. 20. Iss. 5. P. 487-492.
5. Wei B., Chen Y., Ye M., Shao Z., He Y., Shi Y. enhanced degradation of gaseous xylene using surface acidized  $\text{TiO}_2$  catalyst with non-thermal plasmas // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2015. V. 35. Iss. 1. P. 173-186.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СТРУКТУРЫ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

**И. С. Долгополов<sup>1</sup>, М. С. Петрова<sup>1</sup>, А. В. Сюй<sup>1,2</sup>, Е. А. Антонычева<sup>1</sup>**

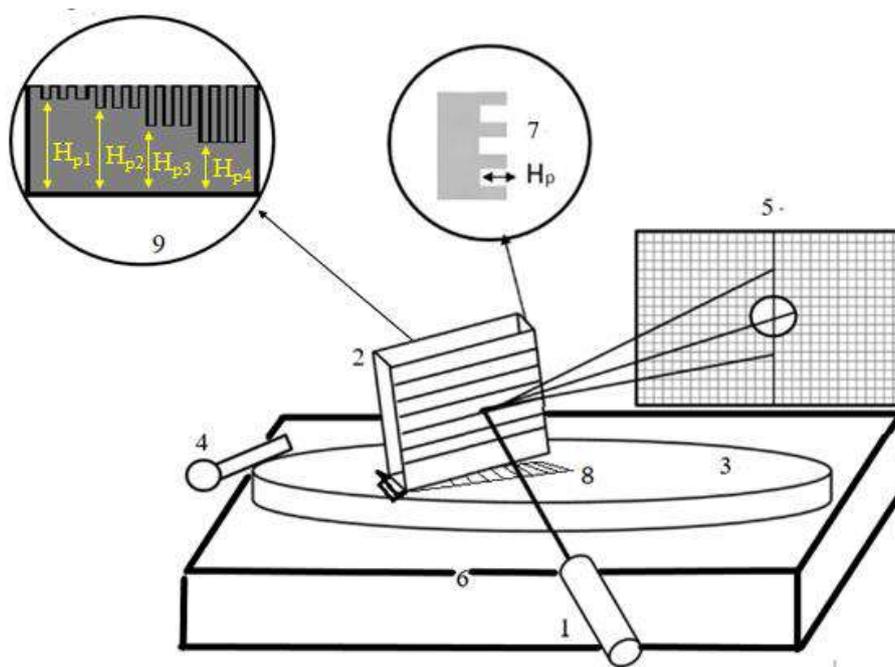
<sup>1</sup>Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

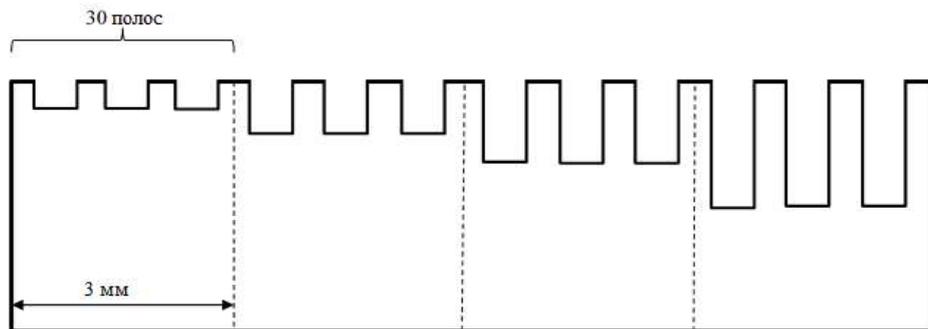
e-mail: [ioj7416@gmail.com](mailto:ioj7416@gmail.com)

*Рассмотрена работа оптического фильтра на основе отражающей глубокой рельефной структуры переменной глубины, допускающей изменение частотных характеристик в инфракрасном диапазоне с помощью калибровки угла падения входного излучения и переменной глубины профиля. Разработана программа ЭВМ для расчёта и определения оптимальных параметров фильтрации оптического излучения в инфракрасном диапазоне.*

Ранее в исследовании [1] уже был рассмотрен фильтр с использованием глубокой рельефной структуры переменной глубины. Схема работы оптического фильтра изображена на рис. 1. Профиль рельефной структуры переменной глубины представлен на рис. 2.



**Рис. 1.** Схема оптического фильтра с применением глубокой рельефной структуры переменной глубины: 1 – источник излучения, 2 – глубокая рельефная структура, 3 – поворотная платформа для регулировки угла падения входного пучка, 4 – механизм поворота платформы, 5 – пространственный фильтр, 6 – основание, 7 – форма профиля глубокой рельефной структуры; 8 – механизм для линейного перемещения глубокой рельефной структуры; 9 – вид на глубокую рельефную структуру сбоку



**Рис. 2.** Вид на глубокую рельефную структуру сбоку

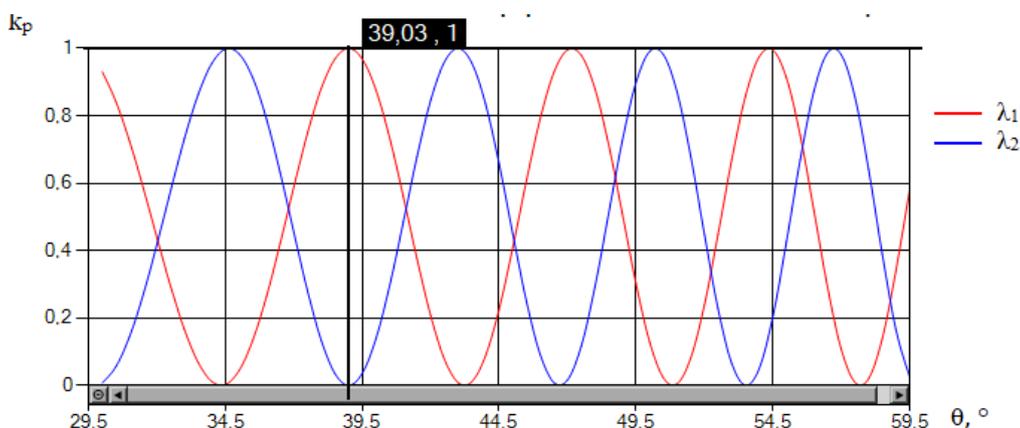
Входной пучок излучения направлен под углом падения  $\theta$  на рельефную структуру с прямоугольным профилем с глубиной рельефа  $H_p$ . Плоскость падения параллельна линиям рельефа рельефной структуры. После отражения от решётки на выходе выделяется нулевой порядок дифракции с помощью простого пространственного фильтра. Зависимость коэффициента передачи мощности излучения  $k_p$  с входа на выход устройства от длины волны излучения определяется соотношением (1):

$$k_p = \cos^2 \left[ \left( \frac{2\pi H_p}{\lambda} \right) \cos \theta \right] \quad (1)$$

где  $k_p$  – коэффициент мощности излучения,  $\lambda$  – длина волны излучения,  $H_p$  – глубина рельефа решётки,  $\theta$  – угол падения светового пучка.

При различных углах падения нулевые коэффициенты передачи фильтра соответствуют разным длинам волн. Меняя угол падения входного излучения и глубину рельефа, можно изменять отраженные частотные характеристики оптического излучения с максимальным коэффициентом передачи (близким к единице) в инфракрасном диапазоне излучения.

Например, при параметрах:  $H_p = 7$  мкм,  $\theta = 39^\circ$ , исходя из уравнения, (1) можно настроить входное излучение на необходимую частоту так, чтобы выделить одну наиболее интенсивную спектральную линию излучения, а другие перекрыть. В инфракрасном диапазоне излучения длины волн при данных параметрах соответствуют значениям  $\lambda_1 = 1,36$  мкм и  $\lambda_2 = 1,28$  мкм. При этом спектральная линия с частотой  $\lambda_1 = 1,36$  мкм имеет максимальную интенсивность, а спектральная линия с частотой  $\lambda_2 = 1,28$  мкм перекрывается. На рис. 3 представлен график зависимости коэффициентов мощности от угла падения луча.



**Рис. 3.** График зависимости коэффициента мощности от угла падения луча, при параметрах:  $H_p = 7$  мкм,  $\theta = 39^\circ$ ,  $\lambda_1 = 1,36$  мкм и  $\lambda_2 = 1,28$  мкм

Этот график демонстрирует возможность перестройки расположения частот максимума и минимума коэффициента пропускания за счёт изменения угла падения  $\theta$  входного оптического пучка и глубины рельефа. Фильтр на основе глубокой рельефной структуры можно настроить на подавление излучения с любой длиной волны в широком диапазоне. Если излучение с некоторой длиной волны подавлено и не проходит на выход в нулевой порядок, то оно передаётся в первые и в высшие порядки дифракции.

Фильтр с рельефной структурой переменной глубины может быть изготовлен на подложке из стекла методом облучения фемтосекундным лазерным излучением поверхности подложки с разной интенсивностью излучения в каждой зоне [2], тем самым обеспечивая переменную глубину решётки (рис. 2). А затем рельеф покрывается отражающей плёнкой из серебра или алюминия.

Также существует способ изготовления глубокой рельефной структуры переменной глубины на подложке из стекла методом химического травления поверхности подложки через маску из фоторезиста с постепенным извлечением из кислоты под небольшим углом, тем самым обеспечивая переменную глубину решётки. После этого рельеф также следует покрыть отражающей плёнкой из серебра или алюминия.

Установка расчётного угла падения осуществляется за счёт поворота платформы 3 (рис. 1) с реально достижимой точностью, а затем угол падения может быть скорректирован с помощью механизма точной настройки по критерию минимальной мощности излучения на выходе устройства на выбранной длине волны (например:  $\lambda_1 = 1,36$  мкм).

Для повышения точности получаемых значений параметров и автоматизации работы с расчётами была разработана программа на объектно-ориентированном языке высокого уровня C#. С помощью программы можно подбирать оптимальные параметры фильтра в различных диапазонах излучения, в том числе и в инфракрасном диапазоне излучения, а также строить по этим параметрам график зависимости. Вкладки «Подбор оптимальных параметров» и «Построение графиков» показаны на рис. 4а и 4б.

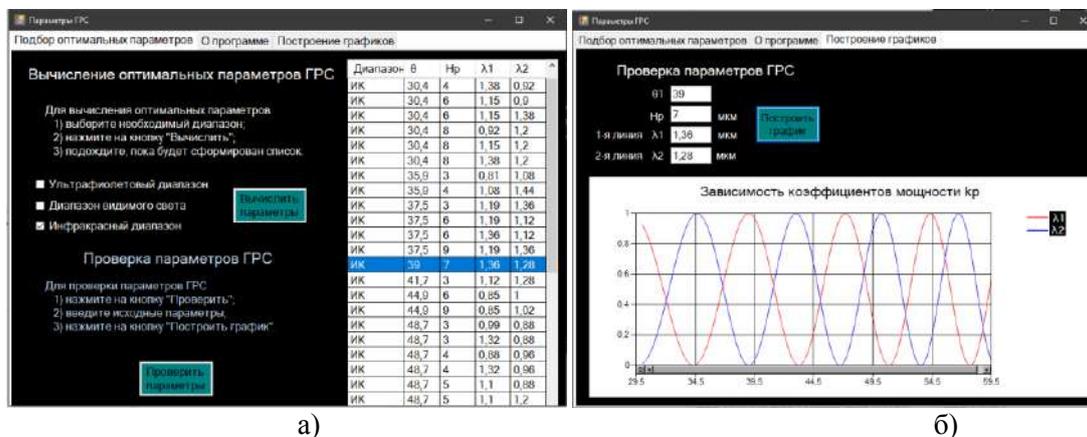


Рис. 4. Внешний вид окон программы:

а – вкладка «Подбор оптимальных параметров», б – вкладка «Построение графиков»

Программа позволяет вычислять и проверять вводимые параметры глубокой рельефной структуры с точностью до 0,001 мкм для длины волны и 30' (минут) для угла.

Следует отметить, что фильтр работает в широком оптическом диапазоне, но пропускает и одновременно гасит только пару длин волн. То есть эффективная работа фильтра возможна для двухчастотного излучения. При широкополосном излучении частично будут проходить и ближайшие частоты от фильтруемой. Данный оптический фильтр может применяться в сфере оптического приборостроения, в информационных

технологиях, а также в технологиях дистанционного управления, где требуется выделение одной частоты.

*Работа поддержана Министерством образования и науки Хабаровского края, соглашение №75С/2020 от 24.08.2020.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Долгополов И. С., Петрова М. С., Сюй А. В. Оптический фильтр на основе глубокой рельефной структуры переменной глубины // Тезисы докладов 77-й Межвузовской студенческой научно-практической конференции, изд.: ДВГУПС. 2019. Т. 2. С. 92.
2. Петрова М. С., Долгополов И. С., Сюй А. В., Жижченко А. Ю. Изготовление глубокой рельефной структуры переменной глубины для применения в оптическом фильтре // Материалы XVII региональной научной конференции. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, Благовещенский гос. пед. ун-т. 2019. С. 258.

УДК 534

## АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ СОСТАВОВ НА БАЗЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ХТ-116А

**К. А. Драчёв**

Тихоокеанский государственный университет  
г. Хабаровск, e-mail: [kirill@pnu.edu.ru](mailto:kirill@pnu.edu.ru)

*В работе представлены результаты экспериментальных исследований дисперсионных свойств образцов, изготовленных из модифицированной эпоксиановой смолы ХТ116 и аминного отвердителя, используемой для формования и заливки изделий в промышленности. Проводились измерения скорости звука и коэффициента затухания с использованием автоматизированной системы в диапазоне частот от 100 кГц до 2 МГц.*

Материалы, применяемые человечеством, всегда играли важную, а часто и определяющую роль в развитии цивилизации. Современную эпоху смело можно назвать эпохой полимеров (органических полимеров). Сырьем для таких полимеров являются главным образом природные углеводороды.

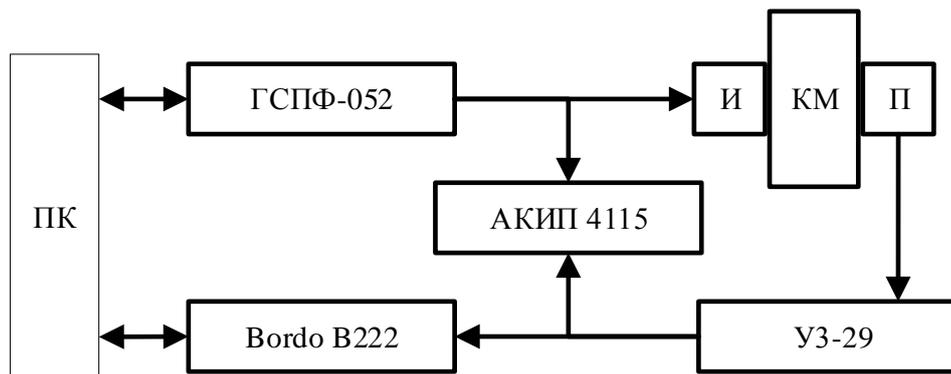
В процессе изготовления полимерных композиционных материалов одной из главных задач является обеспечение необходимого уровня их физико-механических характеристик. Уровень этих характеристик полимерных композиций определяется двумя процессами: адгезионным взаимодействием связующего с наполнителем и отверждением полимерного связующего. Для успешного решения задачи повышения прочности таких материалов необходимо разобраться в механизме явлений и процессов, протекающих на границе раздела фаз.

Целью данной работы является изучение акустических свойств композиционных материалов на основе матрицы из низковязкого двухкомпонентного эпоксидного состава на базе модифицированной эпоксидной смолы ХТ-116А и аминного отвердителя ХТ-116Б с наполнителями на основе стекло- и углеродных тканей.

Данные составы представляют собой бесцветные прозрачные жидкости и применяются для формования изделий из стеклопластика, заливки форм (декоративных изделий), в качестве компонента составов для получения защитных покрытий по металлу, бетону и дереву.

Исследования акустических свойств образцов проведены на автоматизированной измерительной системе [1, 2]. Система выполнена на базе стационарной стойки, в которую смонтированы измерительные приборы (рис. 1). Измерительная система разработана с использованием специально подобранной аппаратной базы, обеспечивающей высокую точность и унифицированность измерений.

В качестве излучающих и принимающих элементов автоматизированной системы использовались одиночные раздельно-совмещенный и совмещенные пьезоэлектрические датчики (ПЭП) с резонансной частотой 1,25 МГц с углом ввода 0°. ПЭП устанавливаются на торец или поверхность образца с использованием специальной контактной жидкости. Измерения проводились в диапазоне частот от 100 кГц до 2 МГц.



**Рис. 1.** Блок-схема автоматизированной измерительной системы (ПК – персональный компьютер; ГСПФ-052 – блок цифрового генератора сигналов для излучателя И; Bordo B222 – блок аналого-цифрового преобразователя акустических сигналов, принимаемых пьезоэлектрическим приемником П; АКИП 4115 – контрольный цифровой осциллограф для мониторинга работы и настройки автоматизированной системы в режиме «онлайн»; УЗ-29 – широкополосный усилитель сигналов от приёмника П; КМ – образец композитного материала)

Образцы представляют собой пластины размером 50×50×10 мм с различным количеством уложенных слоев армирования (рис. 2б). В качестве основы для полимерных композиционных материалов использовалась модифицированная смола ХТ-116А с добавлением аминного отвердителя в соотношении 10:3 по весу.

Образцы изготавливались ручным формованием в специальной наборной форме (рис. 2а), состоящей из основания, нескольких пластин различной толщины и верхней крышки. Предварительно пропитанная эпоксидной смолой ткань укладывалась в предварительно обработанную силиконом наборную форму. Затем происходило отверждение в течение 24 часов при нормальной температуре и атмосферном давлении.

В некоторых случаях после отверждения производилась дополнительная механическая обработка для улучшения акустического контакта образца и пьезодатчика. Одним из недостатков данного метода является низкая степень армирования – не более 30% от общего объема, а также трудность удаления воздушных пузырей, из-за которых могут снижаться механические свойства композиционного материала.

Однако данный метод позволяет легко получить мелкие серии образцов, а также одиночные образцы без серьезных потерь качества изготовления. Кроме того, данный метод популярен во многих отраслях производства и, в частности, используется для производства корпусов лодок и резервуаров.



**Рис. 2.** Форма для отливки образцов из эпоксидной смолы ХТ-116 (а) и соответствующие образцы, полученные с использование данных форм (б)

Скорость акустических волн определялась на основе измерения времени прохождения УЗ импульса от излучателя до приемника. Определение времени прохождения  $t$  УЗ импульса производилось по анализу записанной и усредненной осциллограммы сигнала. Скорость распространения волны рассчитывалась как:

$$C_n = \frac{l}{t - t_0},$$

где  $l$  – расстояние между датчиками,  $t_0$  – время задержки сигнала (равно сумме времени задержки сигнала в электронном тракте возбуждения ультразвукового импульса измерительной системы и времени распространения сигнала в пьезопреобразователе и области контакта преобразователь-образец),  $t$  – время прихода волны. Время прихода импульса  $t$  определялось началом первой полуволны, амплитуда которой на 10% отличается от уровня фонового сигнала.

Коэффициент затухания определяется как относительное уменьшение амплитуды или мощности сигнала при передаче сигнала по образцу. В результате обработки сигналов можно было найти значения амплитуд прошедшего  $U_1$  и переотраженного  $U_2$  сигнала серии измерений. По значениям амплитуд можно вычислить коэффициент затухания сигнала в образце:

$$\alpha = \frac{20}{l} \lg \left( \frac{U_1}{U_2} \right).$$

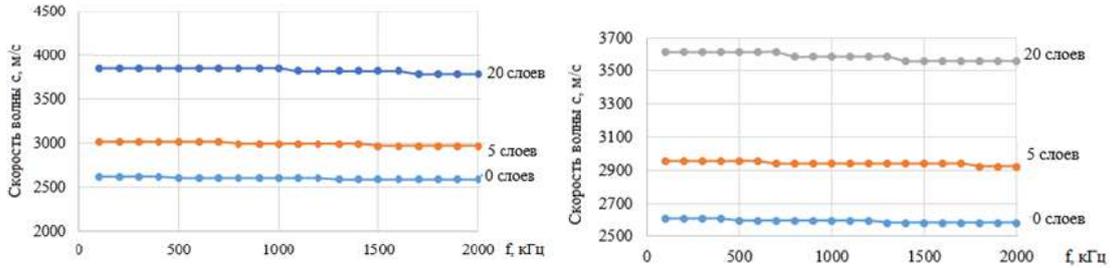
По получившимся значениям коэффициентов затухания можно посчитать среднее значение величины, а также погрешность. Данным методом вычисляется коэффициент затухания продольной волны.

Величина абсолютной погрешности измерения скорости продольных волн составила в измерениях  $\pm 45$  м/с. Величина относительной погрешности определения коэффициента затухания для продольных волн  $\Delta\alpha/\alpha$  не превышает 10 % во всем диапазоне частот. Более подробно методика расчета погрешности представлена в работе [3].

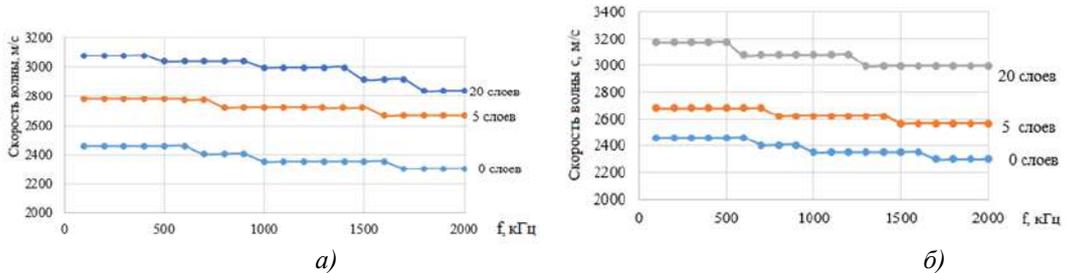
Для каждого образца были получены серии усредненных цифровых осциллограмм, акустических сигналов, прошедших сквозь образец, которые затем обрабатывались для получения данных о скорости звука и коэффициенте затухания. При исследовании акустических свойств выявлено, что скорость продольной волны при распространении поперек слоев армирования не постоянна по своему значению в данном частотном диапазоне и постепенно убывает с увеличением частоты. Так, например, для образца композицион-

ного материала, армированного 5 слоями стеклоткани, скорость волны при частоте 100 кГц равна 2583 м/с, тогда как при частоте 2 МГц составила 2469 м/с. Значения скорости звуковой волны, пропускаемой вдоль слоев армирования у стеклопластиков, с учетом погрешности, не изменяются. В связи с этим, дисперсионные зависимости в частотном диапазоне от 100 кГц до 2 МГц имеют линейный характер (рис. 3).

*Вдоль слоев армирования*

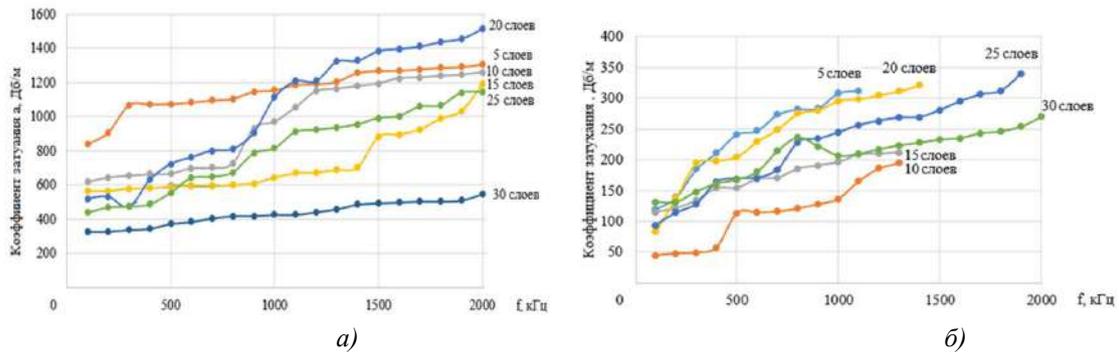


*Поперек слоев армирования*



**Рис. 3.** Зависимость скорости звука от частоты для образцов композиционных материалов из эпоксидной смолы ХТ-116 с армированием стеклотканью (а) и углетканью (б)

Исследования частотных зависимостей коэффициента затухания звука  $\alpha$  в полимерных композиционных материалах проводились на основе анализа цифровых осциллограмм с помощью автоматизированной измерительной системы. Методика определения дисперсионных характеристик основывается на выделении первого прошедшего и второго переотраженного импульсов. В результате для всех образцов получены частотные зависимости коэффициента затухания в диапазоне частот от 100 кГц до 2 МГц (рис. 4).



**Рис. 4.** Зависимость коэффициента затухания от частоты для образцов композиционных материалов на основе смолы ХТ-116, армированных стеклотканью, при прохождении звуковой волны: а) поперек слоев армирования; б) вдоль слоев

По мере увеличения частоты, значение коэффициента затухания  $\alpha$  увеличивается на протяжении всего диапазона исследуемых частот. При распространении поперек волокон

армирующего слоя в образцах композиционных материалов, армируемых стеклотканью, можно выделить зависимость коэффициента затухания от количества слоев армирования. В случае измерений, когда звуковая волна пропусклась вдоль слоев армирования, в диапазоне частот от 1 до 1,5 МГц становится невозможно измерить коэффициент затухания из-за того, что амплитуда переотраженного импульса приближается к уровню шумовых сигналов. Сложности, возникшие при измерении коэффициента затухания при измерении поперек армирования, может быть связана со шероховатостью и неровностью плоскости поверхности.

Как можно заметить, скорость звука незначительно уменьшается с ростом частоты для всех образцов, что, видимо, связано с влиянием армирующих слоев. Численные значения согласуются с ранее полученными в работах [4, 5]. Коэффициент затухания возрастает с ростом частоты, что согласуется с теоретической пропорциональностью коэффициента квадрату частоты для аморфных тел. При этом для некоторых образцов в области частот до 500 кГц наблюдается незначительный рост величины коэффициента затухания, а затем его резкое возрастание, что, видимо, связано с погрешностью измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Драчёв К. А., Римлянд В. И., Савченко В. В. Автоматизированная измерительная система для проведения акустических измерений // Вестник ТОГУ. № 1 (44). 2017. С. 13-20.
2. Драчёв К. А., Римлянд В. И. Исследования акустических свойств материалов ультразвуковыми методами: монография. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2017. 123 с.
3. Драчёв К. А., Римлянд В. И. Измерения акустических параметров с использованием радиоимпульса // Измерительная техника. № 6. 2017. С. 60-64.
4. Драчев К. А., Римлянд В. И. Исследования акустических свойств полимерных композиционных материалов // Вестник АмГУ. Сер. «Естественные и экономические науки». Вып. 79. 2017. С. 169-172.
5. Селеменова А. А., Римлянд В. И. Дисперсия акустических свойств композиционных материалов // Материалы секционных заседаний 59-й студенческой научно-практической конференции ТОГУ. 2019. С. 51-54.

УДК 531.76

## МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ВРЕМЕННОГО ФАЗОВОГО ИНТЕРПОЛЯТОРА В ЗНАЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ

**Д. Г. Калинов<sup>1</sup>, В. И. Римлянд<sup>2</sup>, А. В. Болоховцев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Дальневосточный филиал ФГУП «ВНИИФТРИ» г. Хабаровск

<sup>2</sup>Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [kalinov.d@dfvniiftri.ru](mailto:kalinov.d@dfvniiftri.ru)

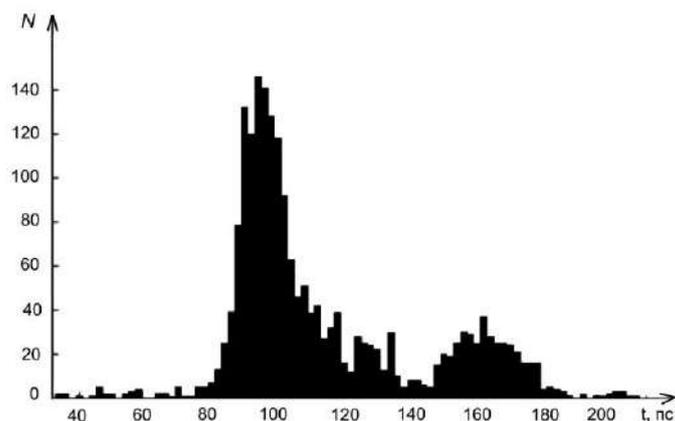
*В работе представлен анализ распределение значений задержек (субквантов) времени, реализованных на микросхемах FPGA. Установлена зависимость погрешности измерения интервалов времени от первичной калибровки и величины фазового дрожания. Предложен параллельно-каскадный метод преобразования состояния временного фазового интерполятора в значение времени на интервале квантования.*

Измерения временных интервалов играют важную роль во многих областях науки и техники, например, оптической связи [1], при исследовании физических величин [2], фа-

зовой синхронизации в микропроцессорах [2], медицине для получения послойного изображения, время-частотных измерениях, связанных с функционированием навигационной системы ГЛОНАСС [3] и др. В [4] описан принцип измерения интервалов времени между двумя импульсными сигналами А, В с применением фазового интерполятора. Результат измерения определяется суммарным временем полных периодов  $T_{ОП}$  и модулем разности интерполяционных значений периодов  $T_A, T_B$ .

$$\Delta T_{A-B} = (N_A - N_B) \cdot T_{ОП} + |T_A - T_B|, \quad (1)$$

Для измерения долей периода на краях измеряемого интервала применяются различные методы разбиения периода опорной частоты на дискретные части [5] – субкванты времени, т.е. на множество фиксируемых фазовых аппаратно-устойчивых состояний логической схемы относительно фронта измеряемого сигнала и фронта опорного генератора. В настоящее время широко распространена реализация дискретных фазовых интерполяторов интервалов времени на базе логических элементов FPGA. В [6] приведены минимальные значения задержек при прохождении импульсных сигналов через логические элементы. Например, для микросхем Cyclone V типа 5CEFA5F23C7 (Intel, США) время распространения импульсного сигнала соответствует 10–200 пс. На рис. 1 представлено распределение фактических значений задержек в логических элементах, полученное после выполнения первичной калибровки [7].



**Рис. 1.** Распределение значений задержек «субквантов» времени для микросхемы FPGA Cyclone V типа 5CEFA5F23C7

Из рис. 1 видно, что присутствует две области со средним значением 95 пс и 165 пс. Данный вид распределения зависит от структурных особенностей микросхемы. Реализация последовательной цепочки логических элементов в микросхеме FPGA в основном располагается в логических блоках LAB (Logic array blocks). Однако зачастую на реализацию одной цепочки задержек одного логического блока не хватает, поэтому при синтезе схемы используются специальные соединители для перехода к соседним блокам LAB. Время распространения в соединителях соответствует 70 пс. В распределении присутствуют значения задержек менее 60 пс, что можно объяснить различными задержками выводов задержек до схемы обработки.

Для определения значения времени на интервале квантования предлагается следующая последовательность действий:

- фиксации фазового состояния линии задержки, специальной схемой, которая определяет номер задержки субкванта времени;
- по номеру фазового состояния строки (последовательной цепочки задержек) из постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) выбираются цифровые значения времени

устойчивого состояния фазового интерполятора, которые соответствуют началу и окончанию этого состояния. Эти значения определяются предварительной калибровкой измерительной матрицы, описанной в [7]. Необходимо отметить, что точность определения временных границ составляет 2-3 пс;

- создаются два массива временных значений. Первый соответствует массиву времени начал устойчивых фазовых состояний всех линий задержек (строк), второй – времени окончания;

- в первом массиве выполняется перестановка по увеличению временных значений, во втором массиве по убыванию;

- из первого массива выбирается наибольшее временное значение, из второго – наименьшее;
- из выбранных временных меток вычисляется среднее значение.

На рис. 2 представлен пример из 10 цепочек линий задержек (ЦЛЗ) распределения временных границ субкванта FPGA. Для удобства понимания границы эквивалентных субквантов представлены в виде двух графиков. На рис. 3 представлены выбранные схемой обработки субкванты временных начал, расставленные по возрастанию и временные окончания расположены по убыванию.

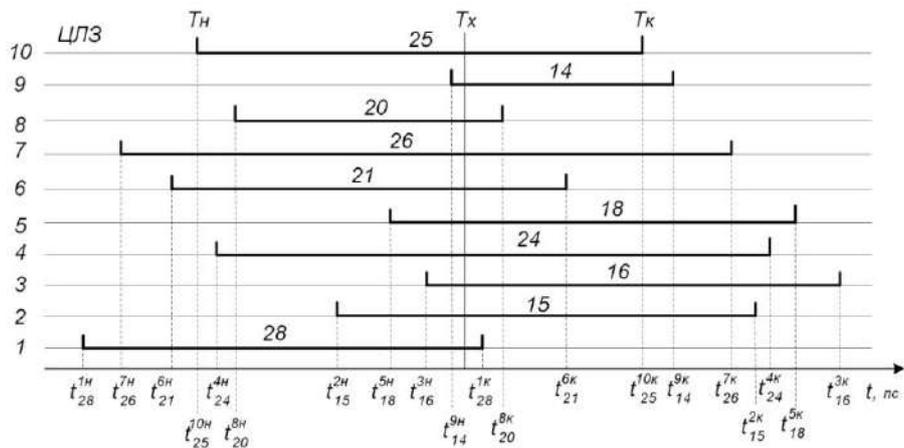


Рис. 2. Пример распределение значений субквантов времени для FPGA без учета влияния шумов

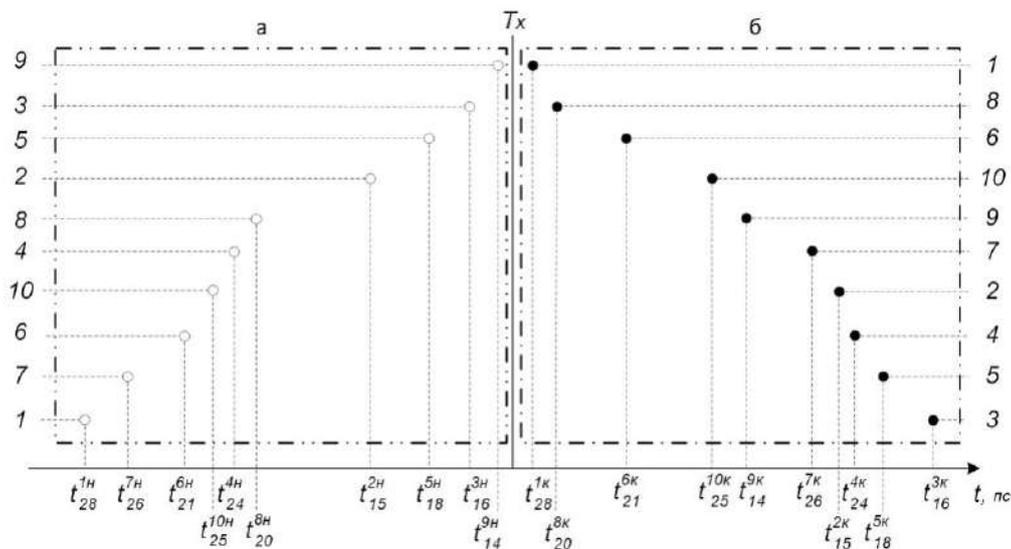


Рис. 3. Сортировка массива ячеек логических элементов задержки без учета влияния шумов:  
а – начал по возрастанию, б – окончания по убыванию

В идеальном случае расчетное и истинное значение измеряемой величины находятся между максимумом временных начал и минимумом временных окончаний. Погрешность расчетного значения обусловлена только шириной результирующего интервала времени. Однако схема обработки не всегда верно формирует номер субкванта в строке (рис. 4). Это объясняется двумя причинами. Первая связана с погрешностью первичной калибровки измерительной матрицы, вторая связана с временным дрожанием (джиттером) фронтов при распространении импульсного сигнала по последовательной цепочке задержек. Величина джиттера увеличивается пропорционально корню квадратному от номера задержки [6] и определяется по формуле

$$\bar{\sigma} = \sqrt{N} \cdot \sigma_{\text{суб}}, \quad (2)$$

где  $N$  – номер задержки,  $\sigma_{\text{суб}}$  – равно 0,91 пс при длительности одного субкванта 140 пс.

Если истинное значение по времени совпадает с временем начала или окончания определенного устойчивого фазового состояния интерполятора в пределах точности первичной калибровки и величины джиттера, то существует вероятность формирования такого номера субкванта, во временной интервал которого оно не попадает. Поэтому, предел разрешающей способности метода ограничен точностью калибровки и джиттером электронных схем.

В общем случае для одной ЦЛЗ предел разрешающей способности будет иметь вид:

$$\Delta_{\text{раз}} = \pm 3\sqrt{\sigma_{\text{к}}^2 + N \cdot \sigma_{\text{суб}}^2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{\text{к}}$  – среднеквадратическое значение погрешности первичной калибровки.

Для среднего значения  $N=25$ ,  $\sigma_{\text{суб}}=0,91$  пс,  $\sigma_{\text{к}}=3$  пс, предельная разрешающая способность данного метода будет составлять 16,5 пс. При увеличении количества ЦЛЗ разрешающая способность повышается. Таким образом, погрешность измерений интервалов времени пропорциональна корню квадратному от номера задержки и обратно пропорциональна количеству ЦЛЗ.

При увеличении числа элементов в измерительной матрице фиксирование «ложных» временных субквантов будет увеличиваться. Это будет отражаться в виде пересечения массивов временных начал и окончаний фазовых состояний. Очевидно, что чем выше уровень шумов и погрешность первичной калибровки, тем большее количество значений попадет в область фиксации времени соседнего массива расположенную в верхней части графика (рис. 5)

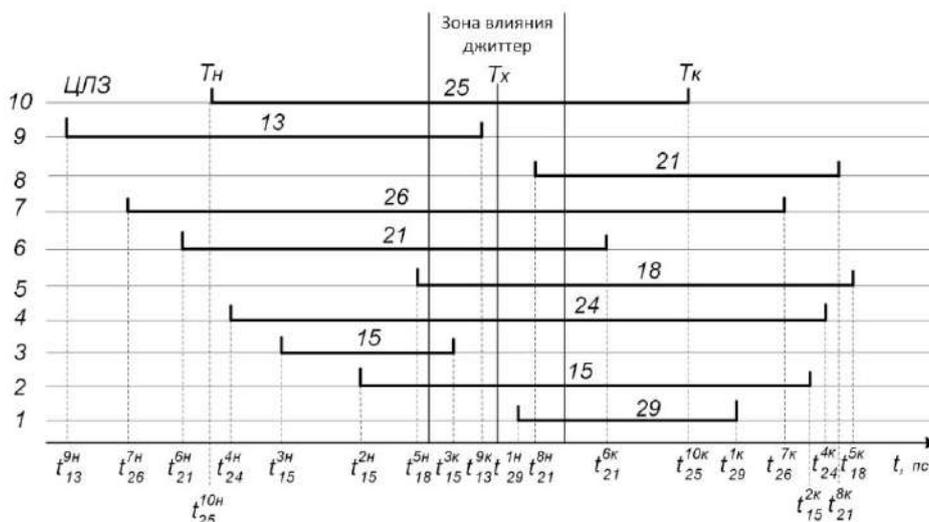


Рис. 4. Пример возможных ошибок в определении номера субквантов времени, в зоне влияния джиттера

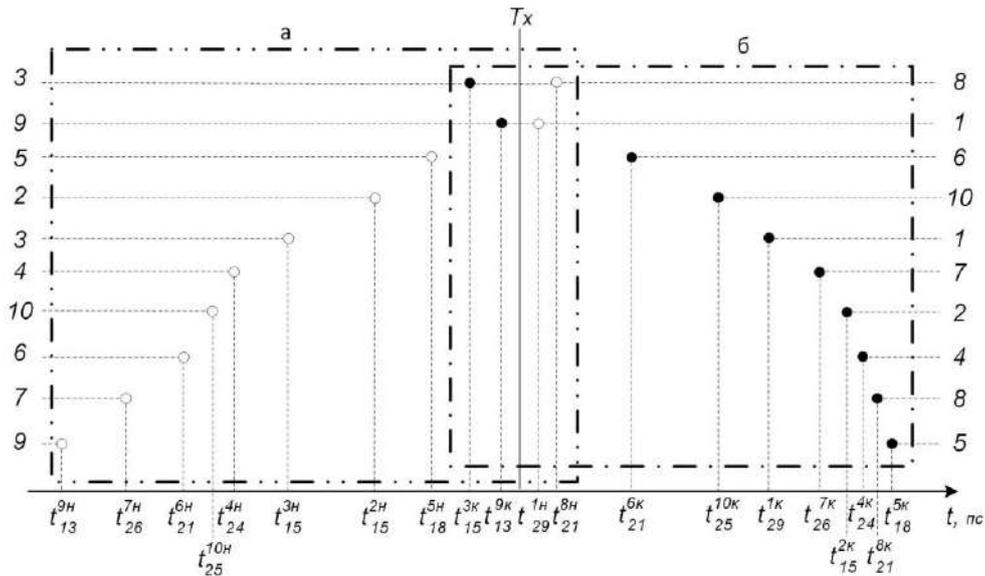


Рис. 5. Сортировка пересекающихся массивов логических элементов задержки, а – начал по возрастанию, б – окончания по убыванию

Алгоритм выбора расчетного значения заключается в последовательном поиске первой пары ( $t^{5H}_{18}$ ,  $t^{6H}_{21}$ ) с положительной разницей между концом и началом субквантов из разных массивов. Начало процесса поиска необходимо осуществлять с вершины графика.

Для увеличения скорости обработки и формирования временного отсчета на элементах FPGA предлагается синтез параллельно-каскадных вычислений. Структурная схема, реализующая этот принцип, представлена на рис. 6.

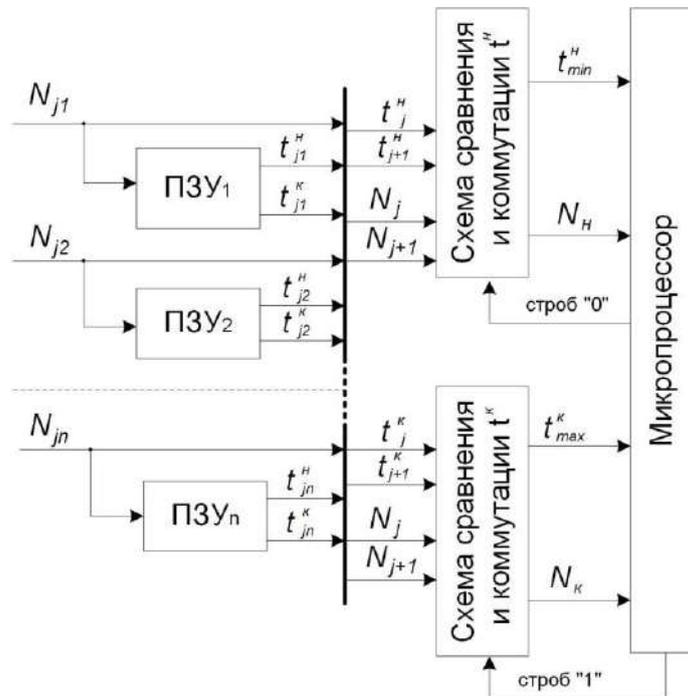


Рис. 6. Структурная схема параллельно-каскадного преобразования состояния временного фазового интерполятора в значение времени на интервале квантования

В каждой строке по номеру субкванта времени из ПЗУ выбираются значения  $t_{i,j}^H, t_{i,j}^K$ , которые соответствуют времени начала и конца устойчивого фазового состояния.

Пара кодов от двух строк сравнивается схемой сравнения, затем определяется наибольшее значение  $t_{i,j}^H$ .

При этом на выход схемы транслируется код максимального значения и соответствующий номер строки.

Данная схема многократно повторяется и выполняется параллельно. Для матрицы из 10 строк требуется 9 схемы сравнения. В результате вычисляются максимальное и минимальное значения  $t_{i,j}^H, t_{i,j}^K$  из соответствующих массивов.

Далее микропроцессор осуществляет вычитание  $t_{i, макс}^K - t_{i, мин}^H$  и если разность отрицательна, то на соответствующий вход схемы сравнения подается строб, обнуляющий значение  $t_{i, макс}^K$  и увеличивающий до максимума  $t_{i, мин}^H$ .

Процедура повторяется до тех пор, пока  $t_{i, макс}^K - t_{i, мин}^H$  не станет положительной. Затем расчетное значение времени вычисляем по формуле

$$t_{расч} = (t_{i, макс}^K + t_{i, мин}^H) / 2, \quad (4)$$

Дальневосточным филиалом ФГУП «ВНИИФТРИ» (г. Хабаровск) разработан и опробован макет измерителя временных интервалов, где реализован последовательный метод преобразования состояния временного фазового интерполятора. Частота преобразования последовательного метода в двухканальном режиме не превышает 100 Гц.

Предложенный параллельно-каскадный метод позволяет производить вычисления временных интервалов с частотой до 10 МГц.

Метод имеет перспективы и применим для исследования характеристик высокочастотных сигналов в частотомерах и частотных компараторах, выполненных на базе FPGA.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Юсупалиев У. К. Измерение интервала времени с пикосекундным разрешением для системы «лазер – времяпозиционно-чувствительный детектор излучения». 2009, № 5. Р. 113-118.
2. A new drift chamber TDC readout for the high intensity program of the NA48 experiment / R. Arcidiacono [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2004. С. 493-494.
3. Красовский П. А. Метрология космических навигационных спутниковых систем. ФГУП "ВНИИФТРИ", 2009. 216 с.
4. Мейзда Ф. Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений. Москва: Мир, 1990. 535 с.
5. Чулков В. А. Интерполирующие устройства синхронизации и преобразователи информации. Москва: Физмалит, 2010. 324 с.
6. Калинов Д. Г. [и др.] Оценка влияния ключевых параметров FPGA серии Cyclone V при проектировании цифровых преобразователей время-код // Ученые заметки ТОГУ. 2017. Т. 8, № 3. С. 372-377.
7. Kalinov D. G. Pre-Calibration of the Phase Interpolator of a Precision Time Interval Meter / D. G. Kalinov, V. I. Rimlyand // Meas Tech. 2020. Vol. 63, № 5. P. 353-360.

## ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКСИДА ВИСМУТА

**Н. В. Кожемяко, С. А. Пячин, Т. В. Бондарева, И. Н. Егоршин**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [2016100875@pnu.edu.ru](mailto:2016100875@pnu.edu.ru)

*Проведены исследования воздействия плазмы емкостного высокочастотного газового разряда низкого давления на слой оксида висмута. Было показано, что в результате облучения оксид висмута приобретает центры поглощения.*

Высокочастотные (ВЧ) разряды находят применение для травления и нанесения тонких плёнок, в плазмохимии, газовых лазерах и т.д.

Они служат эффективным инструментом для активации поверхности твердых тел за счет формирования разветвленного микрорельефа, образования дефектов и областей локального заряда [1].

Высокоэнергетическое воздействие потоками заряженных частиц и мощное световое облучение поверхности полупроводников создают благоприятные условия для генерации электронно-дырочных пар и образования ловушек носителей заряда.

Облучение емкостным высокочастотным разрядом позволяет повысить активность фотокаталитических материалов, которые применяются для разложения вредных органических соединений.

К фотокаталитическим материалам относится оксид висмута [2-4].

Целью работы являлось изучение спектров диффузного отражения тонкого слоя оксида висмута, облученного плазмой высокочастотного газового разряда.

Плазменная обработка поверхности образцов осуществлялась в вакуумной камере при давлении 70 мТор.

Образец располагался вблизи активного электрода таким образом, что осажденный на подложку материал был обращен в сторону области свечения газового разряда. Частота внешнего поля – 8,5 МГц, напряжение на внешних электродах 2 кВ. Продолжительность облучения составила: 1, 3, 5, 10 и 30 минут.

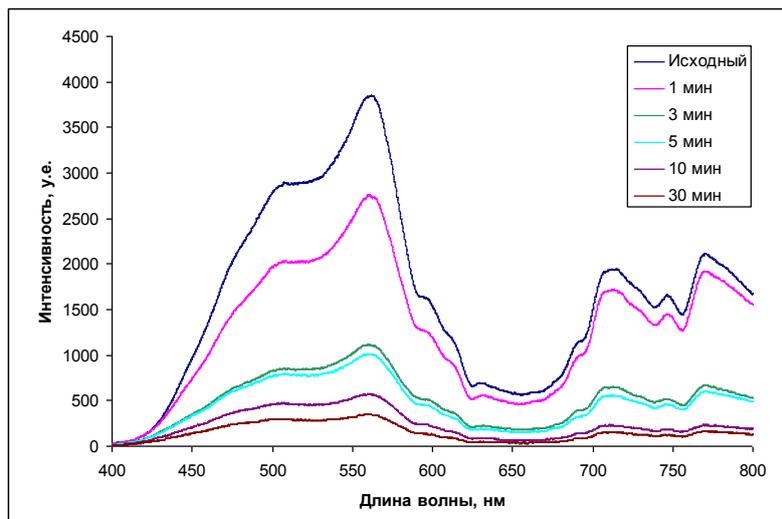
После облучения поверхности проводилось исследование образцов на спектрофотометре СФ-2000 методом спектроскопии диффузного отражения.

Полученные спектры представлены на рис. 1.

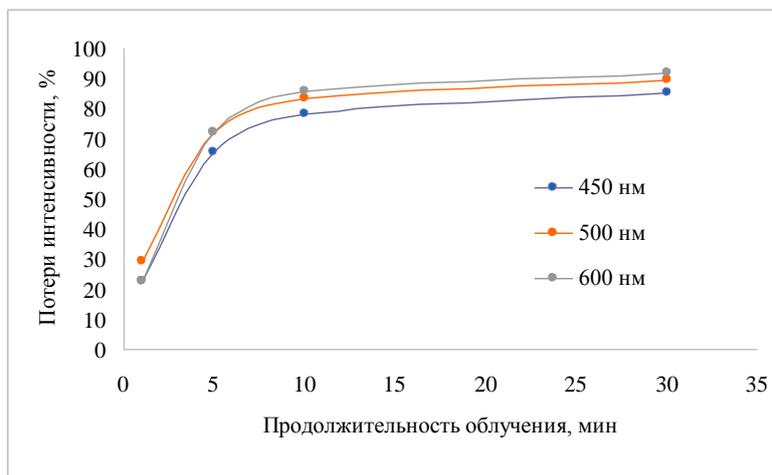
Из графиков видно, что при увеличении времени облучения падает интенсивность отраженного излучения, что свидетельствует о повышении поглощения света в видимом и ИК диапазонах.

В ходе обработки экспериментальных данных была выявлена кинетика почернения при облучении, которая показала, что за первые 10 минут облучения происходит потеря интенсивности рассеяния света более 80% (рис. 2).

При дальнейшем облучении образца интенсивность отраженного излучения остается практически на том же уровне.



**Рис. 1.** Спектры диффузного отражения



**Рис. 2.** Кинетика почернения образцов при облучении для разных длин волн

Таким образом, для достижения максимального эффекта от облучения достаточно 15 минут воздействия плазмой на поверхность пленки оксида висмута.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Савинов В. П. Физика высокочастотного емкостного разряда: монография. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 308 с.
2. Dong F., Li Q., Sun Y., Ho W. Noble Metal-Like Behavior of Plasmonic Bi Particles as a Cocatalyst Deposited on (BiO)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> Microspheres for Efficient Visible Light Photocatalysis // ACS Catalysis. 2014. Vol. 4. P. 4341-4350.
3. Зайцев А. В., Каминский О. И., Макаревич К. С., Кириченко Е. А., Пячин С. А. Измерение фотокаталитической активности висмутатных покрытий на керамическом носителе в автоматическом режиме // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 3. С. 278-284.
4. Liu X., Cao H., Yin J. Generation and photocatalytic activities of Bi@Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> microspheres // Nano Research. 2011. Vol. 4. P. 470-482.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА ПРЯМОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

**А. И. Ливашвили, П. В. Виноградова, В. А. Криштоп, И. С. Манжула, М. И. Якунина**

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск  
e-mail: [livbru@mail.ru](mailto:livbru@mail.ru)

*Настоящая работа посвящена возможности моделирования физических процессов, происходящих в процессе работы солнечного коллектора прямого поглощения солнечного излучения, в которой наножидкость является теплоносителем. Получена система уравнений, описывающая процессы переноса тепла и наночастиц. Сформулированы соответствующие граничные условия.*

Обычно, солнечные коллекторы прямого поглощения (КПП) - это теплообменники, оборудованные светопоглощающей чёрной поверхностью и ёмкостью с жидкостью (теплоносителем), которая используется одновременно для поглощения и отвода тепла. В последнее время в качестве теплоносителя используют наножидкости, которые являются стабильными суспензиями наночастиц в жидкостях (вода, гликоль, минеральное масло) [1-2]. По своим теплофизическим свойствам такие жидкости напоминают жидкие металлы: высокая теплопроводность, возможность эффективного поглощения солнечного излучения, а также магнитного управления течением, что способствует успешному применению наножидкостей в различных энергетических системах, повышению эффективности отбора тепла до полутора раз. Наличие прозрачного приёмника позволяет наночастицам поглощать, накапливать и передавать с достаточно большой скоростью базовой жидкости.

Следует также отметить, что в настоящее время нет полной ясности какие из них являются наиболее эффективными. Отчасти это связано с тем, что экспериментальные исследования достаточно сложны, и к тому же, спектр используемых наночастиц имеет большой разброс по своим параметрам. Численное моделирование может способствовать прояснению и уточнению ряда вопросов, связанных с происходящими фототермическими явлениями при конструировании КПП.

Среди представленных публикаций можно выделить работы [1-3], в которых описаны численно решаемые **двумерные стационарные модели**, целью которых было прогнозирование температурных профилей и эффективности изучаемых КПП. В работе [2] был использован двухфазный подход для наножидкостей, помещённой во внешнее магнитное поле.

Эти модели были основаны на теории рассеяния Ми и уравнения теплопроводности Фурье без учета конвективного движения наножидкости.

На наш взгляд, для более полного описания протекающих процессов в солнечном коллекторе, следует также привлечь балансное уравнение, описывающее динамику концентрации наночастиц. Эта необходимость возникает из-за того, что такие физические величины, входящие в уравнение теплопроводности, как коэффициенты теплопроводности, поглощения и конвективная скорость зависят от концентрации наночастиц.

Балансные уравнения, описывающие перенос тепла и массы при взаимодействии излучения с наножидкостью можно записать в виде

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(C) \operatorname{grad} T) - C_p \rho V(C) \operatorname{grad} T + (1 - R) \alpha(C) I_0 e^{-\alpha(C)r}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \operatorname{div}(D \operatorname{grad} C) + D_T \operatorname{div}(C(1 - C) \operatorname{grad} T) - V \operatorname{grad} C. \quad (2)$$

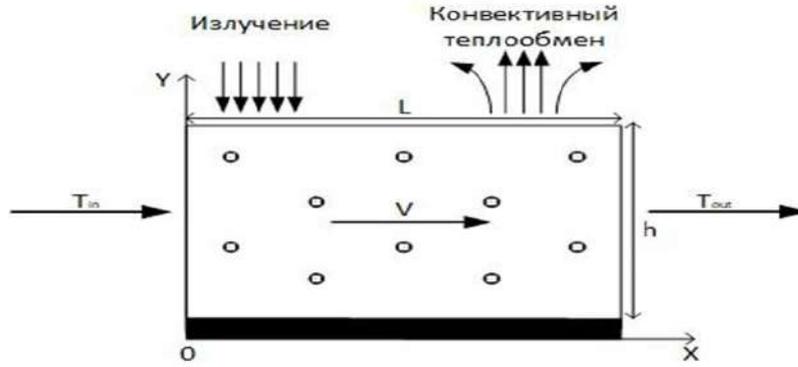
При получении системы (1) - (2) учтено условие несжимаемости наножидкости  $div(V) = 0$ .

Здесь приняты следующие обозначения:

$T(r,t)$  – температура среды,  $C(r,t)$  – объёмная концентрация наночастиц,  $C_p, \rho$  – теплофизические постоянные: теплоёмкость и плотность среды соответственно,  $\lambda(C)$  – коэффициент теплопроводности среды,  $V(C)$  – конвективная скорость,  $R$  – коэффициент отражения излучения от поверхности,  $\alpha(C)$  – коэффициент поглощения излучения,  $I(r)$  – интенсивность падающего на наножидкость излучения,  $D$  – коэффициент диффузии,  $D_T$  – коэффициент термодиффузии.

Заметим, что в уравнении (1) мы не включили, ввиду его малости, слагаемое, отвечающее за эффект Дюфура. Второе слагаемое в правой части уравнения (2) выражает поток частиц, обусловленный градиентом температуры (эффект Соре). Мы также не учитываем, так называемый, электрострикционный поток, вызванный действием сил со стороны электрического поля электромагнитной волны.

В случае перпендикулярного падения солнечного излучения на КПП геометрия задачи показана на рис.



Геометрия задачи

Перепишем уравнения системы (1-2) в соответствии с геометрией задачи.

$$\begin{cases} C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(C) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - C_p \rho V_x(C) \frac{\partial T}{\partial x} + (1-R)\alpha(C)I_0 e^{-\alpha(C)y}, \\ \frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - V_x(C) \frac{\partial C}{\partial x} + D_T C(1-C) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \\ div(V(C)) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Нас будут интересовать процессы с  $C \ll 1$ . Это неравенство гарантирует нам отсутствие процессов коагуляции (слипания) наночастиц. При этом  $0 \leq x \leq L$ ,  $0 \leq y \leq h$ ,  $0 \leq t \leq \infty$ .

Начальные и граничные условия можно представить в виде

$$T(x, y, 0) = T_0, \quad C(x, y, 0) = C_0. \quad (4)$$

$$x = 0, 0 \leq y \leq h, T(0, y, t) = T_{in} \quad (5)$$

$$y=0, 0 \leq x \leq L, H(T(y=0) - T_{cp}) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (6)$$

$$y = h, 0 \leq x \leq L, -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=h} = 0. \quad (7)$$

$$D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \left( D \frac{\partial C}{\partial x} V C \right) \Big|_{x=L} = 0, \lambda \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (8)$$

$$(D grad C) \Big|_{y=h} + D_T (C(1-C) grad T) \Big|_{y=h} = 0 \quad (9)$$

Заметим, что начальные условия (5) и граничные (8) будут согласованы если учесть факт “прилипания” частиц среды на стенки коллектора.

Согласно теоретическим и экспериментальным работам [4], концентрационную зависимость коэффициента теплопроводности среды при малых концентрациях можно считать линейной:

$$\lambda(C) = \lambda_0(1 + pC), \quad (10)$$

где  $\lambda_0$  – значение коэффициента теплопроводности несущей жидкости (без наночастиц), параметр  $p$  – линейный коэффициент.

Далее, как известно, для полного описания процессов переноса, рассматриваемую систему уравнений (3) необходимо дополнить уравнением Навье - Стокса (для определения скорости  $V$ ).

В нашем подходе мы представим конвективную скорость в виде

$$V(C) = \frac{\eta(C)}{\rho(C)l}. \quad (11)$$

где,  $\eta(C)$  – коэффициент динамической вязкости наножидкости,  $\rho(C)$  – её плотность, а  $l$  – характерная длина для системы, значение которой определится позже.

Зависимость коэффициента вязкости от концентрации будем считать линейной [3]:

$$\eta(C) = \eta_0(1 + \gamma C) \quad (12)$$

Что касается зависимости  $\rho(C)$ , то в здесь также допустима линейная зависимость от концентрации [3]:

$$\rho = \rho_0(1 + \chi C), \quad (13)$$

где,  $\rho_0$  – среднее значение плотности среды,  $\chi$  – коэффициент концентрационного расширения. Так как реально  $\gamma \gg \chi$ , то зависимость плотности от концентрации будем считать несущественной.

С учетом этого замечания, используя равенства (12) и (13), выражение для скорости (7) можно представить в виде

$$V(C) = \frac{\eta_0(1+\gamma C)}{\rho_0 l(1+\chi C)} \approx \frac{\eta_0}{l\rho_0} (1 + \gamma C). \quad (14)$$

Рассмотрим последнее слагаемое в уравнении теплопроводности, которое выражает ослабление интенсивности (закон Бугера-Ламберта) в котором обозначено:  $I_0$  – интенсивность падающего солнечного излучения на входе коллектора (рис.1). Как показано в работах [2-3], коэффициент поглощения  $\alpha(C)$  можно представить в виде

$$\alpha(C) = \frac{12\pi}{\lambda} C \operatorname{Im} \left( \frac{m^2-1}{m^2+2} \right), \quad (15)$$

$\lambda$  – длина волны излучения,  $m = \frac{m(\text{частиц})}{m(\text{жидкость})}$ . При этом  $m = n + ik$  – комплексный показатель преломления среды. При таком подходе не учитывается ослабление интенсивности излучения, обусловленное рэлеевским рассеянием. В работах [1-2] этот подход был убедительно обоснован.

Эффективность коллектора будем оценивать по формуле [3]

$$\eta = \frac{\text{полезн.}}{\text{затрачен.}} = \frac{\dot{m}}{SG_p} c_p (T_{in} - T_{out}), \quad (16)$$

где  $\dot{m}$  – массовый расход наножидкости,  $S$  – площадь верхнего покрытия коллектора,  $G_p$  – интенсивность падающего солнечного излучения, ( $T_{in}, T_{out}$  – температура жидкости на входе и выходе коллектора). Как показано в работе [1], величина  $\dot{m}$  определяется по формуле:

$$\dot{m} = \frac{gl^3}{3\eta(C)} \rho(C)^2 \quad (17)$$

Полученная система уравнений является существенно нелинейной и вряд ли может быть решена аналитически. Авторы предполагают использовать численные методы для её решения и анализа полученных результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Краснолуцкий С. Л., Физика и механика процессов теплообмена в течениях наножидкостей // Томск: Физ. Мезомех. 2016. Т. 1. С. 75-83.
2. Ni G., Miljkovic N., Ghasemi H., Huang X., Boriskina S.V., Lin C. T., Wang J., Xu Y, Rahman M.M., Zhang T.J, Chen G, Volumetric solar heating of nanofluids for direct vapor generation, Nano Energy 17 015. 290e301.
3. Liu J, Ye Z, Zhang L., Fang X., Zhang Z. A combined numerical and experimental study on grapheme /ionic liquid nanofluid based direct absorption solarcollector, Sol. Energy Mater. Sol. Cell. 136. 2015.
4. Рудяк В. Я., Краснолуцкий С. Л. Моделирование коэффициента вязкости наножидкости методом молекулярной динамики // Санкт-Петербург: Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 6. С. 9-16.

УДК 550.344

### СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МЕТОДА МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПО ДАННЫМ БЛИЗКО РАСПОЛОЖЕННЫХ СТАЦИОНАРНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

**В. А. Лобарева<sup>1</sup>, В. В. Пупатенко<sup>2</sup>, В. В. Насыров<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

<sup>2</sup>Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г. Хабаровск

e-mail: [000612@pnu.edu.ru](mailto:000612@pnu.edu.ru)

*В статье описываются применение метода микросейсмического зондирования (МСЗ). С помощью обработки длительных записей получена статистическая оценка точности, достижимой при использовании этого метода. Показано влияние расстояния между датчиками на точность результата. Обсуждается возможность и обоснованность использования более широкого частотного диапазона при обработке данных, полученных методом МСЗ.*

Метод микросейсмического зондирования (МСЗ) – один из распространенных методов пассивной сейсморазведки [1], применяемый при изучении и исследовании строения земной коры. Его особенность заключается в том, что в качестве источника зондирующего сигнала используется микросейсмический шум, который на низких частотах (менее 1 Гц) представлен преимущественно штормовыми микросейсмами, вызванными океаническим волнением.

В отличие от большинства других пассивных методов, в которых измеряются фазы сейсмических волн, метод МСЗ является амплитудным, т.е. измеряемым параметром являются амплитуды сейсмических колебаний. Постулируется, что разница амплитуд колебаний, наблюдаемых в одно и то же время на близких расстояниях (до первых десятков километров), отражает только различия во внутреннем строении земной коры в районе наблюдения. В предположении о том, что вертикальная составляющая низкочастотных колебаний представлена преимущественно волнами Релея, делается переход от частот колебаний к глубине, скоростные аномалии на которой преимущественно влияют на амплитуды.

Стандартная реализация метода МСЗ предполагает выполнение синхронного измерения микросейсмических колебаний как минимум на двух разнесенных широкополос-

ных сейсмометрах с последующим расчетом усредненных спектров этих сигналов. В отличие от фазовых методов, в которых из-за слабой локализации источников штормовых микросейсм в пространстве для получения качественных результатов необходимы длительные (часто более одного года) наблюдения на большом количестве одновременно работающих сейсмоприемников, при использовании метода МСЗ обычно достаточно 1,5–2 часов записи. Наблюдения проводятся в рамках специальных экспериментов с установкой временных «полевых» сейсмических пунктов. По сравнению с фазовыми методами метод МСЗ имеет очень высокую горизонтальную разрешающую способность, но его разрешение по вертикали невысоко.

Обработка измерений в методе МСЗ обычно сводится к расчёту спектров, их корректировке на записи, полученные базовой станцией, и пересчёту значений спектральной частоты в значения глубины. В результате получается двумерная (или трехмерная в случае площадной съёмки) модель вариаций скоростей поперечных волн.

Оценка разрешающей способности метода МСЗ в достаточной степени изучена на численных моделях [2] и теоретически [3]. При этом оценка погрешностей, вносимых самим методом, остается неисследованной. Она не может быть получена напрямую теоретически или по небольшому объему полевых измерений. Адекватная оценка точности необходима для правильной интерпретации получаемых методом МСЗ разрезов. В настоящей работе на основе обработки длительных записей, полученных на близкорасположенных постоянных сейсмических станциях, рассчитана статистическая оценка точности, достижимой при использовании метода МСЗ. Проанализировано то, как эта точность зависит от расстояния до базовой станции.

Для достижения поставленной задачи алгоритм метода МСЗ был применен к данным, полученным на стационарных сейсмостанциях, входящим в группу Eskdalemuir seismic array (Великобритания), доступным из онлайн-архива [4]. В качестве «полевого» сейсмоприемника взята станция EKR10. В качестве «базового» сейсмоприемника в первом случае выбрана станция EKR1, во втором – EKR9. Расстояние между станциями EKR10 и EKR1 составляет около 10 км, между станциями EKR10 и EKR9 около 1 км (рис. 1).

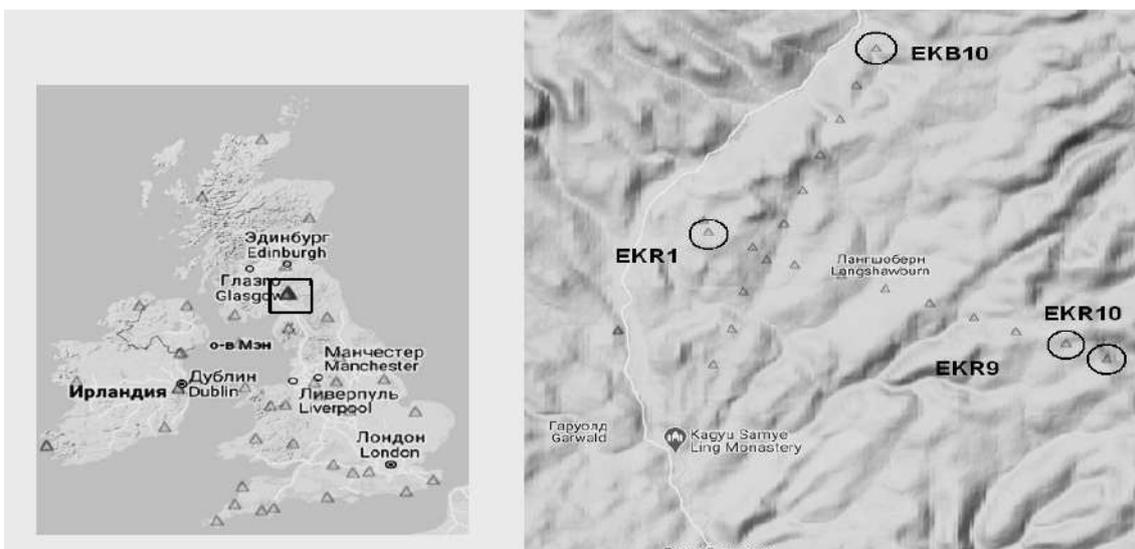


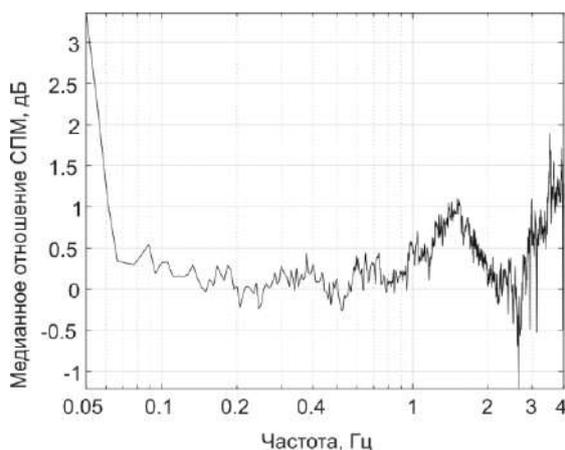
Рис. 1. Расположение станций EKR1, EKR9, EKR10

При расчете спектров была использована модифицированная версия оригинального алгоритма Уэлча [5], описанная в работе [6], состоящая из следующих шагов:

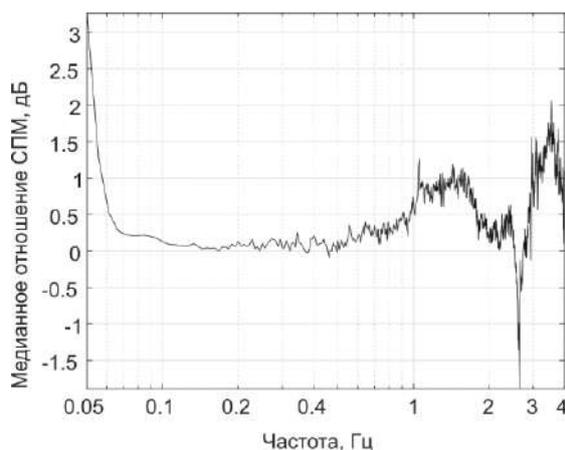
1. Вертикальная компонента сейсмических записей  $Z_p$  «полевой» и  $Z_b$  «базовой» станций разбиваются на фрагменты  $Z_p^i$  и  $Z_b^i$  длиной по 2 минуты с перекрытием соседних фрагментов на 75%;
2. Для каждой пары фрагментов рассчитываются спектральные плотности мощности (СПМ)  $S_p^i$  и  $S_b^i$ ;
3. Для каждой пары фрагментов выполняется усреднение СПМ методом простого скользящего среднего;
4. Вычисляется медианное значение относительного СПМ от разности логарифмов СПМ  $S_p^i$  и  $S_b^i$  всех фрагментов в выборке.

Такой подход позволяет корректно учитывать изменения в микросейсмическом фоне, что особенно актуально при длительных измерениях, а также отфильтровать возможные короткие локальные искажения микросейсмического фона.

Для каждой пары сейсмостанций было обработано около 30 суток непрерывных широкополосных записей с частотой дискретизации 40 Гц, разбитых на 366 перекрывающихся фрагментов по 2 часа, что соответствует типичной длительности записи в методе МСЗ в полевых исследованиях. Амплитудный спектр, соответствующий отдельному фрагменту записи, включал 712 частот из диапазона от 0,05 Гц до 4 Гц. Медианное значение СПМ для приведено на рис. 2а и рис. 2б.



**Рис. 2а.** Медианное значение отношения спектра. Станции EKR10 и EKR1



**Рис. 2б.** Медианное значение отношения спектра. Станции EKR10 и EKR9

Зависимости среднеквадратического отклонения относительного спектра от частоты представлены на рис. 3а и рис. 3б.

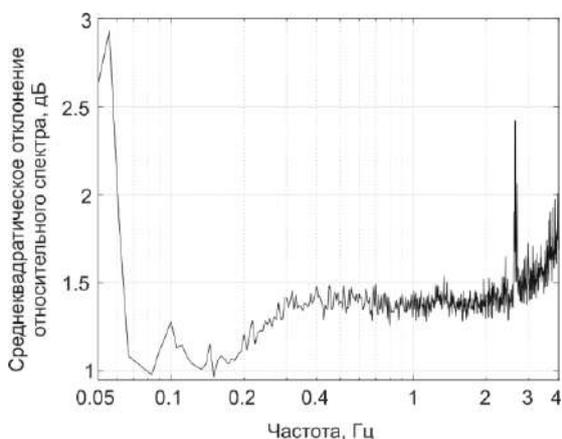
Полученные результаты показывают, что практика использования коротких отрезков сейсмических записей небезосновательна и должна давать хорошую точность результатов и их высокую повторяемость, но только при условии качественной установки сейсмических датчиков и достаточно высокого уровня интенсивности штормовых микросейсм.

Эти показатели в использованных сейсмических данных были практически идеальны. Расстояния между датчиками порядка 10 км ухудшают точность определения относительного спектра, однако не столь значительно.

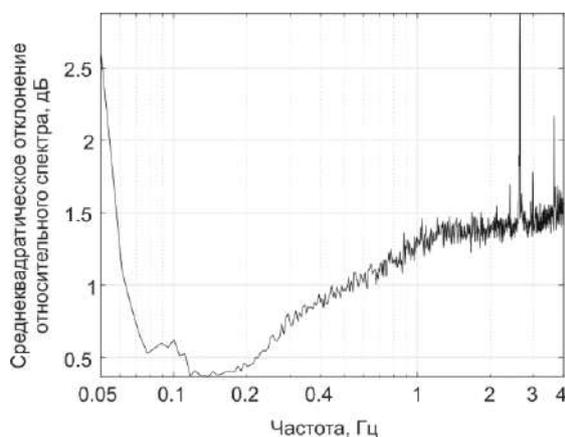
Представляется, что при прочих хороших условиях использование базовых станций, удаленных от точек измерений на 10 – 20 км не окажет серьезных негативного эффекта

на качество результатов. В условиях отсутствия техногенных помех и специализированной стационарной установки сейсмических датчиков появляется возможность использовать наряду с традиционным для ММЗ диапазоном частот 0,1–1 Гц также и более высокие частоты, до 2–3 Гц.

При полевой установке датчиков, эта возможность представляется маловероятной, но может быть оценена отдельно.



**Рис. 3а.** Зависимость среднеквадратического отклонения отношения спектра от частоты. Станции EKR10 и EKR1



**Рис. 3б.** Зависимость среднеквадратического отклонения отношения спектра от частоты. Станции EKR10 и EKR9

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горбатиков А.В., Степанова М. Ю., Кораблев Г. Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008. № 7. С. 66-84.
2. Цуканов А. А., Горбатиков А. В. Метод микросейсмического зондирования: влияние аномальных значений коэффициента Пуассона и оценка величины нелинейных искажений физика земли // Физика Земли. 2015. № 4. С. 94-102.
3. Яновская Т. Б. К теории метода микросейсмического зондирования // Физика Земли, 2017, № 6, с. 18-23.
4. Incorporated Research Institutions for Seismology [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/forms/breqfast-request>. 20.09.2020.
5. Welch P. D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // IEEE Transactions on audio and electroacoustics. 1967. Vol. 15. No. 2. P. 70-73.
6. Cauzzi C., Clinton J. A high-and low-noise model for high-quality strong-motion accelerometer stations // Earthquake Spectra. 2013. Vol. 29. No. 1. P. 85-102.

**ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ЭЛЕКТРОСТРИКЦИИ  
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА  $r_{22}$   
КРИСТАЛЛОВ КЛАССА  $3m$**

**М. С. Петрова<sup>1</sup>, И. С. Долгополов<sup>1</sup>, А. В. Сюй<sup>1,2</sup>, Н. Н. Прокопив<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

e-mail: [marina-1-p@mail.ru](mailto:marina-1-p@mail.ru)

*В данной статье предложен способ определения электрооптического коэффициента  $r_{22}$  кристаллов класса  $3m$  коноскопическим методом с учётом влияния эффекта электрострикции.*

В настоящий момент определение электрооптических коэффициентов кристаллов класса  $3m$  основано на измерении разности фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами при приложении электрического напряжения к граням кристалла [1].

Известны два основных метода определения электрооптических коэффициентов электрооптического кристалла: интерферометрический (интерферометр Майкельсона, Маха-Цендера, Фабри-Перо [2, 3]) и поляризационный (метод Сенармона) [4, 5].

Оба метода достаточно эффективны, но есть проблема в высокой погрешности определения электрооптических коэффициентов электрооптического кристалла за счет недостаточной точности ориентации кристаллофизических осей электрооптического кристалла по отношению к прикладываемому электрическому напряжению и направлению распространения излучения в устройстве при определении набега фаз. Кроме того, при измерении электрооптических коэффициентов не учитывается влияние эффекта электрострикции, которое при больших значениях электрического напряжения достаточно велико.

В указанных выше методах разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами приобретает при прохождении излучения через электрооптический кристалл и определяется формулой (1).

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n_0^3 r_{22} U l}{\lambda d}, \quad (1)$$

где  $l$  – длина кристалла вдоль распространения излучения,  $\lambda$  – длина волны излучения,  $\Delta\phi$  – величина двулучепреломления, создаваемая электрическим полем.

В работе [6] предложен способ обработки коноскопических картин кристаллов интерференционно-поляризационным методом, основанном на коноскопической схеме с помощью методов компьютерного зрения. В данной статье рассматривается повышение точности определения электрооптических коэффициентов данным методом путём расчёта влияния эффекта электрострикции. На основе результатов данного исследования может быть модернизирован программный комплекс прибора для определения электрооптических коэффициентов. При определении электрооптического коэффициента  $r_{22}$  кристалл ниобата лития ориентируется в схеме таким образом, что излучение лазера распространяется вдоль оптической оси  $x(y)$  кристалла. На экране наблюдается коноскопическая картина в виде Мальтийского креста. Электрическое постоянное напряжение от высоковольтного источника подается на  $z$  срез кристалла и производится расчёт электрооптического коэффициента  $r_{22}$  по формуле (2).

$$r_{22} = \frac{\lambda d}{2\pi n_0^3 U l}, \quad (2)$$

где  $U$  – электрическое напряжение;  $l$  – длина кристалла, вдоль которой распространяется излучение;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $d$  – длина кристалла, вдоль которой прикладывается электрическое напряжение.

Эффект электрострикции ведёт к деформации диэлектрических материалов в электрическом поле. Фазовая задержка с учётом изменения длины кристалла определяется формулой (3):

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n_0^3 r_{22} U(l + \Delta l)}{\lambda d}, \quad (3)$$

Подставим  $\Delta l = C_{14} * l$ , где  $C_{14}$  – коэффициент деформации, т.к. электрическое поле прикладывается вдоль оси  $z$ , а изменяется линейный размер вдоль оси  $x(y)$ . В результате получим формулу (4) для определения разности фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n_0^3 r_{22} U(l + C_{14}l)}{\lambda d}, \quad (4)$$

Выразив из данной формулы электрооптический коэффициент, получаем формулу (5), с помощью которой электрооптический коэффициент  $r_{22}$  определяется с учётом влияния эффекта электрострикции.

$$r_{22} = \frac{\Delta\phi \lambda d}{2\pi n_0^3 U l (1 + C_{14})}, \quad (5)$$

Для расчётов возьмём значение коэффициента деформации  $C_{14}=8.5$  из источников [7, 8]. В ходе расчётов электрооптического коэффициента  $r_{22}$  по формуле (5) с использованием экспериментальных значений было получено значение  $r_{22}$  с учётом электрострикции, равное 6,2 пм. Значение  $r_{22}$  без учёта электрострикции по стандартной формуле равно 6,46 пм.

Таким образом, погрешность от влияния электрострикции для коэффициента  $r_{22}$  составляет 4%.

Можно сделать вывод о том, что погрешность от влияния эффекта электрострикции достаточно велика, и ею нельзя пренебрегать при расчётах.

Поэтому формулу (5) можно использовать вместо ранее использовавшейся формулы определения электрооптического коэффициента в программном комплексе прибора для определения электрооптических коэффициентов кристаллов класса 3m коноскопическим методом, описанном в работе [6], что повысит точность определения электрооптических коэффициентов указанным методом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов А. М. Физические основы и формализм оптики и спектроскопии оптических материалов: учеб. пособие. СПб: Университет ИТМО, (2015).
2. Seoung Hun Lee A novel method for measuring continuous dispersion spectrum of electro-optic coefficients of nonlinear materials, Vol. 17, No. 12, 2009. pp. P. 9828-9833, (2009).
3. Ueki Keishi Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, 2017 Conference on // Accurate measurement of electro-optic coefficient of stoichiometric LiNbO3. Singapore. (2009).
4. Lianhua Jin Dispersion measurement of the electro-optic coefficient  $r_{22}$  of the LiNbO3 crystal with Mueller matrix spectropolarimetry // Jpn. J. Appl. Phys., No. 54, P. 078003.1, (2015).
5. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. Москва: Наука, 296 с., (1970).
6. Syuy A.V., Prokopiv N.N., Sidorov N.V., Dolgoplov I.S., Petrova M.S., Antonycheva E.A. Determination of electro-optical coefficients of lithium niobate crystals // Key Engineering Materials Volume 806 KEM, 2019, Pages 175-179. 4th Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials, ASCO-NANOMAT 2019; Vladivostok; Russian Federation. (2019).

7. Andrushchak A. S., Mytsyk B. G., Labal H. P., Yurkevych O. V., Solskii I. M., Kityk A. V. B. Sahraoui Complete sets of elastic constants and photoelastic coefficients of pure and MgO-doped lithium niobate crystals at room temperature // Journal of Applied Physics 106, 073510 (2009)
8. R. T. Smith and F. S. Welsh, J. Temperature Dependence of the Elastic, Piezoelectric, and Dielectric Constants of Lithium Tantalate and Lithium Niobate // Journal of Applied Physics 42, 2219 (1971).

УДК 550.344(571.61)

## ПАРАМЕТРЫ ЗАТУХАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В РАЙОНЕ БУРЕЙСКОЙ ГЭС

**В. В. Пупатенко**

Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск  
e-mail: [pvv2.dv@gmail.com](mailto:pvv2.dv@gmail.com)

*Затухание сейсмических колебаний – один из основных процессов, особенности которого необходимо учитывать при моделировании распространения сейсмических колебаний в среде и при изучении всего спектра связанных с этим проблем. В работе представлены результаты расчёта сейсмической добротности и частотного параметра – количественных характеристик затухания сейсмических волн – в литосфере Буреинского массива в районе Бурейского гидроузла. Выделены пространственные вариации значений параметров затухания сейсмических волн.*

Затухание сейсмических колебаний – один из основных процессов, влияющих на распространение сейсмических волн в среде. С затуханием, наряду с инженерно-геологическими условиями, связана неравномерность наблюдаемой интенсивности макросейсмических проявлений в разных населённых пунктах. Сведения о затухании сейсмических колебаний входят в модель распространения сейсмических колебаний в среде и используются в различных расчётах, например, при оценке сейсмической опасности и при определении очаговых параметров землетрясений.

В настоящей работе выполнены измерения параметров затухания сейсмических волн в литосфере Буреинского массива в районе Бурейского гидроузла. Выбор объекта исследования не случаен. Предыдущие исследования показали, что под влиянием виброизлучения агрегатов Бурейской ГЭС происходит изменение физических свойств геологической среды, выражающееся в существенном искажении спектрального состава микросейсмических колебаний и записей землетрясений [1]. Реальные причины наблюдаемых при этом резонансных эффектов остаются неисследованными, но они могут быть причиной и источником существенной дополнительной сейсмической опасности для прилегающих территорий и самой ГЭС. Исследования затухания сейсмических волн необходимы для построения модели воздействия Бурейской ГЭС на геофизическую среду и оценки дополнительной сейсмической опасности, которую это воздействие, предположительно, может вызывать.

Сейсмическая добротность  $Q$  – это основной параметр, который количественно характеризует затухание сейсмических волн. Это безразмерная величина, которая может быть получена напрямую из измерений. Сейсмическая добротность зависит от частоты колебаний:

$$Q(f) = Q_0 \cdot (f/f_0)^n,$$

где  $f$  – частота колебаний;  $Q(f)$  – добротность среды по коде;  $Q_0$  – добротность на частоте  $f_0$  (обычно 1 Гц);  $n$  – частотный параметр, обычно близкий к единице.

Для измерения добротности в работе использованы записи коды S-волн локальных землетрясений. Расчёт базируется на модели однократного рассеяния [2], которая представляет кода-волны как суперпозицию однократных отражений объёмных волн от расположенных случайным образом неоднородностей. Амплитуда колебаний уменьшается со временем из-за геометрического расхождения и потери энергии [2]:

$$A(f, t) = W(f) \cdot t^{-1} \cdot \exp\left[\frac{-\pi \cdot f \cdot t}{Q(f)}\right],$$

где  $W(f)$  – функция источника;  $t$  – время относительно времени в очаге землетрясения. После логарифмирования получается выражение, из которого уже непосредственно определяется значение  $Q$ , при заданном значении  $f$ :

$$\ln[A(f, t) \cdot t] = \ln[W(f)] - \frac{\pi \cdot f \cdot t}{Q(f)}.$$

В качестве исходных данных использована 931 запись 293 землетрясений, произошедших в 2011-2017 гг. на расстояниях не более 300 км от сейсмических станций локальной сейсмологической сети Бурейской ГЭС. Использовалась вертикальная компонента сейсмических записей и длина окна коды 20 с. Полученные значения добротности показаны на рис. 1 вместе с аппроксимацией зависимости  $Q(f)$  степенной функцией. В легенде указаны числовые значения с 95%-ми ошибками определения параметров.

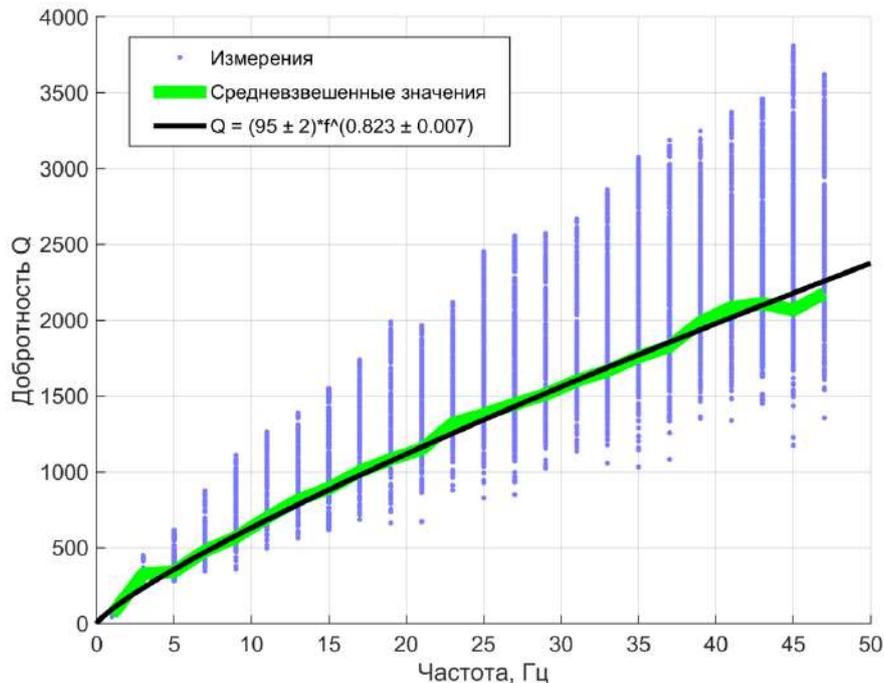


Рис. 1. Зависимость сейсмической добротности  $Q$  от частоты

Полученные значения добротности и частотного параметра ( $Q = (95 \pm 2) \cdot f^{0,823 \pm 0,007}$ ) являются типичными для многих тектонически активных регионов, например, для Байкальской рифтовой системы [3] ( $Q = (105 \pm 9) \cdot f^{0,90 \pm 0,06}$ ) или для региона Кач в Индии [4] ( $Q = (148 \pm 3) \cdot f^{1,01 \pm 0,02}$ ). Такие низкие значения добротности свидетельствуют о высоком сейсмическом потенциале исследуемой территории.

Кроме общих, усреднённых оценок сейсмической добротности были выделены пространственные вариации параметров затухания сейсмических волн. В диапазоне азимутов

70-90° сейсмическая добротность существенно, до 10% ниже, чем в остальных направлениях (рис. 2). В более раннем исследовании, в котором использовался существенно меньший объём исходного материала, указанные вариации на статистически значимом уровне выявлены не были [5].



**Рис. 2.** Полярная диаграмма азимутальных вариаций добротности. Пунктиром показаны границы 95%-го доверительного интервала

*Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТиГ ДВО РАН и при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных - кандидатов наук (№ МК-306.2020.5).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Трофименко С. В. и др. Динамика геосреды по спектральной плотности мощности микросейсм до и после землетрясений // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 5. С. 20-28.
2. Aki K., Chouet B. Origin of the coda waves: source, attenuation and scattering effects // Journal of Geophysical Research. 1975. no. 80. P. 3322-3342.
3. Добрынина А. А., Чечельницкий В. В., Саньков В. А. Сейсмическая добротность литосферы юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика. 2011. № 5. С. 712-724.
4. Sharma B., Gupta A. K., Devi D. K., Kumar D., Teotia S. S., Rastogi B. K. Attenuation of High-Frequency Seismic Waves in Kachchh Region, Gujarat, India. Bulletin of the Seismological Society of America. 2008. vol. 98. no 5. P. 2325-2340.
5. Пупатенко В. В., Рябинкин К. С. Затухание сейсмических колебаний в районе Бурейской ГЭС и его связь с резонансными эффектами // Успехи современного естествознания. 2018. № 10. С.108-113.

## ИЗУЧЕНИЕ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ КУРСКОГО РАЗЛОМА И ПРЕОБРАЖЕНОВСКОГО ГРАБЕНА МЕТОДОМ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПО ПРОФИЛЮ БИДЖАН-НОВОТРОИЦКОЕ

**К. С. Рябинкин, В. В. Пупатенко, А. К. Бронников**

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск  
e-mail: [kostya-rowan@mail.ru](mailto:kostya-rowan@mail.ru)

*Представлены результаты применения метода микросейсмического зондирования для исследования глубинного строения земной коры в разломных зонах на примере Курского разлома. построены и интерпретированы разрезы относительных скоростей поперечных волн на глубину до 9-12 км. Курский разлом прослеживается только, как граница грабена и не выражен в скоростном разрезе глубже 5 км. Границы пересекаемого профилем Преображеновского грабена отчётливо отображаются на разрезе. Полученный разрез согласуется с данными, полученными ранее по результатам магнитотеллурических зондирований.*

Открытие штормовых (низкочастотных) микросейсм относится к концу 19 века. В середине 20 века насчитывалось более 600 основных работ, посвящённых их изучению, были найдены физические механизмы их возникновения и разработаны соответствующие математические модели.

Связь микросейсмического поля с глубинным строением Земли отмечалась ещё в начале XX века Б.Б. Голицыным.

Во второй половине XX века эта связь была надёжно подтверждена многочисленными исследованиями, проведёнными в разных регионах Земли. Однако из-за трудностей обработки сейсмических записей и невозможности проведения формализованного анализа больших объёмов данных методы пассивной сейсморазведки стали появляться и активно использоваться только в 1990 х и 2000-х гг.

В современных методах пассивной сейсморазведки микросейсм (обычно штормовые) являются зондирующим сигналом, а измеряемыми параметрами служат их фазово-частотные и амплитудно-частотные характеристики.

Помимо наиболее широко применяемых фазовых методов пассивной сейсморазведки, созданы и используются методы амплитудные, в первую очередь, метод микросейсмического зондирования (МСЗ) [1, 2].

Метод МСЗ – перспективный и во многих случаях единственный возможный метод пассивной сейсморазведки – всё ещё используется редко. С его помощью сейчас изучаются в основном только вулканы и трубки взрыва, как объекты с глубинными «корнями» [3, 4], хотя его возможности позволяют изучать также строение разломных зон и даже искать скрытые разломы.

Цель настоящей работы – изучение строения Курского разлома и Преображеновского грабена методом МСЗ по профилю Биджан-Новотроицкое.

Объектом проведения полевых исследований стал участок Курского разлома, прилегающий к Преображеновскому грабену на юге ЕАО в пределах Среднеамурского осадочного бассейна. Курский разлом относится к наиболее сейсмически активной северо-западной части системы разломов Тан Лу [5], с ним связаны многие сильные землетрясения на территории Приамурья [6]. Полевые работы в районе Курского разлома проводились в октябре 2019 г. по профилю с. Биджан – с. Преображеновка – с. Новотроицкое

(рис. 1). Использовались широкополосные сейсмометры REFTEK 151-120 и регистраторы REFTEK 130-01.

На рис. 2 приведён полученный сейсмический разрез. В соответствии с [5], разрез пересекает Курский разлом в районе 10-12 км, а также ветвь Тайменского разлома около 30 км профиля.

На рис. 2 отчётливо выделяются зоны низких скоростей, уходящие на глубину до 3-4 км. По всей видимости, этим зонам соответствует Преображенский грабен, хотя на структурно-кинематических схемах его основная часть изображена западнее [7]. Курский разлом является юго-восточной (южной на разрезе) границей грабена.

Полученный разрез не противоречит сбросовой кинематике данного участка разлома и показывает, что:

1. Данные о мощности грабенов и их пространственном положении, как минимум, противоречивы; полученные глубины в 2-3 раза превышают ранее картированные.

2. Курский разлом прослеживается только, как граница грабена и не выражен в скоростном разрезе на глубинах 5-12 км (а, вероятно, и глубже).

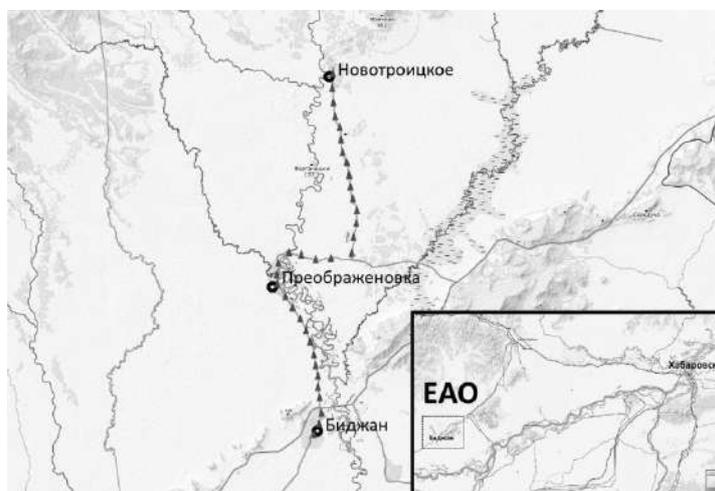


Рис. 1. Положение точек зондирований (треугольники)

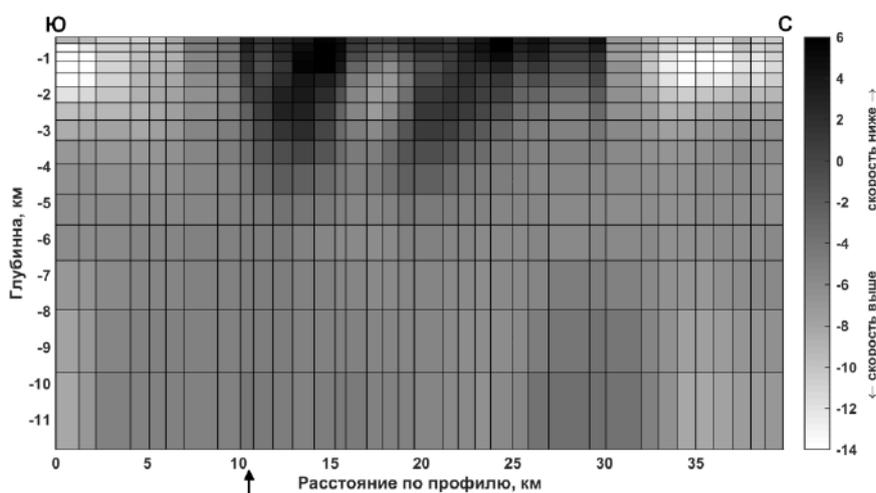


Рис. 2. Сейсмический разрез относительных скоростей поперечных волн в районе Курского разлома

Более широкое внедрение метода МСЗ в практику геофизических исследований позволит получить дополнительные независимые и надёжные данные о скоростном строении первых 10-12 км земной коры, тем самым существенно дополнить обычный комплекс исследований.

Применительно к Среднеамурскому осадочному бассейну, метод МСЗ может быть полезен при поиске углеводородов, как недорогой и надёжный способ определения перспективных мест для более подробных комплексных геофизических исследований.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 16-17-00015.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горбатиков А. В., Степанова М. Ю., Кораблев Г. Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008. № 7. С. 66-84.
2. Горбатиков А. В., Цуканов А. А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. № 4. С. 96-112.
3. Кугаенко Ю. А., Салтыков В. А., Горбатиков А. В., Степанова М. Ю. Особенности глубинного строения зоны трещинных Толбачинских извержений по комплексу геолого-геофизических данных // Физика Земли. 2018. № 3. С. 60-83.
4. Рогожин Е. А., Горбатиков А. В., Харазова Ю. В., Степанова М. Ю., Николаев А. В. Особенности глубинного строения и геологической активности горы Эльбрус и участка ущелья Эльбрус–Тырныауз по комплексу геолого-геофизических данных // Доклады РАН. 2016. Т. 471. № 3. С. 350-353.
5. Забродин В. Ю., Рыбас О. В., Гильманова Г. З. Разломная тектоника материковой части Дальнего Востока России // Владивосток: Дальнаука, 2015. 132 с.
6. Сафонов Д. А. Сейсмическая активность Приамурья и Приморья // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 2. С. 104-115.
7. Уткин В. П. Сдвиговый структурный парагенезис и его роль в континентальном рифтогенезе восточной окраины Азии // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 3. С. 21-43.

УДК 537.6

## ПЕТРОМАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРОД ПОДВОДНОЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ГРУППЫ СОФУ (ИДЗУ-БОНИНСКАЯ ОСТРОВНАЯ ДУГА)

**М. С. Трусенко<sup>1,2</sup>, А. Н. Диденко<sup>2,1</sup>**

<sup>1</sup>Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

<sup>2</sup>Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск

e-mail: [mary\\_rochester@mail.ru](mailto:mary_rochester@mail.ru)

*С целью интерпретации результатов исследования аномального магнитного поля подводных вулканов Идзу-Бонинской островной дуги проведено комплексное изучение драгированных образцов, выполнен анализ естественных магнитных параметров и петромагнитных свойств горных пород, получена информация об их основных ферромагнитных носителях и природе намагниченности.*

В настоящее время исследование природы магнитного поля наземных и подводных вулканов актуально при изучении зоны перехода Тихого океана. Полученная информация позволяет понять эволюцию и строение вулканов. С помощью методов магнетизма горных пород можно получить намагниченность, содержащуюся в продуктах извержения вулканов, а также узнать о сущности её природы. С целью интерпретации результатов исследования аномального магнитного поля подводных вулканов Идзу-Бонинской островной дуги проведено комплексное изучение драгированных образцов, получена информация о намагниченности в образцах и её природе.

Подводная вулканическая группа Софу представляет собой хребет, протягивающийся от острова Хонсю до Бонинских островов. Идзу-Бонинская островная дуга расположена в южной группе северного звена островной гряды Нампо. Извержений в историческое время в районе исследованной подводной вулканической группы не отмечалось, однако известен ряд как подводных, так и наземных извержений в непосредственной близости от неё. Ближайшим к изученной вулканической группе Софу подводным вулканом является Рико-де-Оро, расположенный в 46 км к северо-западу от скалы Софу, извержения которого известны в 1672, 1872 и 1901 годах [1].

Работы по изучению аномального магнитного поля сопровождались измерением у небольшого количества образцов магнитной восприимчивости. Для количественной интерпретации результатов необходимы кондиционные сведения о петромагнитных свойствах горных пород. Для этого были проведены комплексные петро-геохимические и петромагнитные исследования продуктов извержения вулканов. Были изучены 23 образца пород продуктов извержения Идзу-Бонинской островной дуги. Исследования включали измерение и анализ ряда стандартных магнитных характеристик [2].

Важнейшую роль в исследовании играют естественная остаточная намагниченность, имеющая обозначение  $J_n$  и индуктивная намагниченность:

$$J_i = \kappa H, \quad (1)$$

где  $\kappa$  – начальная магнитная восприимчивость, а  $H$  – напряжённость поля. В магнетизме горных пород большая роль отводится отношению естественной остаточной намагниченности к индуктивной намагниченности  $J_n/J_i$ , которое называется отношением Кенигсбергера или фактором  $Q_n$ :

$$Q_n = J_n/(\kappa H). \quad (2)$$

Для изучения состава магнитных минералов в породах проводился термомагнитный анализ: исследовались зависимости  $\kappa - T^\circ$ , представленные на рис. 1.

Величины безнагревных магнитных параметров данной коллекции мало отличаются от аналогичных характеристик большинства базальтов земной литосферы, так и океанских, так и материковых, что предполагает, в общем, единые условия кристаллизации ферромагнитных фракций, присутствующих в них.

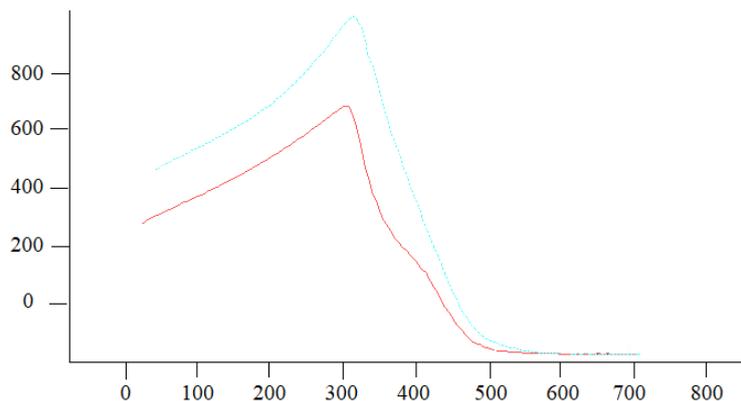
Корреляционная зависимость между магнитной восприимчивостью и намагниченностью насыщения (в первую очередь концентрация ферромагнетика в базальтах), характеризующая в определенной мере единые условия образования титаномагнетитов в магме, Отношения Кенигсбергера в большинстве случаев больше 1, что предполагает преобладание остаточной намагниченности над индуктивной (табл.).

Однако встречаются образцы, у которых величина  $Q_n$  меньше близка к единице или ниже. Величины остальных магнитных характеристик в допустимых нормах, то есть обычны для земной литосферы.

Петромагнитные характеристики продуктов извержения

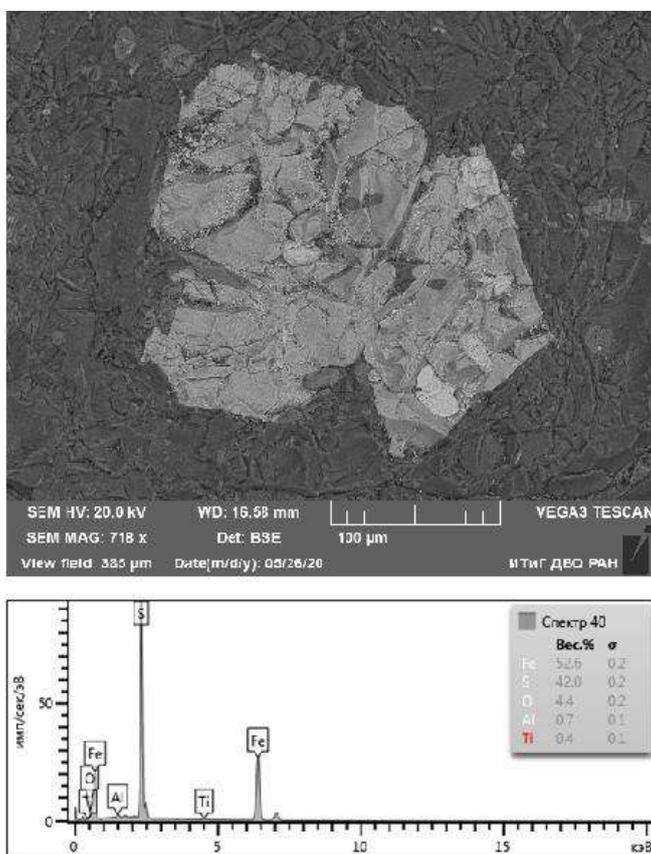
N	$J_n$ A/m	$I_s$ A/m	$I_{rs}$ A/m	$I_{rs}/I_s$	$H_c$ мТл	$H_{cr}$ мТл	$H_{cr}/H_c$	K	K	$Q_n$
B1_40	5,58E+00	2,19E+00	5,46E-01	0,25	232	1337	5,77	1,01E-04	1,58E-02	1,76E+00
B1_41_4_1	2,11E+00	2,92E+00	2,99E-01	0,1	69	282	4,09	1,40E-04	3,23E-02	3,27E-01
B1_41_5_2	1,27E+00	3,91E+00	3,25E-01	0,08	57	157	2,73	7,88E-05	4,00E-02	1,58E-01
B1_41_6_3	3,39E+00	5,20E+00	9,16E-01	0,18	177	350	1,98	8,00E-05	3,12E-02	5,42E-01
B1_50_1	1,03E-02	6,67E-02	1,22E-03	0,02	23	180	7,67	6,22E-06	3,89E-04	1,33E-01
B1_50_2	5,35E-03	6,34E-02	1,25E-03	0,02	17	17	1	4,21E-06	3,22E-04	8,30E-02
B1_50_3	6,09E-03	7,88E-02	1,23E-03	0,02	17	147	8,67	1,64E-05	5,02E-04	6,06E-02
B1_50_4	4,95E-03	4,78E-02	7,42E-04	0,02	28	28	1	1,28E-05	4,24E-04	5,84E-02
B1_52_1	2,60E+01	1,45E+00	5,20E-01	0,36	348	546	1,57	6,36E-05	1,00E-02	1,29E+01
B1_52_2	9,33E+00	6,58E-01	1,40E-01	0,21	418	1259	3,01	4,27E-05	6,01E-03	7,76E+00
B1_52_3	2,06E+01	1,42E+00	4,52E-01	0,32	398	716	1,8	8,34E-05	7,14E-03	1,44E+01
B1_52_4	1,06E+01	1,02E+00	2,98E-01	0,29	458	964	2,1	6,58E-05	5,79E-03	9,15E+00
B1_52_5	1,17E+01	9,85E-01	2,92E-01	0,3	393	393	1	5,37E-05	5,45E-03	1,07E+01
B1_52_7	3,09E+01	1,46E+00	5,29E-01	0,36	387	630	1,63	7,02E-05	7,91E-03	1,95E+01
B1_54_1_1	3,64E+01	1,96E+00	6,28E-01	0,32	204	283	1,39	8,62E-05	1,03E-02	1,78E+01
B1_54_2_2	1,01E+01	1,23E+00	2,29E-01	0,19	262	1130	4,32	6,21E-05	9,29E-03	5,43E+00
B1_58_4_1	5,65E+00	2,31E+00	2,17E-01	0,09	71	71	1	9,86E-05	3,17E-02	8,90E-01
B1_58_5_2	5,13E-01	2,56E+00	7,16E-02	0,03	21	134	6,52	1,22E-04	3,28E-02	7,83E-02
B1_58_6_3	3,69E+00	2,31E+00	1,79E-01	0,08	57	279	4,85	5,36E-05	1,21E-02	1,53E+00
B1_58_7_4	2,39E+00	2,41E+00	1,67E-01	0,07	55	486	8,9	1,10E-04	2,66E-02	4,49E-01
B1_60_1	1,03E-01	4,34E-01	2,42E-02	0,06	51	51	1	1,38E-05	4,46E-03	1,15E-01
B1_60_2	2,32E+00	5,34E+00	1,47E-01	0,03	28	155	5,5	8,19E-05	6,40E-02	1,81E-01
B1_60_3	4,68E-01	6,60E+00	5,73E-01	0,09	85	85	1	1,61E-04	6,60E-02	3,55E-02

Примечание: N – номер образца,  $J_n$  (NRM) – естественная остаточная намагниченность,  $Q_n$  – фактор Кенигсбергера,  $I_s$  – величина намагниченности насыщения,  $I_{rs}$  – остаточная намагниченность насыщения и их отношения –  $I_{rs}/I_s$ ,  $H_c$  – коэрцитивная сила,  $H_{cr}$  – остаточная коэрцитивная сила и их отношения –  $H_{cr}/H_c$ ,  $\kappa$  (каппа) – магнитная восприимчивость, k – кучность.



**Рис. 1.** Термомангнитный анализ

Изучение на электронном микроскопе и микрозондовый анализ составов пород извержений проведены на базе ИТиГ ДВО РАН. Полученные данные представлены на рис. 2.



**Рис. 2.** Данные микрозондового анализа базальтов извержения

Графики распределения практически всех измеренных и рассчитанных параметров имеют логнормальный вид с размахом значений более чем на полтора порядка. Величина  $I_{rs}/I_s$ , в среднем более 0,1 (таблица), говорит о том, что мы имеем дело, в основном, с однодоменными и псевдооднодоменными зернами титаномагнетита. Об этом свидетельствует и расположение фигуративных точек анализов на диаграмме  $H_{cr}/H_c - I_{rs}/I_s$  [3]. Корреляционная зависимость между начальной магнитной восприимчивостью и намагничен-

ностью насыщения, характеризующая в определенной мере единый источник образования титаномагнетитов в магме, очень сильна – коэффициент корреляции Пирсона[4] равен +0,94, что свойственно базальтам современных океанов и островных дуг. Корреляционные зависимости между другими петромагнитными характеристиками существенно хуже, но все же некоторые из них демонстрируют положительную или отрицательную связь на уровне 99% вероятности: 1) коэффициент корреляции Пирсона для  $Q_n$ - $J_n$  и  $Q_n$ - $\chi$  равен +0,95 -0,39, соответственно; 2) кроме упомянутой выше корреляционной связи между  $\chi$  и  $I_s$ , последняя имеет положительную (+0,38) связь с  $Q_n$ ; 3) значимые корреляционные связи имеет параметр  $I_{rs}/I_s$  - отрицательные с  $\chi$  (-0,40) и  $I_s$  (-0,32) и положительную с  $Q_n$  (+0,89); 4) коэрцитивная сила имеет значимые корреляционные связи - отрицательные с  $\chi$  (-0,41) и  $I_s$  (-0,36) и положительную с  $Q_n$  (+0,81) и  $I_{rs}/I_s$  (0,92). Наличие таких корреляционных связей между петромагнитными параметрами, зависящими в разной степени от концентрационных и структурных особенностей минералов-носителей магнетизма, свидетельствует об однородности исследованного материала, хотя были опробованы различные структуры. В настоящее время проводятся термомагнитный и микрозондовый анализы для выяснения составов магнитных минералов. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00015).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев Г. М. Глубоководные океанические желоба и их фауна. М., 1989 // Архивная копия от 14 марта 2017 на Wayback Machine.
2. Печерский Д. М., Диденко А. Н. Палеозойский океан: петромагнитная и палеомагнитная информация о его литосфере. М.: ОИФЗ РАН, 1995. 298 с.
3. Kuno H. Petrology of Alaid Volcano, North Kurile. Japanese Journal of Geology and Geography. 1935. Vol. 12. 153-162.
4. Гржибовский А. М. Корреляционный анализ // Экология человека. 2008. № 9. С. 50-60.

УДК 534.7:616.1

## БЕСПРОВОДНАЯ СИСТЕМА ХОЛТЕРОВСКОГО МОНИТОРИРОВАНИЯ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ШУМОВ И ТОНОВ СЕРДЦА

**В. Ф. Ульянычева<sup>1</sup>, Н. В. Ульянычев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Амурский государственный университет, г. Благовещенск

<sup>2</sup>Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания, г. Благовещенск  
e-mail: [nikolaj287@gmail.com](mailto:nikolaj287@gmail.com)

*На основе исследования работы холтеровских систем суточного мониторинга разработана беспроводная модель долговременного мониторинга дыхательных шумов и тонов сердца.*

В современной врачебной практике для диагностики различных заболеваний используются разовые или трех-четырёх разовые диагностические процедуры (определение АД, снятие ЭКГ, пальпация и др.). Результаты такой диагностики будут лишь одним значением из тысячи возможных за долговременный период (24, 48, 72 часа).

Технологический прогресс в области электроники привел в начале 60-х годов к созданию относительно малогабаритных систем “холтеровского” мониторирования ЭКГ. В эти же годы в практику клинико-физиологических работ вошло и инвазивное, а затем и неинвазивное суточное мониторирование АД.

Холтеровское мониторирование представляет собой непрерывную регистрацию электрокардиограммы в течение 24 часов и более (48, 72 часа). Запись ЭКГ осуществляется при помощи специального портативного аппарата — рекордера, который пациент носит с собой (на ремне через плечо или на поясе). Во время исследования пациент ведет свой обычный образ жизни (работает, совершает прогулки и т. п.), отмечая в специальном дневнике время и обстоятельства возникновения неприятных симптомов со стороны сердца.

На сегодняшний день существует огромное число различных холтеровских рекордеров. У всех есть свои особенности, но можно выделить правила построения таких рекордеров:

- наличие датчиков, которые крепятся в определенных точках тела и соединяются проводами с основным модулем;
- модуль в котором производится считывание информации с датчиков и запись данных в встроенную память или на съемные накопители (CF карты памяти);
- возможность подключения к компьютеру с предустановленным специальным ПО, с целью анализа собранных данных.

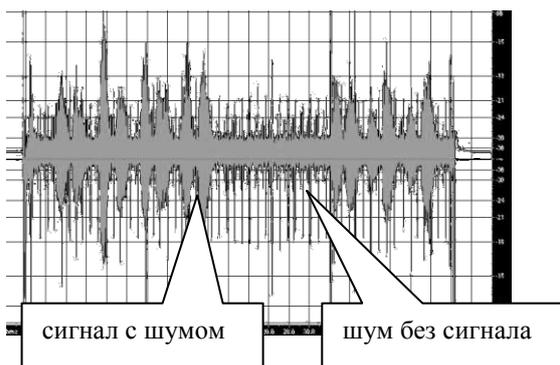
Появление суточного мониторирования ЭКГ и АД позволило намного улучшить качество диагностики различных сердечно-сосудистых заболеваний.

Но возможности долговременной диагностики не ограничены только сердечнососудистыми заболеваниями, подобные методы возможно применять и для диагностики заболеваний органов дыхания. Основным отличием является регистрируемый сигнал, а именно дыхательные шумы.

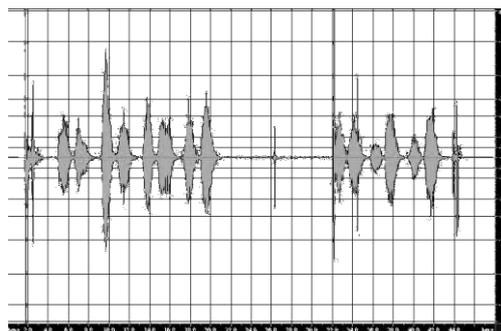
Для регистрации дыхательных шумов, был разработан «компьютерный фонендоскоп», который имеет возможность оцифровывать, фильтровать и записывать дыхательные шумы на ПК.

Самым простым и удачным решением в создании устройства способного детектировать слабые шумы дыхания является использование электретного микрофона и высокочувствительного предусилителя с минимальными шумами. Но так как устройство ориентировано на усиление очень слабых шумов (шумы дыхания и сердцебиения), то даже слабые электромагнитные поля могут вызвать значительные паразитные шумы. Источником таких полей, могут быть любая медицинская аппаратура, сотовые телефоны, беспроводные сети, а так же сам компьютер, к которому непосредственно подключается данное устройство, и на котором происходит запись полученного сигнала. От качества получаемого сигнала будет зависеть непосредственно результат диагностики пациента и, следовательно, его здоровье, поэтому необходимо предъявлять для данного устройства повышенные требования к чистоте усиленного сигнала.

Для того чтобы отфильтровать сигнал и выделить только дыхательные шумы была использована методика фильтрации на основе задержки дыхания. Эта методика заключается в том, что осуществляется запись только акустических помех (во время диагностики пациент делает задержку дыхания на несколько секунд), затем с использованием прямого преобразования Фурье получаем спектр участка без дыхания, аналогично получаем спектр исходного сигнала. Из спектра исходного сигнала вычитаем спектр участка сигнала, где пациент задерживал дыхание, полученный спектр с использованием обратного преобразования Фурье получим интересующий нас сигнал (рис. 2). Данный фильтр очень эффективен для борьбы с помехами в слабых сигналах, сопоставимых с возникающими шумами.



**Рис. 1.** Сигнал с помехами



**Рис. 2.** Сигнал после фильтрации

Необходимо отметить, что исходный сигнал содержит также шум, связанный с сердечной деятельностью (тоны сердца). Поэтому разрабатываемое устройство может одновременно использоваться для непрерывного контроля сердечных тонов.

Для удобства проведения длительного мониторинга с использованием «компьютерного фонендоскопа», была разработана модель беспроводной версии устройства. Результатом будет система, состоящая из двух компонент:

- датчик, представляющий собой миниатюрный блок, содержащий микрофон, схему оцифровки и передачи информации по радиоканалу;
- блок обработки, предназначенный для приема, обработки, сохранения информации и передачи её на ПК.

В качестве радиоканала была выбрана технология передачи информации bluetooth, выбор этой технологии существенно упрощает задачу разработки блока обработки, т. к. при установке специального ПО на КПК, телефон или смартфон любое из этих устройств можно использовать как блок для сохранения полученных данных, а при необходимости возможно использование для обработки, анализа и передачи информации через интернет в диагностический центр.

На рис. 3 представлено исследуемое устройство (рисунок слева) и место крепления устройства на теле человека (рис. б). Составляющие устройства:

1. Микрофон.
2. АЦП.
3. Передатчик, использующий технологию Bluetooth.
4. Встроенный в передатчик подзаряжаемый блок питания.



*а*



*б*

**Рис. 3.** Исследуемое устройство (а) и место крепления устройства на теле человека (б)

Программный продукт разрабатывается в двух версиях:

- для лечебных и диагностических центров,
- для частного использования в домашних условиях.

Редакция для лечебных и диагностических центров будет более сложной и рассчитанной на специалистов с медицинским образованием.

Программа будет идти в комплексе с устройством, предоставляемом в двух вариантах различной комплектации.

В первой комплектации будет идти датчик и ноутбук со встроенным и полностью настроенным программным обеспечением, вторая комплектация содержит датчик и диск с программным обеспечением для самостоятельной установки и настройки.

Данное программное обеспечение сможет проводить запись оцифрованного звукового сигнала, одновременно с записью в главном окне программы будет строиться зависимость амплитуды сигнала от времени, данное построение позволит наглядно и в реальном времени наблюдать за состоянием дыхания обследуемого человека.

После проведения обследования в окне программы будет представлена картина дыхания и появится возможность обработки сигнала, а именно фильтрации, построения двух и трех мерной спектрограммы.

Так же имеется возможность сохранения полученной информации в аудио файле, в цифровой подписи которого будет содержаться номер карты обследуемого, фамилия имя отчество, время начала и окончания обследования, а также любая другая информации необходимая для дальнейшего обследования.

Программа будет содержать отдельный модуль для получения информации через Интернет от удаленных пациентов, которые используют редакцию программы для частного использования в домашних условиях.

Редакция для частного использования в домашних условиях будет с простым и интуитивно понятным интерфейсом.

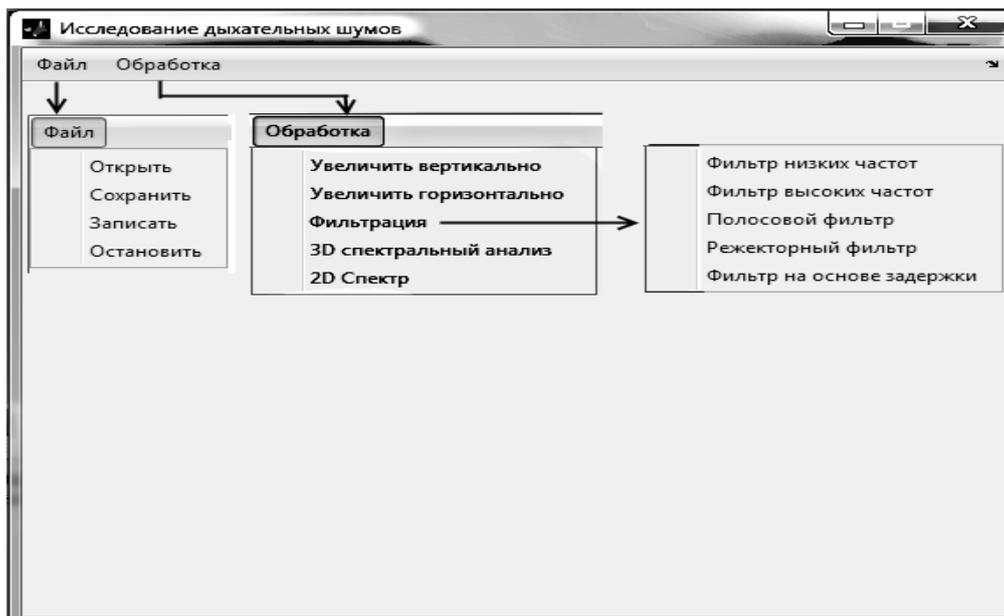
Программа будет идти в комплексе с устройством, предоставляемом в двух вариантах различной комплектации.

В первой комплектации будет идти датчик и блок обработки, в качестве которого будет выступать обычный смартфон, со встроенным и полностью настроенным программным обеспечением.

Вторая комплектация содержит датчик и диск с программным обеспечением для самостоятельной установки и настройки на КПК, коммуникатор или смартфон; основное требование к устройству - это наличие Bluetooth стека и возможность соединения с Интернет через gprs или wifi канал.

Основной набор функций программы - это запись, сохранение, постройка графика дыхания в реальном времени с автоматическим масштабированием, а так же отправка данных через Интернет в диагностический центр в реальном времени или после обследования (рис. 4).

В итоге мы получаем мощный диагностический комплекс, который может применяться не только для стационарного, разового обследования, но и для удаленного долгосрочного мониторинга состояния дыхательной и сердечно-сосудистой систем человека.



*Рис. 4.* Главное окно и меню программы

Главный результат это реализация беспроводной технологии получения информации о тонах сердца и движении воздуха по дыхательным путям, что позволяет осуществлять удаленную комплексную диагностику нарушений сердечной деятельности и бронхиальной проходимости.

Таким образом, предлагается простой и дешевый метод комплексной диагностики нарушений функций сердца и легких, основанный на регистрации тонов сердца и дыхательных шумов с одного высокочувствительного акустического датчика.

Беспроводной характер регистрации позволяет использовать его в любых условиях жизнедеятельности, при экстремальных физических нагрузках, что особенно важно для пожилых людей, а также в критических ситуациях.

Новизна достигается за счет двух патентов на изобретения, патентов на полезную модель, созданных авторами, использованием миниатюрного датчика, bluetooth технологий, сотовой связи и цифровой обработки сигнала тонов сердца и дыхательных шумов.

УДК 539.1

## МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

**А. О. Белозеров, А. И. Мазур**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск.  
e-mail: [aobelozеров@gmail.com](mailto:aobelozеров@gmail.com)

*Разработан алгоритм расчета энергии основного состояния квантовой системы на основе результатов, полученных в ядерной модели оболочек. На примере модельной задачи исследовано влияние параметров метода на точность предсказаний. Алгоритм может быть использован для оценки энергий связанных состояний ядер на основе оболочечных расчетов с реалистичным NN-взаимодействием.*

### Введение

Благодаря своей универсальности и эффективности методы машинного обучения [1] применяются для решения широкого круга задач. В работах [2, 3] эти методы были применены к задачам ядерной физики. Целью данной работы является использование методов машинного обучения для нахождения энергии основного состояния квантовой системы в модельной задаче и определение условий, при которых обучение проходит наилучшим образом.

### Постановка задачи

Рассмотрим радиальное уравнение Шредингера рассеяния квантовой частицы в парциальной волне  $l$ . Приведенная масса  $\mu c^2 = 751$  МэВ.

$$Hu_l(k, r) = Eu_l(k, r),$$

где  $H$  – гамильтониан, являющийся суммой операторов потенциальной и кинетической энергий

$$H = U + T.$$

В качестве модельного потенциала используется потенциал Вудса-Саксона с поверхностными спин-орбитальными силами.

$$U(r) = \frac{U_0}{1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right)} - \frac{(\mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\sigma})U_{ls}}{ra} \frac{\exp\left(\frac{r-R}{a}\right)}{\left(1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right)\right)^2}.$$

Здесь  $U_0 = -30$  МэВ,  $U_{ls} = -10$  МэВ,  $R = 3.08$  фм,  $a = 0.53$  фм;  $(\mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\sigma}) = 2(\mathbf{l} \cdot \mathbf{s}) = j(j+1) - l(l+1) - s(s+1)$ ,  $\mathbf{j} = \mathbf{l} + \mathbf{s}$  – полный момент,  $l$  – орбитальный момент,  $s = \frac{1}{2}$  – спин.  $l$  – орбитальный момент. В нашем случае  $j = 1/2$ ,  $l = 1$ .

В ядерной модели оболочек [4] волновая функция  $u_l(k, r)$  разлагается в ряд по конечному набору осцилляторных функций  $R_{Nl}(r)$  с осцилляторным параметром  $\hbar\Omega$ .

$$u_l(k, r) = \sum_{N=N_0}^{N_{max}} a_{Nl}(k) R_{Nl}(r),$$

где  $N$  – число квантов возбуждения.

Подставляя (4) в (1), получаем систему линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{N'=N_0}^{N_{max}} (H_{NN'}^l - \delta_{NN'} E) a_{N'l}(k) = 0, \quad (N = N_0, N_0 + 2, \dots, N_{max}).$$

В результате решения задачи на собственные значения (5) мы получаем спектр собственных энергий  $E_\lambda$ , минимальная из которых ассоциируется с энергией основного состояния  $E_{gs}$ .

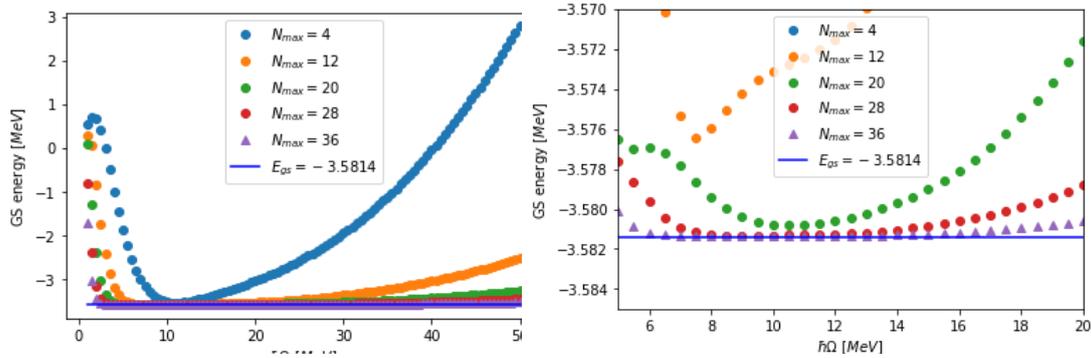


Рис. 1. Данные, используемые при обучении нейросетей

Энергия основного состояния  $E_{gs}$  является функцией параметров  $N_{max}$  и  $\hbar\Omega$ . На рис. 1 (левая панель) представлены результаты оболочечных расчетов  $E_{gs}(\hbar\Omega)$  в разных модельных пространствах  $N_{max} = 4 \div 40$  с шагом по  $\hbar\Omega$  в  $0.5 \text{ МэВ}$ . На правой панели – те же результаты в увеличенном масштабе. Синей горизонтальной линией на рисунке справа обозначено точное значение  $E_{gs}^{exp} = -3.5814 \text{ МэВ}$ , с которым будут сравниваться предсказания нейросетей. Для построения нейросетей будут использоваться пары объект ( $N_{max}, \hbar\Omega$ ) – ответ ( $E_{gs}$ ).

### Структура нейросети и основные параметры машинного обучения

Структурная схема нейросетей, используемых нами, представлена на рис. 2. Входной слой содержит два нейрона, отвечающих набору значений  $N_{max}$  и  $\hbar\Omega$ , один выходной слой и один (или несколько) скрытых слоев, содержащих 8 нейронов.



Рис. 2. Схема нейросети с одним скрытым слоем

Для обучения нейросети данные ( $N_{max}, \hbar\Omega$  и соответствующие  $E_{gs}$ ) разбиваются на две группы. Первая группа (*train*) используется непосредственно для обучения нейросе-

ти, вторая – для ее проверки (*test*). При поступлении сигнала из *train*-группы  $x_i$  на нейрон, он умножается на весовой коэффициент  $\omega_i$ , которые в первой итерации (эпохе) задаются произвольно. Далее все взвешенные сигналы для данного слоя суммируются. Взвешенная сумма  $s$  преобразуется активирующей функцией и затем передается в следующий слой. В нашем случае активирующей функцией является:

$$\sigma(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}}, \quad s = \sum_i \omega_i x_i + b.$$

Построенная таким образом сеть используется для расчетов энергий далее.

Об успешности обучения мы можем судить по функции потерь. В нашем случае была выбрана функция MSE (среднеквадратичное отклонение). Она вычисляется как среднеквадратичное отклонение предсказаний нейросети на тестовом наборе от известных нам значений. В качестве оптимизатора, задачей которого является минимизация функции потерь, выбран Adam [5], наиболее часто применяемый в задачах машинного обучения.

При обучении нейросети, в зависимости от значения функции потерь, оптимизатор меняет весовые коэффициенты нейронов. То, насколько сильно они могут меняться, определяется параметром метода  $l_r$  – скоростью обучения. После изменения весовых коэффициентов, нейросеть снова пытается сделать предсказания, с помощью которых снова вычисляется значение функции потерь. Каждая такая итерация называется эпохой. Отсюда вытекает еще один параметр обучения, количество эпох  $N_{эпох}$ . В данной работе  $N_{эпох} = 1000$ , по примеру работы [2].

### Описание алгоритма

При решении задач методом машинного обучения важную роль играют начальные значения весовых коэффициентов в нейронах. Поэтому, чтобы избежать случайности в предсказаниях, обучается большое (в нашем случае – 400) число нейросетей, различие между которыми заключается лишь в различных начальных весовых коэффициентах. Очевидно, не все построенные нейросети дают корректные предсказания и, следовательно, важно иметь критерии, позволяющие отсеять заведомо неправильно обученные нейросети.

В ядерной модели оболочек таким критерием является локальный вариационный принцип, согласно которому энергия основного состояния  $E_{gs}$  должна уменьшаться с увеличением  $N_{max}$  при фиксированном значении  $\hbar\Omega$ . На основе вариационного принципа происходит фильтрация заведомо неправильно обученных нейросетей. Далее из полученного набора мы отбираем 50 нейросетей с наименьшим MSE. Гистограммы зависимости числа обученных нейросетей (*Count*) от значения предсказанных энергий связанных состояний в большинстве случаев можно аппроксимировать гауссовским распределением. Среднее значение такого распределения можно считать результирующим предсказанием данного алгоритма, а среднеквадратичное отклонение распределения – погрешностью.

При подборе скорости обучения есть риск, что она окажется слишком маленькой или слишком большой. В первом случае обучение будет требовать слишком больших затрат по времени, при этом обучение может привести в локальный минимум, из которого уже не удастся выбраться. Во втором случае будет наблюдаться расходящееся поведение функции потерь; минимум вовсе будет недостижим. Именно по этой причине все чаще применяют затухание скорости обучения. Это значит, что с каждой новой эпохой  $lr$  будет постепенно уменьшаться, позволяя быстро преодолевать локальные минимумы в начале и остаться в глобальном минимуме в конце обучения. При этом, для каждой  $(n + 1)$ -ой эпохи скорость обучения будет вычисляться по формуле

$$lr_{n+1} = \frac{lr_n}{1 + nd},$$

где  $d$  (Decay) – параметр затухания.

Рассмотренный алгоритм реализован с помощью библиотеки *Keras* на языке *Python* [6].

## Результаты расчетов

Результаты, полученные с описанным алгоритмом, представлены на рис. 3, 4. Синие гистограммы на всех рисунках соответствуют значениям, предсказанным всеми 400 нейросетями, оранжевые – нейросетям, удовлетворяющим вариационному принципу; 50 из них, имеющих наименьшее значение функции потерь показаны зелеными гистограммами. В верхней части рисунков приведены исходные значения скорости обучения  $l_r$  и число нейросетей, удовлетворяющих вариационному принципу.

Существенное влияние на процесс обучения играет параметр  $d$ .

При больших значениях  $d = 10^{-4}$  (рис. 3а), скорость обучения затухает настолько быстро, что обучение не проходит до конца. Гистограмму в этом случае нельзя аппроксимировать гауссовским распределением. Более того, вариационный принцип отсеивает практически все построенные нейросети (в нашем случае вариационному принципу удовлетворяют только 26 нейросетей из 400). Оптимальным оказалось значение  $d = 10^{-6}$  (рис. 3б).

В этом случае для 50 нейросетей, удовлетворяющих вариационному принципу и имеющих минимальную функцию потерь, предсказанный результат  $E_{gs}^{pr} = -3.584 \pm 0.030$  МэВ, т.е. точность предсказаний составляет 30 кэВ, а точное значение  $E_{gs}^{exp}$  попадает в интервал.

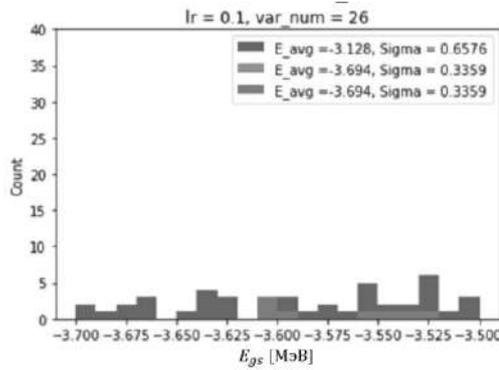


Рис. 3а. Результаты расчетов с  $d = 10^{-4}$

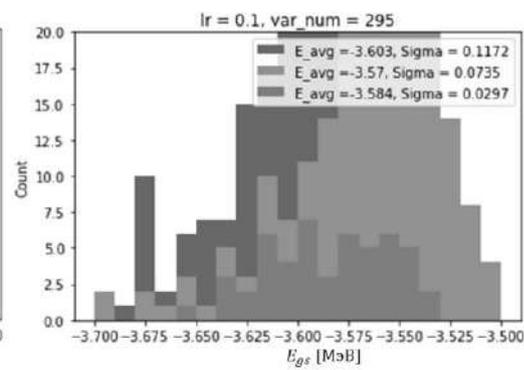


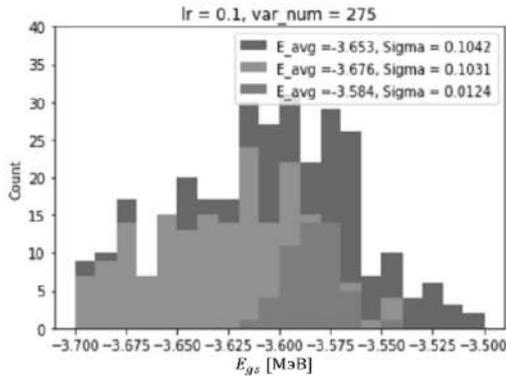
Рис. 3б. Результаты расчетов с  $d = 10^{-6}$

Повысить точность предсказаний можно также с помощью отбора входных данных. Так, если отказаться от данных с  $E_{gs} > 0$  (связанные состояния должны иметь отрицательные энергии) и  $\hbar\Omega < 10$  (в этой области поведение энергии  $E_{gs}(\hbar\Omega)$  в каждом модельном пространстве является нерегулярным), позволяет повысить точность до 12 кэВ.

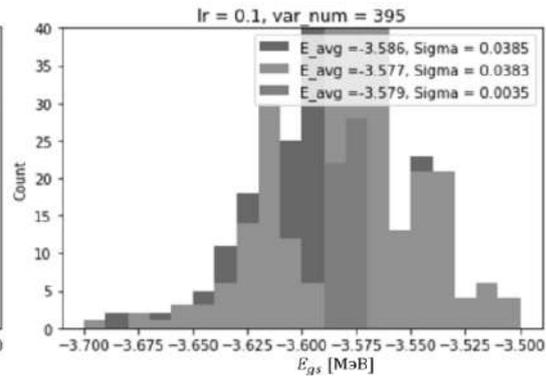
Точное значение  $E_{gs}^{exp}$  при этом снова находится в предсказанном интервале:  $E_{gs}^{pr} = -3.584 \pm 0.012$  МэВ.

Еще более точные предсказания удастся получить, если увеличить число скрытых слоев.

В частности, в расчетах с архитектурой, в которой вместо 1 скрытого слоя используется 3, мы получили  $E_{gs}^{pr} = -3.5790 \pm 0.0035$  МэВ, т.е. погрешность предсказаний уменьшилась до 3,5 кэВ. Но при этом, опять же, точное значение  $E_{gs}^{exp}$  находится внутри предсказанного интервала.



**Рис. 4а.** Результаты расчетов без данных с  $E_{gs} > 0$  и  $\hbar\Omega < 10$



**Рис. 4б.** Результаты расчетов с нейросетями, содержащими 3 скрытых слоя

### Заключение

С помощью библиотеки Keras для языка Python разработан алгоритм расчета энергии основного состояния квантовой системы на основе результатов, полученных в ядерной модели оболочек.

Алгоритм апробирован на модельной задаче, достигнута точность предсказаний в 3.5 кэВ. Точные значения энергии связи во всех случаях находятся в предсказанном интервале.

Исследована зависимость точности предсказаний от параметров метода машинного обучения, в частности от параметра затухания  $d$ .

Показано, что на результаты обучения существенно влияет то, какие входные данные включаются в процесс обучения. Увеличение количества скрытых слоев также улучшает результаты предсказаний.

Разработанный алгоритм может быть использован для оценки энергий связанных состояний путем экстраполяции результатов, полученных в ограниченных модельных пространствах оболочечного подхода, на случай бесконечных модельных пространств. Важным достоинством разработанного алгоритма является возможность оценки погрешности предсказаний.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Müller A. Introduction to Machine Learning with Python. O'Reilly Media, 2016. 285 p.
2. A. M. Shirokov, et. al., N3LO NN interaction adjusted to light nuclei in ad exitu approach, Physics Letters B, Volume 761, 10 October 2016, Pages 87-91
3. Young-Ho Song Neural network for nuclear physics, KISTI meeting, Daejeon, 17.09.2019.
4. Капитонов И. М. Введение в физику ядра и частиц: учебное пособие. М.: Едиториал УРСС, 2002. 384 с.
5. Kingma D., Ba J., Adam: A Method for Stochastic Optimization [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/1412.6980v8> (дата обращения 15.03.2020)
6. Keras: The Python Deep Learning library [Электронный ресурс]. URL : <https://keras.io/>. (дата обращения: 15.09.2020).

## ВКЛАДЫ ОБЪЕМНОГО И ПОВЕРХНОСТНОГО МЕХАНИЗМОВ В ГЕНЕРАЦИЮ ВОЛН ЛЭМБА ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЕЙ

**Е. А. Жуков<sup>1</sup>, В. И. Жукова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

<sup>2</sup>Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск  
e-mail: [e\\_a\\_zhukov@mail.ru](mailto:e_a_zhukov@mail.ru)

*Настоящая работа посвящена механизмам генерации изгибных колебаний магнитных кристаллических пластин при движении доменной границы. Определено соотношение вкладов поверхностных и объемных напряжений, вызванных доменной границей.*

Волны Рэлея-Лэмба представляют интерес не только из-за их возможного влияния на торможение доменной границы (ДГ) при ее движении со скоростью, ниже скорости поперечных звуковых волн. Обмен энергией между продольной и поперечными волнами приводит к заметному отклонению дисперсионных зависимостей мод с ненулевыми номерами от сдвиговых при скоростях, отличных от звуковых. В [1-3] высказывалось предположение о роли этих волн в формировании нелинейной полевой зависимости скорости ДГ на сверхзвуковых скоростях.

Нормальные волны Рэлея - Лэмба высших порядков (волны Лэмба) представляют из себя суперпозицию распространяющихся независимо поперечной  $s_t$  и продольной  $s_l$  звуковых волн в объеме пластины, поэтому их групповые скорости не могут превышать скорость продольных звуковых волн. Фазовые скорости этих мод превышают  $s_t$ , следовательно, их равенство с групповой возможно в диапазоне  $s_t \leq v \leq s_l$ . В этом диапазоне наблюдение торможения ДГ на волнах Лэмба затруднено, так как оно замаскировано более сильным торможением на объемных звуковых волнах.

В настоящем параграфе проведен расчет величин упругих колебаний этих волн, возбуждаемых ДГ *ac*-типа, расположенной в плоскости **yz** и движущейся вдоль **x**. При расчете влияние упругих волн на магнитную систему не учитывалось. За основу были взяты динамические уравнения для изотропной среды, приведенные в [4]

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} - s_l^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} - s_t^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} - (s_l^2 - s_t^2) \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} &= -\frac{(2\delta_1 + \delta_2)}{\rho} \frac{\partial v}{\partial x} \sin(2v); \\ \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} - s_l^2 \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} - s_t^2 \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} - (s_l^2 - s_t^2) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} &= \frac{\delta_8}{\rho} \frac{\partial v}{\partial x} \cos(2v), \end{aligned} \quad (1)$$

в которых учтено движение волн в направлениях **x**, **z**. Здесь  $u_{x,z}$  - упругие смещения,  $\delta_i$  - магнитоупругие константы,  $v$  - угол отклонения антимангнитного вектора от равновесного положения. Смещение по **y** и все производные по этой координате в этом случае отсутствуют. Уравнения получаются учетом магнитоупругого тензора напряжений, вызванного движением ДГ со скоростью  $v_{dw}$ , параметры которого определяются из уравнений [5]

$$\cos v = t \square \left( \frac{x - v_{dw} t}{D_3} \right); \quad \sin v = \frac{1}{c \square \left( \frac{x - v_{dw} t}{D_3} \right)}; \quad \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{D_3 c \square \left( \frac{x - v_{dw} t}{D_3} \right)},$$

где  $D_3$  - параметр ширины движущейся ДГ ( $\sim 100$  нм).

Уравнения (1) дополнялись свободными граничными условиями на поверхностях пластины при  $z = \pm h/2$ , которые в изотропной упругой подсистеме принимают вид

$$\begin{aligned} \rho (s_l^2 - 2s_t^2) \frac{\partial u_x}{\partial x} + s_l^2 \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \Big|_{z=\pm \frac{a}{2}} &= (2\delta_5 + \delta_6) \sin^2(v); \\ 2\rho s_t^2 \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \Big|_{z=\pm \frac{a}{2}} &= -\delta_8 \sin(2v), \end{aligned} \quad (2)$$

Физически процесс генерации волн Рэлея-Лэмба в пластине движущейся ДГ можно разделить на два механизма, соответствующих правым частям уравнений (1) и (2). Первый механизм вызывает деформацию поверхности пластины  $\mathbf{u}_1$  при отражении объемных волн, генерируемых внутри пластины за счет магнитоупругих напряжений, вызываемых ДГ. Второй механизм связан с деформацией свободной поверхности пластины  $\mathbf{u}_2$  из-за прямого действия этих же напряжений. Линейность уравнений (1, 2) позволяет оценить вклады каждого из этих механизмов.

Линейная комбинация с объемными волнами  $\mathbf{u}'_2 = \mathbf{u}_0 + \mathbf{u}_2$  представляет вклад объемного механизма. Учитывая, что волны  $\mathbf{u}_1$ ,  $\mathbf{u}_2$  содержат симметричные и антисимметричные моды Рэлея-Лэмба:  $\mathbf{u}_{1,2} = \mathbf{u}_{1,2}^{(s)} + \mathbf{u}_{1,2}^{(a)}$ , полное решение представим в следующем виде

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 + \mathbf{u}_1^{(s)} + \mathbf{u}_1^{(a)} + \mathbf{u}_2^{(s)} + \mathbf{u}_2^{(a)},$$

где введение  $\mathbf{u}_0$  позволяет явно выделить составляющую деформаций, возникающих при учете конечной толщины пластины, по сравнению с неограниченным кристаллом. Результирующие амплитуды волн, обусловленные обоими механизмами

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1^{(s)} + \mathbf{u}_2^{(s)} &= \left[ 1 - \frac{(2\delta_5 + \delta_6)(s_l^2 - 2s_t^2)}{(2\delta_1 + \delta_2)(s_l^2 - v^2)} \right] \mathbf{u}_1^{(s)}; \\ \mathbf{u}_1^{(a)} + \mathbf{u}_2^{(a)} &= \left[ 1 + \frac{s_t^2}{(s_l^2 - v^2)} \right] \mathbf{u}_1^{(a)}, \end{aligned} \quad (3)$$

Вторые слагаемые в правых частях (3) показывают вклад второго механизма по отношению к вкладу первого. Для антисимметричных волн вклад второго механизма такой же при низких скоростях и начинает расти из-за приближения к скорости поперечных звуковых волн, которая в данном случае не достигается, так как максимальная скорость изгибных колебаний меньше. Максимальное соотношение вкладов достигает  $\approx 6$ .

Ее величина составляет порядка  $2 \cdot 10^{-8}$  см и начинает расти при меньших скоростях из-за роста длины волны по отношению к толщине пластины.

Рост амплитуды при больших скоростях связан с уменьшением дисперсии при приближении к рэлеевской скорости.

В работе [2] рассчитывалось взаимодействие ДГ с объемными звуковыми волнами, в том числе величина амплитуды деформации ( $u_{max}$ ), вызванной движением ДГ  $\mathbf{ac}$  – типа. Согласно данным этой работы вдали от звуковых скоростей отношение амплитуды деформации к характерному размеру ДГ, по порядку величины, определяется отношением магнитоакустической энергии к упругой. Оценка этой амплитуды для теоретической величины  $D_3 \sim 10^{-6}$  см дает небольшое смещение, порядка  $10^{-12}$  см, однако при приближении к звуковым скоростям обратное влияния акустической системы на движение ДГ приводит к ее заметному торможению [1]. Для расчетной ширины ДГ величина амплитуды волн Рэлея-Лэмба оказывается того же порядка. При этом сильная дисперсия ограничивает амплитуду.

Однако, в пластинах конечных размеров, ограниченных по осям  $\mathbf{y}$ ,  $\mathbf{z}$ , вследствие отражения волн от этих границ могут создаваться резонансные условия, которые приведут к образованию стоячих волн при периодическом движении ДГ. В этом случае для оценки амплитуды недостаточно известных параметров, учитывающих диссипацию.

На основании исследований, представленных в данной работе, получены следующие результаты.

Дисперсионные зависимости сдвиговых волн в пластинах ортоферритов зависят от ее толщины и при определенных условиях могут находиться в состоянии резонанса с движущимся источником.

При этом номер возбуждаемой моды зависит от скорости источника, а общее количество мод, попадающих в резонанс, зависит от толщины пластины.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что волны Лэмба могут оказывать влияние на динамику ДГ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Четкин М. В., Кузьменко А. П., Гадецкий и др. Взаимодействие движущейся доменной границы ортоферрита с волнами Лэмба // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 37. Вып. 5. С. 223-226.
2. Жуков Е. А., Кузьменко А. П., Щербаков Ю. И. Торможение движущейся доменной границы в слабых ферромагнетиках // ФТТ. 2008. Т. 50. Вып. 6. С. 1033-1036.
3. Кузьменко А. П., Жуков Е. А., Щербаков Ю. И. Взаимодействие движущейся доменной границы с поверхностными магнитоупругими волнами в ортоферрите иттрия. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 11. С. 45-52.
4. Звездин А. К., Мухин А. А. Магнитоупругие уединенные волны и сверхзвуковая динамика доменных границ // ЖЭТФ. 1992. Т. 102. Вып. 2. С. 577-599.
5. Bar'yakhtar V. G., Chetkin M. V., Ivanov B. A., Gadetskii S. N. Dynamics of Topological Magnetic Solitons. Experiment and Theory. Berlin. : Springer-Verlag, Springer Tracts in Modern Physics. 1994. V. 129, 179 p.
6. Барьяхтар В. Г., Иванов Б. А., Четкин М. В. Динамика доменных границ в слабых ферромагнетиках // УФН. 1985. Т. 146. Вып. 3. С. 417-458.

УДК 517.9

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАТОРА ПЕРЕНОСА С ПЕРЕМЕННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

**В. И. Жукова<sup>1</sup>, Е. А. Жуков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск

<sup>2</sup>Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

e-mail: [v-i-zhukova@yandex.ru](mailto:v-i-zhukova@yandex.ru)<sup>3</sup>

*Настоящая работа посвящена изучению корректной разрешимости задачи Коши для уравнения переноса метеорологических элементов в неограниченном объеме  $R_2$  с помощью теории полугрупп. Для этого изучаются свойства оператора переноса с переменными коэффициентами. В данной работе обобщается результат, полученный в [1] для оператора переноса нейтронов (оператор с постоянными коэффициентами), на оператор переноса с переменными коэффициентами.*

При изучении метеорологических явлений важную роль играют процессы переноса. Рассмотрим корректную разрешимость задачи Коши для уравнения переноса метеорологических элементов в неограниченном объеме  $R_2$  с помощью теории полугрупп.

Оператор переноса с переменными коэффициентами имеет вид:

$$Au(x, y) = \omega_1(x, y) \frac{\partial u(x, y)}{\partial x} + \omega_2(x, y) \frac{\partial u(x, y)}{\partial y}. \quad (1)$$

Такой оператор возникает, например, в двумерном уравнении переноса метеорологических элементов [2]. Используя (1), запишем операторную форму задачи Коши этого уравнения:

$$\begin{cases} \frac{du(x, y, t)}{dt} = Au(x, y, t), & t > 0; \\ u(x, y, 0) = u_0(x, y), & u(x, y) \in D(A). \end{cases} \quad (2)$$

Разрешимость задачи (1), (2) будем изучать в пространстве  $C(R_2)$  – равномерно непрерывных и ограниченных на  $R_2$  функций. Тогда  $D(A)$  – область определения оператора (1) состоит из функций  $u(x, y) \in C(R_2)$ ,  $\frac{\partial u(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} \in C(R_2)$ ,  $\omega_1(x, y), \omega_2(x, y) \in C(R_2)$ .

Здесь  $u(x, y, \varpi, t)$  – функция распределения метеорологических элементов в пространстве  $R_2$  в направлении  $\varpi = \{\omega_1(x, y), \omega_2(x, y)\}$ , где  $\omega_1(x, y), \omega_2(x, y)$  – направляющие косинусы вектора  $\varpi$  в каждой точке  $(x, y) \in R_2$ , следовательно, для всех  $(x, y) \in R_2$  выполняется условие:

$$\omega_1^2(x, y) + \omega_2^2(x, y) = 1. \quad (3)$$

Норма в пространстве  $C(R_2)$  определяется формулой

$$\|\Phi(x, y)\|_{C(R_2)} = \sup_{(x, y)} |\Phi(x, y)|. \quad (4)$$

Исследование корректной разрешимости задачи (1) - (2) основывается на теореме Хилле – Йосиды и теореме о возмущении полугрупп класса  $(C_0)$  [3-4]. Из [3-4] следует, что если резольвента замкнутого оператора  $T$  имеет оценку вида

$$\|R(\lambda; T)\|_{C(R_2) \rightarrow C(R_2)} = \|(\lambda I - T)^{-1}\|_{C(R_2) \rightarrow C(R_2)} \leq \frac{1}{|\operatorname{Re} \lambda| - \alpha}, \quad |\operatorname{Re} \lambda| > \alpha, \quad (5)$$

то такой оператор  $T$  является производящим оператором сильно непрерывной группы операторов класса  $(C_0)$  в пространстве  $C(R_2)$  и задача Коши вида (2) с этим оператором имеет единственное решение в этом пространстве.

В работе [5] доказано, что оператор переноса нейтронов в пространстве  $C(R_2)$  не является замкнутым. Это справедливо и для оператора переноса с переменными коэффициентами (1). Поэтому вместо незамкнутого оператора  $A$  (1) будем изучать его замыкание в пространстве  $C(R_2)$ , то есть решать задачу Коши (1), (2) с расширенным оператором  $\bar{A}$ . Построим замыкание оператора  $A$  (1). Для этого в каждой точке  $(x, y) \in R_2$  зададим параметрически направление перемещения элементов:

$$\begin{cases} x_1 = x + \omega_1(x, y)l, \\ y_1 = y + \omega_2(x, y)l, \\ -\infty < l < \infty. \end{cases} \quad (6)$$

**Определение 1.** Производной функции  $\Phi(x, y)$  по направлению (6) называется предел, если он существует, вида

$$\frac{d\Phi(x, y)}{dl} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\Phi(x + \omega_1(x, y)h, y + \omega_2(x, y)h) - \Phi(x, y)}{h}.$$

**Определение 2.** Оператором  $\bar{A}$  называется оператор вида

$$\bar{A}\Phi(x, y) = \frac{d\Phi(x, y)}{dt}. \quad (7)$$

Область определения  $D(\bar{A})$  включает функции  $\Phi(x, y) \in C(R_2)$  такие, что  $\frac{d\Phi(x, y)}{dt} \in C(R_2)$ .

**Теорема 1.** Оператор  $\bar{A}$  (7) - замкнутый в пространстве  $C(R_2)$ .

**Теорема 2.**  $D(A) \subset D(\bar{A})$  и для  $\Phi(x, y) \in D(A) \Rightarrow \bar{A}\Phi(x, y) = A\Phi(x, y)$ .

**Теорема 3.** Оператор  $\bar{A}$  (7) есть замыкание оператора  $A$  (1) в пространстве функций  $C(R_2)$ .

**Замечание:** Доказательство теорем 1-3 аналогично доказательствам соответствующих теорем для оператора переноса нейтронов в [1].

Построим резольвенту  $R(\lambda; \bar{A}) = (\lambda I - \bar{A})^{-1}$  оператора  $\bar{A}$  (7) и найдем ее оценку в пространстве  $C(R_2)$ . Для этого решим резольвентное уравнение

$$\lambda\Phi - \frac{d\Phi}{dt} = f, \quad \Phi(x, y) \in D(\bar{A}), \quad f(x, y) \in C(R_2), \quad \omega_1(x, y), \omega_2(x, y) \in C(R_2).$$

Решая резольвентное уравнение, получим

$$\Phi(x, y) = R(\lambda; \bar{A})f(x, y, \varpi(x, y)) = \begin{cases} \int_0^\infty e^{(-\lambda)s} f(x + \omega_1(x, y)s, y + \omega_2(x, y)s) ds, & \operatorname{Re} \lambda > 0; \\ \int_{-\infty}^0 e^{(-\lambda)s} f(x + \omega_1(x, y)s, y + \omega_2(x, y)s) ds, & \operatorname{Re} \lambda < 0. \end{cases} \quad (8)$$

Здесь  $\Phi(x, y) \in D(\bar{A})$ ,  $f(x, y, \varpi(x, y)) \in C(R_2)$ .

**Теорема 4.** Для резольвенты (8) оператора  $\bar{A}$  (7) в пространстве  $C(R_2)$  справедлива оценка

$$\|R(\lambda; \bar{A})\|_{C(R_2) \rightarrow C(R_2)} \leq \frac{1}{|\operatorname{Re} \lambda|}, \quad |\operatorname{Re} \lambda| > 0. \quad (9)$$

**Доказательство.** Докажем для случая  $\operatorname{Re} \lambda > 0$ . Из формул (4) и (8) получим

$$\begin{aligned} \|(\lambda I - \bar{A})^{-1} f(x, y, \varpi(x, y))\|_{C(R_2)} &= \left\| \left( \sup_{(x, y)} \left| \int_0^\infty e^{-(\lambda-\sigma)s} f(x + \omega_1(x, y)s, y + \omega_2(x, y)s) ds \right| \right) \right\| \\ &\leq \\ &\leq \left( \sup_{(x, y)} |f(x, y, \varpi(x, y))| \right) \int_0^\infty e^{-s(\operatorname{Re} \lambda)} ds = \frac{1}{\operatorname{Re} \lambda} \|f(x, y, \varpi(x, y))\|_{C(R_2)}. \end{aligned}$$

Таким образом, доказали, что

$$\|R(\lambda; \bar{A})\|_{C(R_2) \rightarrow C(R_2)} \leq \frac{1}{\operatorname{Re} \lambda}, \quad \operatorname{Re} \lambda > 0.$$

Аналогично для случая  $\operatorname{Re} \lambda < 0$  доказывается, что

$$\|R(\lambda; \bar{A})\|_{C(R_2) \rightarrow C(R_2)} \leq -\frac{1}{\operatorname{Re} \lambda}, \quad \operatorname{Re} \lambda < 0.$$

Следовательно, для резольвенты оператора  $\bar{A}$  (7) в пространстве  $C(R_2)$  справедлива оценка (9).

**Следствие.** Из формулы (9) (теорема 4) и формулы (5), следует, что оператор  $\bar{A}$  (7) является производящим оператором сильно непрерывной группы операторов класса  $(C_0)$ , в пространстве  $C(R_2)$ .

Тогда, согласно [3-4] и на основании теорем 1-4, делаем вывод, что задача Коши (1), (2) с оператором переноса с переменными коэффициентами корректно разрешима в пространстве равномерно непрерывных и ограниченных на плоскости функций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жукова В. И., Жуков Е. А. Свойство позитивности оператора переноса нейтронов // Физика: Фундаментальные и прикладные исследования, образование XVII региональная научная конференция, посвященная 150-летию Менделеева. Благовещенск: Изд-во АМГУ. 2019 С. 26-29.
2. Лебедева В. И., Соболевский П. Е. Исследование резольвенты оператора переноса с переменными коэффициентами в пространствах  $L_p(R_2)$ ,  $1 \leq p \leq \infty$ . Воронеж. 1984. 32 с. Рукопись представлена Воронеж. ун-том. Деп. в ВИНТИ 1 февраля 1984, № 612-84.
3. Хилле Э., Филлипс Р. Функциональный анализ и полугруппы. М.: ИЛ, 1962. 829 с.
4. Иосида К. Функциональный анализ. М.: Мир, 1967. 624 с.
5. Zhukova V. I., Gamolija L. N. Study of spectral properties of a translation operator. Far Eastern Mathematical Journal. 2004. V. 5. № 1. P. 158-164.

УДК 52-626

## ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ЗОНА В ПРЕДСТАВЛЕНИИ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ КВАЗИШТУРМОВСКИХ ФУНКЦИЙ

С. А. Зайцев<sup>1</sup>, Д. С. Зайцева<sup>1</sup>, А. С. Зайцев<sup>1</sup>, Е. И. Крамарь<sup>1</sup>, К. А. Кузаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва

e-mail: [alzaytsev@pnu.edu.ru](mailto:alzaytsev@pnu.edu.ru)

*Обсуждается описание процесса рассеяния электрона на атоме в присутствии лазерного излучения. Взаимодействие электрона с полем лазера учитывается в рамках приближения Зона. Показано, что стандартный квазиштурмовский подход оказывается неприменимым из-за слабого затухания поляризационной составляющей потенциала Зона. Предложена модификация метода, позволяющая адекватно учесть асимптотические свойства взаимодействия.*

### Введение

Процессы рассеяния электронов на атомах или молекулах в присутствии поля лазера:

$$e^-(E_0) + A \rightarrow e^-(E_0 \pm \ell\omega) + A, \quad (1)$$

сопровожаемые излучением ( $\ell < 0$ ) или поглощением ( $\ell > 0$ ) фотонов, являются фундаментальными для понимания многих аспектов астрофизики и физики плазмы. Например, подобные процессы ответственны за инфракрасную непрозрачность звездных атмо-

сфер и важны для понимания звездных недр (см. [1] и цитируемую литературу). Процессы рассеяния играют важную роль в пробое газа, происходящем в электрических разрядах, и обеспечивают метод лазерного нагрева плазмы [1].

### Уравнения метода

Рассмотрим случай линейно поляризованного монохроматического лазерного излучения с векторным потенциалом

$$\mathbf{A}(t) = \mathbf{A}_0 \cos(\omega t). \quad (2)$$

Предполагается, что лазерное поле частоты  $\omega$  включается адиабатически в далеком прошлом  $t = -\infty$ .

Динамика электрона управляется уравнением Шредингера [2]

$$i \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \left[ \frac{1}{2} \left( -i \nabla + \frac{1}{c} \mathbf{A}(t) \right)^2 + V(\mathbf{r}) \right] \Psi(\mathbf{r}, t), \quad (3)$$

которое в представлении Крамерса-Хеннебергера принимает вид

$$i \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t) = \left( -\frac{1}{2} \Delta + V[\mathbf{r} + \mathbf{a}(t)] \right) \psi(\mathbf{r}, t), \quad (4)$$

где

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \exp \left[ \mathbf{a}(t) \cdot \nabla + \frac{i}{2c^2} \int_{-\infty}^t dt' A^2(t') \right] \Psi(\mathbf{r}, t), \quad (5)$$

$$\mathbf{a}(t) = \frac{1}{c} \int_{-\infty}^t dt' \mathbf{A}(t') = \mathbf{a}_0 \sin(\omega t), \quad \mathbf{a}_0 = \mathbf{A}_0 / \omega c. \quad (6)$$

В рамках эрмитовой теории Флоке решение уравнения (4) ищется в виде разложения

$$\psi(\mathbf{r}, t) = e^{-iEt} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-in\omega t} F_n(E, \mathbf{r}), \quad (7)$$

где вещественная величина  $E$  называется Флоке квазиэнергией состояния. Флоке-компоненты  $F_n$  удовлетворяют стационарным уравнениям [2]

$$\left[ -\frac{1}{2} \Delta + V_0(\mathbf{a}_0, \mathbf{r}) - (E + n\omega) \right] F_n(E, \mathbf{r}) + \sum_{n \neq n'} V_{n-n'}(\mathbf{a}_0, \mathbf{r}) F_{n'}(E, \mathbf{r}) = 0, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (8)$$

Здесь  $V_n$  – Фурье-компоненты потенциала  $V[\mathbf{r} + \mathbf{a}(t)]$

$$V_n(\mathbf{a}_0, \mathbf{r}) = \frac{1}{T} \int_0^T dt \exp(in\omega t) V[\mathbf{r} + \mathbf{a}(t)], \quad T = 2\pi / \omega. \quad (9)$$

### Параболические квазиштурмовские функции

Исходные однородные уравнения (8) решаются путем представления решения в виде суммы

$$F_n = \tilde{F}_n + S_n. \quad (10)$$

Известные функции  $S_n$  выбираются из тех соображений, чтобы максимально полно передать поведение главного члена асимптотики решения. В стандартном подходе  $S_n$  задается в виде плоской волны, соответствующей налетающей частице:

$$S_n(\mathbf{r}) = \delta_{n0} e^{i\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}}. \quad (11)$$

Преимуществом разбиения (10) и переходу к неоднородному уравнению относительно  $\tilde{F}_n$  является тот факт, что искомые функции теперь удовлетворяют граничным условиям в виде расходящихся сферических волн. Таким образом, компоненты  $\tilde{F}_n$  можно искать, например, в виде разложения

$$\tilde{F}_n(E, \mathbf{r}) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n_1, n_2=0}^{N-1} C_{n_1 n_2 m}^n \mathcal{Q}_{n_1 n_2 m}^{(+)}(k_n; \xi, \eta, \phi) \quad (12)$$

по параболическим квазиштурмовским функциям (ось  $z$  выбрана в направлении импульса  $\mathbf{k}_0$  налетающего электрона:  $x = \sqrt{\xi\eta} \cos \phi$ ,  $y = \sqrt{\xi\eta} \sin \phi$ ,  $z = \frac{1}{2}(\xi - \eta)$ ) [3]. Асимптотическое поведение базисных функций задается выражением

$$\mathcal{Q}_{n_1 n_2 m}^{(+)}(k_n; \xi, \eta, \phi) \xrightarrow{r \rightarrow \infty} \frac{e^{im\phi}}{\sqrt{2\pi}} A_{n_1 n_2}^{n|m|}(\theta) \frac{\exp\{ik_n r\}}{r}, \quad (13)$$

где  $k_n = \sqrt{2E_n}$ ,  $E_n = E + n\omega$ . Выражение для амплитуд  $A_{n_1 n_2}^{n|m|}$  в (13) имеет вид [3]

$$A_{n_1 n_2}^{n|m|}(\theta) = \frac{i}{k_n} \sqrt{\frac{n_1! n_2!}{(n_1 + |m|)! (n_2 + |m|)!}} (\zeta^{-1} - \zeta)^{|m|+1} \left(\frac{\sin(\theta)}{2}\right)^{|m|} (-\zeta)^{n_1+n_2} \times \sum_{v_1=0}^{n_1} \sum_{v_2=0}^{n_2} c_{v_1}^{(n_1, |m|)} c_{v_2}^{(n_2, |m|)} \Gamma(|m| + v_1 + v_2 + 1) (1 - \zeta^{-2})^{v_1+v_2} \left(\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^{2v_1} \left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^{2v_2}. \quad (15)$$

Здесь  $\zeta = \frac{b + ik_n/2}{b - ik_n/2}$ ,  $c_v^{(n, |m|)} = (-1)^v \frac{(n + |m|)!}{(n - v)! (v + |m|)! v!}$ .

Таким образом, для асимптотического поведения Флоке-компонент  $\tilde{F}_n$  имеем

$$\tilde{F}_n(E, \mathbf{r}) \approx \sum_{m=-M}^M \frac{e^{im\phi}}{\sqrt{2\pi}} \sum_{n_1, n_2=0}^{N-1} C_{n_1 n_2 m}^n A_{n_1 n_2}^{n|m|}(\theta) \frac{e^{ik_n r}}{r}. \quad (16)$$

### Потенциал Зона

В общем случае конкретный вид функций  $S_n$  в (10) зависит от асимптотических свойств потенциала, описывающего взаимодействие с полем лазера. В нашем случае потенциал Зона в лабораторной системе задается выражением

$$V(\mathbf{r}) = V_A(r) + W(\mathbf{r}), \quad (17)$$

где  $V_A$  – статический атомный потенциал. Потенциал  $V_A$  предполагается короткодействующим. Например, для атома ксенона модельный статический атомный потенциал имеет вид

$$V_A(r) = -Z \frac{e^{-r/r_0}}{r}, \quad (18)$$

где  $Z = 54$ ,  $r_0 = Z^{-1/3}$ .

Поляризационная составляющая потенциала (17) записывается в виде

$$W(\mathbf{r}) = \frac{\omega^2 \alpha(\omega)}{r^3} (\mathbf{a}(t), \mathbf{r}), \quad (19)$$

где  $\alpha(\omega)$  – дипольная поляризуемость. В представлении Крамерса-Хеннебергера поляризационный потенциал преобразуется:

$$W(\mathbf{r}) \rightarrow W(\mathbf{r} + \mathbf{a}(t)) = \frac{\omega^2 \alpha(\omega)}{|\mathbf{r} + \mathbf{a}(t)|^3} [\mathbf{a}(t)^2 + (\mathbf{a}(t), \mathbf{r})]. \quad (20)$$

Заметим, что в пределе  $r \rightarrow \infty$  потенциал  $W(\mathbf{r} + \mathbf{a}(t))$  ведет себя как

$$W(\mathbf{r} + \mathbf{a}(t)) \approx \frac{\omega^2 \alpha(\omega)}{r^3} (\mathbf{a}_0, \mathbf{r}) \sin(\omega t), \quad (21)$$

и, следовательно, для отличных от нуля его Фурье-компонент получаем

$$W_{\pm 1}^a = \pm \frac{i \omega^2 \alpha(\omega)}{r^3} (\mathbf{a}_0, \mathbf{r}). \quad (22)$$

Заметим, что потенциалы  $W_{\pm 1}^a$  довольно медленно  $\sim \frac{1}{r^2}$  затухают, и это может отрицательно сказаться на скорости сходимости схемы расчетов. Так, например, в приближении, когда учитываются только Фурье-компоненты  $F_0, F_{\pm 1}$ , получаем следующее асимптотическое уравнение

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \Delta - E_{-1} & W_{-1}^a & 0 \\ W_1^a & -\frac{1}{2} \Delta - E_0 & W_{-1}^a \\ 0 & W_1^a & -\frac{1}{2} \Delta - E_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{-1} \\ F_0 \\ F_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Если теперь заменить  $F_0$  плоской волной:  $F_0(\mathbf{r}) \approx e^{i\mathbf{k}_0 \mathbf{r}}$ , то для компонент  $F_{\pm 1}$  получим приближенное решение

$$F_{\pm 1} \approx \hat{G}_{\pm 1} W_{\pm 1}^a F_0, \quad (24)$$

где  $\hat{G}_{\pm 1} = \left[ -\frac{1}{2} \Delta - E_{\pm 1} \right]^{-1}$  – оператор функции Грина. Амплитуда компонент  $F_{\pm 1}$

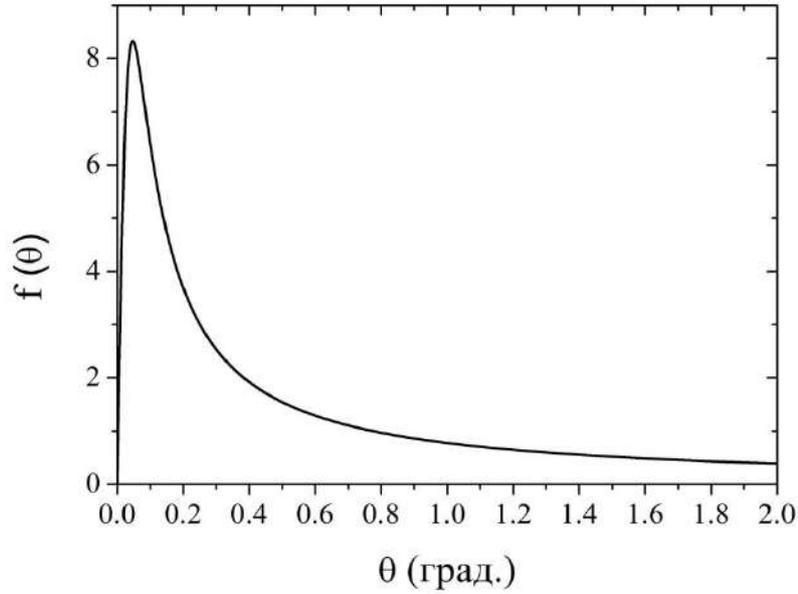
$$A^a(\theta) = -\frac{1}{2\pi} \int d\mathbf{r} e^{i\mathbf{q} \mathbf{r}} \frac{\mathbf{a}_0 \cdot \mathbf{r}}{r^3}, \quad (25)$$

где  $\mathbf{q} = \mathbf{k}_0 - \mathbf{k}$  – переданный импульс, вычисляется аналитически. Так в случае  $\mathbf{a}_0 \perp \mathbf{k}_0, \mathbf{k}$  получаем для ее модуля

$$|A(\theta)| = 2a_0 k \frac{\sin(\theta)}{k_0^2 + k^2 - 2k_0 k \cos(\theta)}. \quad (26)$$

График функции  $f(\theta) = \frac{\sin(\theta)}{k_0^2 + k^2 - 2k_0 k \cos(\theta)}$ , например, для значений  $k_0 = 8.573$

и  $k = k_1 = 8.58$  ( $E = 1$  кэВ,  $\hbar\omega = 1.55$  эВ), представленный на рис., демонстрирует резкий рост в области малых углов, наблюдаемый в эксперименте [4].



Функция  $f(\theta)$

Вместе с тем столь нерегулярное поведение амплитуды в этой области углов сложно описать конечной комбинацией функций  $A_{n_1, n_2}^{|m|}$ , которые содержат лишь положительные степени  $\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$ .

#### Заключение

Из приведенных выше соображений следует, что разбиение компонент (10), которое позволяет учесть особенности асимптотического поведения Фурье-компонент  $W_{\pm 1}$  поляризационного потенциала (19) может быть следующим:

$$S_0 = e^{ik_0 r}, S_{\pm 1} = -\hat{G}_{\pm 1} W_{\pm 1}^a S_0. \quad (27)$$

Такой подход позволяет явно выделить из амплитуды рассеяния 'сингулярную' составляющую (25) и тем самым обеспечить быструю сходимость 'регулярного' вклада (16).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. deHarak B. A., Kim B. N., Weaver C. M., N L S Martin, Mahsa Siavashpouri, Benjamin Nosarzewski, Effects of polarization direction on laser-assisted free-free scattering, Plasma Sources Sci. Technol, 2016, vol. 25, pp. 035021.
2. Joachain C. J., Kylstra N. J., Potvliege R. M. Atoms in intense laser fields, Cambridge university press, UK, 2012.
3. Zaytsev A. S., Zaytsev S. A., Ancarani L. U., Kouzakov K. A. Laser-modified Coulomb scattering states of an electron in the parabolic quasi-Sturmian-Floquet approach, Physical Review A, 2018, vol. 97(4), pp. 043417.
4. Yuya Morimoto, Reika Kanya, Kaoru Yamanouchi, Light-Dressing Effect in Laser-Assisted Elastic Electron Scattering by Xe, Physical Review Letters, 2015, vol. 115 pp. 123201.

**ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ОСНОВНЫХ СОСТОЯНИЙ СПИНОВЫХ СТЕКОЛ**

**В. Ю. Капитан<sup>1,2</sup>, Е. В. Васильев<sup>1,2</sup>, А. О. Король<sup>1</sup>, Д. Ю. Капитан<sup>1,2</sup>,  
А. Е. Рыбин<sup>1,2</sup>, М. А. Падалко<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

<sup>2</sup>Институт прикладной математики ДВО РАН, г. Владивосток

e-mail: [kapitan.vyu@dvfu.ru](mailto:kapitan.vyu@dvfu.ru)

*Поиск основного состояния спиновых стекол является очень сложной задачей в связи с макроскопическими вырождениями и фрустрациями, которые существуют в спиновых стеклах. В данной работе изучалась модель спинового стекла Эдвардса-Андерсона на квадратной двумерной решетке спинов Изинга, с бимодальным распределением связей. В наших исследованиях алгоритм Монте-Карло генерировал набор обучающих данных, представляющий собой двоичные конфигурации системы спинового стекла для обучения нейронной сети. Нейронная сеть научилась генерировать новые бинарные конфигурации для предсказания выходных данных с высокой вероятностью и точностью, которые имеют наименьшее значение целевой функции, т. е. энергии для заданного распределения связей между спинами Изинга в решетке. Нейронная сеть предсказала конфигурации с энергией ниже, чем в ходе моделирования по методу Монте-Карло.*

В современном мире, где сложность и количество взаимодействий существенно возрастает, способность решать задачи оптимизации становится жизненно необходимой. Однако эти задачи принципиально сложны для решения, так как нередко они требуют поиска потенциальных решений на огромных пространствах возможных состояний. Ярким примером является известная проблема спинового стекла на основе модели Изинга [1].

Существуют традиционные методы изучения в статистической физике, среди которых наиболее эффективными является моделирование методом Монте-Карло, состоящее из стохастической выборки по пространству состояний и вычисления оценок для физических величин [2]. Алгоритм Метрополиса [3] как один из методов Монте-Карло является общим методом, используемым для изучения термодинамических свойств веществ, состоящих из взаимодействующих частиц. Одним из многообещающих алгоритмов является новый гибридный алгоритм, описанный в [4]. Этот гибридный мультиспиновый метод является логическим продолжением алгоритма Метрополиса.

Кроме того, способность современных методов машинного обучения классифицировать, идентифицировать и интерпретировать массивные наборы данных обеспечивает дополнительную парадигму к вышеупомянутому подходу к анализу экспоненциально большого числа состояний в статистической физике [5].

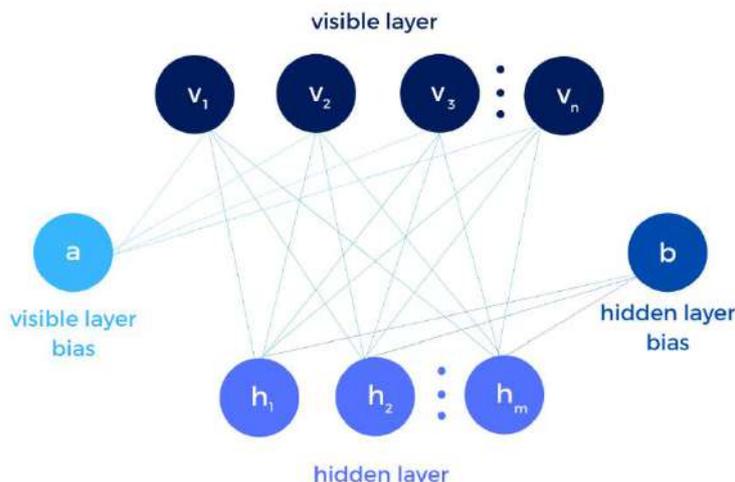
В данном исследовании была изучена модель спинового стекла [6] Эдвардса-Андерсона на квадратной двумерной решетке спинов Изинга с бимодальным распределением связей. В настоящей работе для моделирования была использована комбинация нашего гибридного мульти-спинового метода и ограниченной машины Больцмана для предсказания основных состояний для модели спинового стекла. Проблема моделирования спинового стекла определяется высокой сложностью получения конфигураций с минимально возможным уровнем энергии (основным состоянием). На данный момент не существует универсального алгоритма прямой генерации основного состояния. Для поиска основного состояния были использованы данные гибридного Монте-Карло для обучения нейронной сети и прогнозирования следующего состояния с более низким уровнем энергии, чем в наборах тренировочных данных. Небольшие спиновые системы  $4 \times 4$  и  $6 \times$

6 были использованы для проверки предсказанных результатов, в сравнении с точным решением, полученным полным перебором (табл.).

Разработанная нейронная сеть на основе ограниченной машины Больцмана, показанная на (рис.), представляет собой тип нейронных сетей, обучающихся без учителя, т. е. на вход нейронной сети подается массив данных, после чего сеть обучается, самостоятельно выделяя в этих данных некие признаки и особенности. В нашем случае нейронная сеть предсказывала конфигурации системы с энергией, меньшей чем в обучаемых данных.

Сравнение результатов различных методов моделирования

Результаты	Метод полного перебора	Гибридный Монте-Карло метод	Ограниченная машина Больцмана
Размер системы	$E_{\min}$	$E_{\min}$	$E_{\min}$
$4 \times 4$	-1.5	-	-1.5
$6 \times 6$	-1.3	-	-1.3
$10 \times 10$	-	-1.2	-1.28
$20 \times 20$	-	-0.87	-1.15
$30 \times 30$	-	-0.79	-1.12



Архитектура сети ограниченной машины Больцмана

В нашем исследовании было показано, что основные состояния спиновых стекол можно предсказать с помощью нейронной сети. Были изучены небольшие системы  $4 \times 4$ ,  $6 \times 6$  и проведено сравнение результатов для ограниченной машины Больцмана и полного перебора.

Более крупные системы были исследованы с помощью гибридного мульти-спинового метода, который сгенерировал наборы данных для ограниченной машины Больцмана, которые могли предсказывать конфигурации с энергией ниже, чем результаты гибридного Монте-Карло метода.

Но из-за отсутствия точного решения для определения количества вырождений основного уровня энергии для больших систем невозможно проверить наши алгоритмы на достижимость глобального минимума энергии. Несмотря на это, алгоритмы машинного обучения могут внести значительный вклад в решение NP-полных задач в будущем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Harris R. et al. Phase transitions in a programmable quantum spin glass simulator //Science. 2018. Т. 361. №. 6398. С. 162-165.
2. Landau D. P., Binder K. A guide to Monte Carlo simulations in statistical physics. Cambridge university press, 2014.
3. Metropolis N. et al. Equation of state calculations by fast computing machines //The journal of chemical physics. 1953. Т. 21. №. 6. С. 1087-1092.
4. Makarov A. G. et al. On the Numerical Calculation of Frustrations in the Ising Model //JETP Letters. 2019. Т. 110. №. 10. С. 702-706.
5. Butler K. T. et al. Machine learning for molecular and materials science //Nature. 2018. Т. 559. № 7715. С. 547-555.
6. Edwards S. F., Anderson P. W. Theory of spin glasses //Journal of Physics F: Metal Physics. 1975. Т. 5. №. 5. С. 965.

УДК 550.8(571.620)

### ПЛОТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ РАЙОНА МАЛМЫЖСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЛОЩАДЕЙ

**М. Ю. Носырев<sup>1</sup>, С. И. Кравченко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт тектоники и геофизики ДВО РАН г. Хабаровск

<sup>2</sup>Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

e-mail: [ns041ck@yandex.ru](mailto:ns041ck@yandex.ru)

*На основании математической обработки гравитационного поля Земли получено распределение плотности в земной коре до глубины 34 км в пределах Малмыжской площади в Хабаровском крае. Проанализировано положение Малмыжского золото-медного месторождения относительно плотностных неоднородностей коры, отмечены особенности распределения плотности в рудоносном блоке, предложены информативные признаки для выделения новых потенциально рудоносных площадей.*

Физические поля Земли широко используются в различных отраслях наук, изучающих нашу планету. Одной из них является геофизика, в которой физические поля (гравитационное, магнитное, электромагнитное) используются для изучения внутреннего строения Земли и решения связанных с этим прикладных задач, в первую очередь поисков и прогнозирования полезных ископаемых. Наиболее часто используется гравитационное поле, а точнее его аномалии, фиксируемые на поверхности Земли. Эти аномалии являются отклонением измеренных в данной точке значений силы тяжести от уровня нормального поля рассчитанного при заданных плотности и форме Земли и определяются различиями в плотности горных пород, слагающих земные недра, что определяет в свою очередь возможность извлечения геологической информации из данных аномального гравитационного поля. Поэтому гравитационные аномалии подвергают процедуре геологической интерпретации, что подразумевает выявление на определенных глубинах Земли плотностных неоднородностей, областей относительно пониженной и повышенной плотности, оценку их формы, размеров, глубины залегания и определения на этом основании их наиболее вероятной геологической природы. Как правило, наиболее активно изучаются глубины от сотен метров до 100-150 км.

Одним из важных направлений при этом является изучение плотностных неоднородностей земной коры с целью определения закономерностей локализации месторождений полезных ископаемых и выделения на этой основе новых площадей для поисков месторождений. Такой опыт на Дальнем Востоке известен для месторождений олова, золота, урана, полиметаллов. Выделение площадей основано на изучении плотностных неоднородностей земной коры, с которыми пространственно может быть совмещена и (или) генетически связана минерализация определенного типа.

Поэтому актуальной представляется задача изучить плотностные неоднородности земной коры для района недавно открытого, крупного золото-медного месторождения Малмыж, на территории Хабаровского края, наметить основные пространственные закономерности его расположения относительно этих неоднородностей. Таким образом главной задачей работы, результаты которой представлены в настоящем докладе являлись расчет и анализ плотностной модели земной коры Малмыжской площади, расположенной между Хабаровском и Комсомольском на Амуре, в пределах которой располагается месторождение Малмыж и ряд перспективных рудопроявлений.

Расчет плотностной модели выполнен с помощью программного комплекса КОСКАД, в котором использован известный метод вариаций Б. А. Андреева [1], обеспечивающий оценку поглубинного распределения аномальных масс за счет решения обратной задачи для определенных частотных составляющих поля силы тяжести [2, 3, 4]. Размер ячейки в использованной цифровой модели поля силы тяжести составлял 2 км. Согласно алгоритму расчета на первом этапе осуществляется адаптивная фильтрация поля в окнах размерами 3\*3, 5\*5, 7\*7 ячеек модели и т.д. до 0.3L, где L – максимальный размер анализируемой площади. Оценка глубин осуществляется по локальной составляющей гравитационного поля, полученной как разность составляющих двух соседних окон. В результате расчетов получается относительное распределение масс на некоторых глубинах, определяемых параметрами исходной цифровой модели и алгоритмом расчета, заложенным в программе [2]. В нашем случае шаг по глубине составил 1.12 км, распределение аномальных масс получено до глубины 34 км. Учитывая их неизменный размер с глубиной, можно считать, что полученное распределение масс фактически пропорционально распределению аномальной плотности (со своим знаком относительно среднего его значения), характеризующей тела данного глубинного уровня, создающие гравитационные аномалии соответствующие локальной составляющей общего гравитационного поля в данном частотном (глубинном) интервале. Для последующего анализа модель может быть представлена в графическом виде системой горизонтальных срезов и вертикальных разрезов. Для примера срез на глубине 28 км и разрез по одной из линий приведены ниже на рис. 1 и 2.

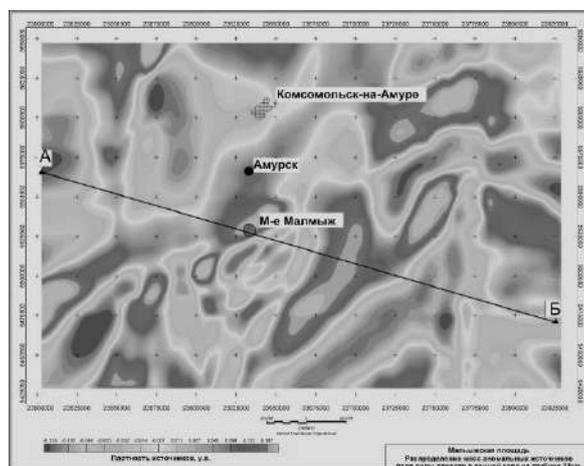
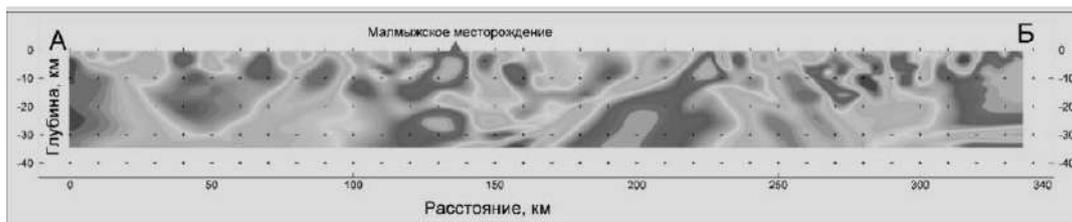


Рис. 1. Распределение плотности на глубине 28 км. Черная линия АБ – линия разреза (рис. 2.)



**Рис. 2.** Распределение плотности на разрезе по линии АБ

Распределение плотности на различных глубинных уровнях ячеистое, с чередованием относительных повышений и понижений. С глубиной плотностные неоднородности приобретают более линейный характер и согласуются очевидно с основными разломами площади. При этом также можно видеть, что одни плотностные неоднородности имеют сквозной характер и протягиваются с верхних уровней земной коры на глубину 34 км, т. е. до ее подошвы, другие отмечаются только на определенных глубинных уровнях.

Для района Малмыжского месторождения можно выделить три уровня глубин с различным распределением плотности в земной коре.

1. Первый уровень примерно до глубины 10-12 км. Здесь месторождение проецируется на краевую часть локального объема повышенной плотности, имеющего субширотную ориентировку и размеры 15\*30 км.

2. В интервале глубин 12-23 км контрастно выраженных плотностных неоднородностей под Малмыжским месторождением и окружающей территорией не наблюдается. Отмечаются лишь небольшие по размерам области слабо повышенных и пониженных значений.

3. С глубины 25 км и до 34 км т.е. до границы земной коры с верхней мантией вновь наблюдается довольно интенсивное уплотнение, которое в целом укладывается в протяженную зону северо-восточной ориентировки, которая может быть связана с системой разломов Тан-Лу. Непосредственно Малмыжское месторождение располагается в области наиболее интенсивного уплотнения нижней части земной коры. Эта область уплотнения имеет северо-восточную ориентировку и протяженность около 70 км при ширине 25 км.

Рассматривая полученные особенности в аспекте прогнозирования перспективных площадей для поисков месторождений такого типа, сделаем несколько дополнительных замечаний. Наличие области локального уплотнения в верхней части земной коры может рассматриваться как важный признак для участка вмещающего месторождение, однако таких локальных участков на изученной площади достаточно много и с этой точки зрения его вес для индивидуализации потенциально перспективных площадей не высок. Но при этом проведенный анализ показывает, что при совместном рассмотрении с областями уплотнения в нижней части земной коры картина существенно меняется. Для Малмыжского месторождения характерно уплотнение в верхней части земной коры до глубины 12 км на фоне интенсивного уплотнения в нижней части коры (на глубине более 25 км), которое превышает по размерам аномальную область в верхней части в несколько раз. При использовании такого признака количество потенциально перспективных участков, т.е. с одновременным уплотнением на рассмотренных уровнях земной коры уменьшается в несколько раз.

В геофизике, как правило, при прогнозировании площадей привлекается целый набор дополнительных признаков. В частности, Малмыжское месторождение располагается внутри положительной аномалии магнитного поля, что является достаточно характерным признаком для месторождений медно-порфирового типа, к которым относится Малмыж. Этот признак позволяет еще более локализовать перспективные области.

Таким образом, в рамках выполненной работы в результате математической обработки гравитационного поля Земли для Малмыжской площади в Хабаровском крае получена модель распределения плотности в земной коре до глубины 34 км. На основании ее анализа показана значительная плотностная дифференциация земной коры как по латера-

ли, так и по вертикали, что дает основу для геологической интерпретации данных неоднородностей. Кроме того, плотностные неоднородности, их соотношение на различных глубинах дают важную информацию о плотностных особенностях земной коры под Малмыжским золото-медным месторождением и обеспечивают ряд признаков для прогнозирования участков, перспективных на обнаружение на изученной площади других месторождений медно-порфирового типа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Б. А. Геологическое истолкование гравитационных аномалий. Л.: Недра, 1965. 495 с.
2. Комплекс спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3Д». Версия 2018.1. Часть 1 // Московский геологоразведочный институт МГРИ. М. 2018. 136 С.
3. Никитин А. А., Петров А. В., Алексахин А. С. Комплекс спектрально-корреляционного анализа данных «Коскад 3Д» / <http://coscad3d.ru/main.php>
4. Петров А. В., Юдин Д. Б., Хоу Сюэли Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3Д» // Вестник Краунц. Науки о Земле. 2010. № 2. Выпуск № 16. С.126-132.

УДК 539

## КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ И МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ Si:P

**А. В. Прохоренко<sup>1</sup>, А. А. Гниденко<sup>1,3</sup>, А. Н. Чибисов<sup>1,2</sup>, М. А. Чибисова<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

<sup>2</sup>Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск

<sup>3</sup>Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН, г. Хабаровск

e-mail: [aimpva@pnu.edu.ru](mailto:aimpva@pnu.edu.ru)

*Проведен неколлинеарный расчет электронной структуры кремния допированного фосфором. Установлена зависимость ширины энергетической щели между донорным уровнем и дном зоны проводимости от величины магнетизации на атоме фосфора, рассмотрена возможность управления направлением атомного спина фосфора с помощью магнитного поля.*

Популярность идеи использования полупроводниковых систем для создания квантовых компьютеров напрямую связана с высоким уровнем развития технологической базы современной микроэлектроники. Кубиты на основе полупроводников были одним из ранних предложений для физической реализации квантовых информационных процессоров [1-3]. Множество различных состояний внутри полупроводника определяют их универсальность. В конструкции квантового компьютера Б. Кейн [4] рассматривал кубит на основе кремния допированного фосфором (Si:P). Данная конструкция выглядит довольно близкой к практической реализации. Спиновые состояния электрона, связанного с атомом фосфора характеризуются относительно высоким временем когерентности. В настоящее время уже была продемонстрирована возможность когерентного управления и считывания электронного и ядерного спина отдельного атома фосфора в кремнии [5]. В представленной работе электронная и магнитная структура, их связь в системе Si:P изучены с помощью квантово-механических расчетов.

Для расчетов был использован пакет программ Quantum ESPRESSO [6], в основе работы которого лежит теория функционала электронной плотности. Обменно-корреляционное взаимодействие было представлено в приближении обобщенных градиентов, энергия обрезания базиса плоских волн составляла 35 Ry (порядка 476 эВ). Для генерации k-точек была использована схема Монкхорста-Пэка (однородная сетка 3×3×3). Метод псевдопотенциалов позволяет сделать расчеты менее ресурсозатратными, путем представления многочастичной системы в виде взаимодействующих валентных электронов и атомных остовов. Псевдопотенциалы для кремния и фосфора были выбраны из библиотеки программы Quantum ESPRESSO и тщательно протестированы. Для представления кристаллической решетки кремния была использована кубическая суперъячейка, состоящая из 64-х атомов. Система Si:P задавалась путем замещения атома кремния, расположенного в центре суперъячейки, атомом фосфора.

Намагниченность в квантово-механических расчетах подобного рода определяется разностью электронных плотностей, относящихся к электронам с противоположно-направленными спинами ( $n_{\uparrow} - n_{\downarrow}$ ). Наличие намагниченности в системе Si:P происходит за счет неспаренного электрона атома фосфора, в состоянии равновесия она составляет 1  $\mu\text{B}/\text{cell}$ . Плотность  $n = |\psi_i|^2$  данного электрона не является локализованной исключительно на атоме, а имеет пространственное распределение по объему суперъячейки. Аналогичным образом, намагнетизация распределяется по исследуемой ячейке. Расчет системы Si:P, состоящей из 64 атомов, дает следующее распределение по атомам: 0.019  $\mu\text{B}/\text{cell}$  на атоме фосфора, 0.010  $\mu\text{B}/\text{cell}$  на 4-х соседних кремниевых атомах. На остальных атомах кремния величина намагниченности находится в пределах от 0.002 до 0.007  $\mu\text{B}/\text{cell}$ .

В первую очередь были построены зонные структуры для идеальной кристаллической решетки кремния и для кремния допированного фосфором, полученные результаты представлены на рис. 1. Нужно отметить, что мы ограничились только следующим путем  $R \rightarrow \Gamma \rightarrow X$ , который включает непрямозонный переход, характерный для кремния. На первом графике пунктирными линиями показаны уровни НОМО (верхняя заселенная молекулярная орбиталь) и LUMO (нижняя незаселенная молекулярная орбиталь), разница между этими уровнями определяет ширину запрещенной зоны. Наши расчеты дают свойственную для таких расчетов заниженную величину порядка 0.5 эВ. Замещение одного атома кремния фосфором приводит к тому, что НОМО и LUMO уровни совпадают. Включение в расчет начальной намагнетизации на атоме фосфора снижает энергию системы, а также приводит к расщеплению уровней, вследствие чего мы получаем типичную картину – донорный уровень, расположенный ближе к LUMO уровню, который соответствует дну зоны проводимости.

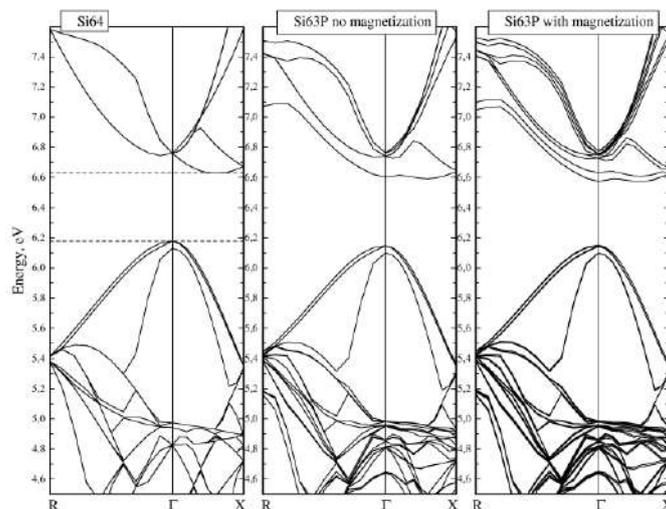


Рис. 1. Зонные структуры кремния (Si64) и кремния допированного фосфором (Si63P)

В пакете программ Quantum ESPRESSO существуют два основных способа ограничить намагниченность:

1. Ограничение полной намагниченности. В этом случае добавка к полной энергии системы определяется следующим образом:

$$\lambda \cdot \sum_{i=x,y,z} [M(i) - M_{FIX}(i)]^2,$$

где  $\lambda$  – численный параметр (может варьироваться для достижения сходимости),  $M$  – намагничивание;  $M_{FIX}$  – фиксированная магнетизация. Суммирование ведется по компонентам намагниченности ( $i=x,y,z$ ) в декартовой системе координат.

2. Ограничение атомной намагниченности. Добавка к полной энергии:

$$\lambda \cdot \sum_{i=x,y,z} [M(i, itype) - M_{CONS}(i, itype)]^2,$$

суммирование по декартовым компонентам и типам атомов ( $itype$ ) в элементарной ячейке. Массив  $M_{CONS}$  определяется из начального намагничивания.

При ограничении величины общей магнетизации и ее направления мы можем разделить ее влияние на ориентацию спина атома фосфора. Мы рассмотрели две ориентации: вниз и вверх (соответствующие квантовым состояниям  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$  в сфере Блоха).

Отклонение общей магнетизации системы от оси  $Z$  приводит к созданию магнитного поля, которое разворачивает направление магнитных моментов отдельных атомов по направлению общей магнетизации, независимо от их начальной ориентации.

В таблице приведены результаты расчетов полной энергии для нескольких конфигураций.

Результаты расчетов полной энергии

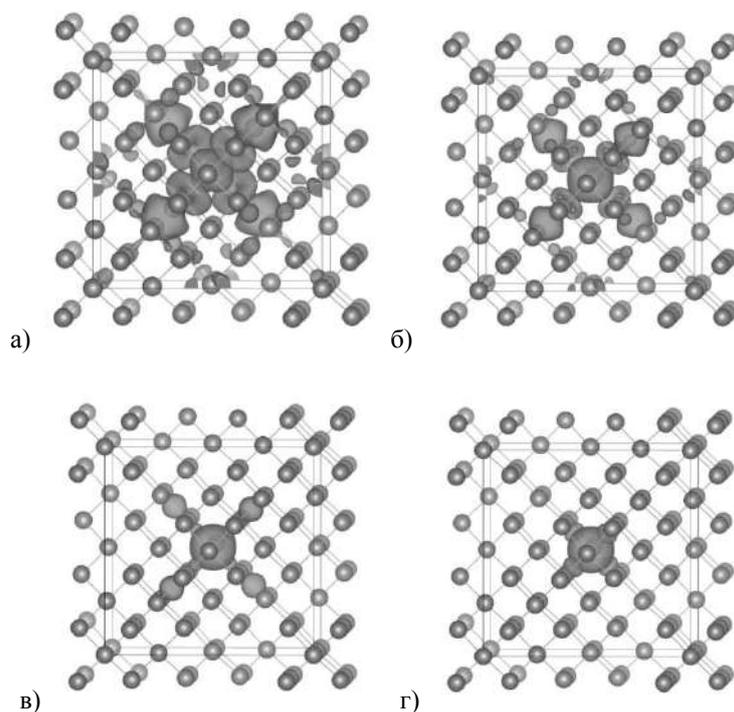
Фиксированная магнетизация ( $M_{FIX}$ )	Угол ( $M_{FIX}$ , о $Z$ )	Магнитное поле, Тл	Полная энергия, Ry
1,0001	175	1.5	-729.66349951
1,001	175	8.6	-729.66349947
1,001	110	23.0	-729.66350010
1,01	170	47.0	-729.66349946

Начальные условия определялись величиной фиксированной магнетизации ( $M_{FIX}$ ), ее направлением (угол между  $M_{FIX}$  и осью  $Z$ ), а также начальной намагниченностью на атоме фосфора.

Величину создаваемого внешнего магнитного поля мы получаем в качестве выходного параметра.

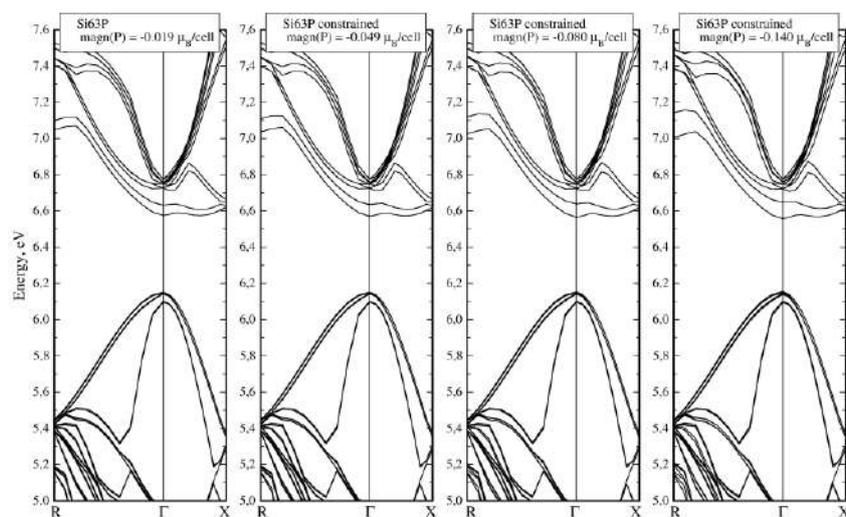
Разница в полных энергиях составляет порядка  $10^{-7}$  Ry, что ниже задаваемого параметра сходимости по энергии –  $10^{-6}$  Ry. Таким образом, ограничивая полную магнетизацию, мы не можем отследить какие-либо различия, связанные с изменением ее направления, или направления магнитных моментов на атомах, для данной системы.

Ограничение (усиление) магнетизации на атоме фосфора ведет к ее более выраженной локализации вблизи атома фосфора (рис. 2).



**Рис. 2.** Визуализация неколлинеарного распределения намагниченности в суперячейке:  
 а) намагниченность  $-0.019 \mu_B/\text{cell}$ ; б) намагниченность  $-0.049 \mu_B/\text{cell}$ ;  
 в) намагниченность  $-0.080 \mu_B/\text{cell}$ ; г) намагниченность  $-0.140 \mu_B/\text{cell}$

Полная энергия системы увеличивается за счет соответствующей добавки, которая также обуславливает увеличение энергетической щели между донорным уровнем и потолком зоны проводимости (уровень LUMO). Усиление намагниченности атома фосфора до величины  $0.140 \mu_B/\text{cell}$  приводит к увеличению энергетической щели, вычисленной в  $\Gamma$ -точке, с  $0.056$  до  $0.091$  эВ (рис.3). Полученные результаты могут быть использованы для качественного описания Si:P в перспективе проектирования кубитов на основе данных систем.



**Рис. 3.** Зонные структуры кремния допированного фосфором (Si63P) при изменении магнетизации на атоме фосфора

*Работа поддержана в соответствии с Государственным заданием на выполнение НИР Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0818-2020-0005). При выполнении расчетов были использованы ресурсы ЦКП «Центр данных ДВО РАН» (г. Хабаровск) [7].*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lloyd S. A Potentially Realizable Quantum Compute. New Series, 1993, Vol. 261, No. 5128, pp. 1569-1571, DOI: 10.1126/science.261.5128.1569.
2. Ekert A., Jozsa R. Quantum computation and Shor's factoring algorithm. Reviews of Modern Physics, 1996, Vol. 68, No. 3, pp. 733-753, DOI: 10.1103/RevModPhys.68.733.
3. Loss D., DiVincenzo D.P. Quantum computation with quantum dots. Physical Review A, 1998, Vol. 57, No. 1, pp. 120-126. DOI: 10.1103/RevModPhys.68.733.
4. Kane B.E. A silicon-based nuclear spin quantum computer. Nature, 1998. Vol. 393, pp. 133-137. DOI: 10.1038/30156.
5. Pla J.J., Tan K.Y., Dehollain J.P., Lim W.H., Morton J.J., Zwanenburg F.A., Jamieson D.N., Dzurak A.S., Morello A. High-fidelity readout and control of a nuclear spin qubit in silicon. Nature, 2013, Vol. 496, No. 7445, pp. 334-338. DOI: 10.1038/nature12011.
6. Giannozzi P. et al. Advanced capabilities for materials modelling with Quantum ESPRESSO. Journal of Physics: Condensed Matter, 2017, Vol. 29, No. 46, P. 465901. DOI: 10.1088/1361-648X/aa8f79
7. ЦКП «Центр данных ДВО РАН» [Электронный ресурс]: URL: <http://lits.ccfеbras.ru> (дата обращения: 02.10.2020).

УДК 537.5

## ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ЧЕТЫРЕХ ВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

**В. О. Ремесловский, Е. А. Жуков**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [e\\_a\\_zhukov@mail.ru](mailto:e_a_zhukov@mail.ru)

*Проведен теоретический анализ четырех волнового взаимодействия в поглощающих средах. Выявлены основные факторы, ограничивающие эффективность четырех волнового взаимодействия.*

Многоволновое взаимодействие лазерного излучения в поглощающей среде сопровождается ее общим нагревом, что приводит к образованию фазовых искажений, что приводит к модуляции плотности и показателя преломления среды. При небольшом нагреве происходящей в начальный момент среды ее отклик на излучение является локальным в пространстве с характерным масштабом неоднородности. В этом случае смещение отдельных участков среды из-за теплового расширения мало по сравнению с поперечными размерами волн и при определении вариаций плотности и температуры можно пренебречь скоростью расширения среды (при условии, что среда была первоначально неподвижна).

Анализ тепловых эффектов проводился на основе решения укороченных волновых уравнений для электромагнитных колебаний [1] и уравнений теплопроводности методом теории возмущений. Принималось, что угол между взаимодействующими волнам небольшой, длина области взаимодействия мала по сравнению с поперечными размерами лазерных пучков.

Четырех волновое взаимодействие длинных импульсов излучения характеризуется длительностью импульсов излучения взаимодействующих волн  $t_u$ , временем релаксации температурных решеток  $\tau \ll t_u$ , возникающих в результате интерференции, временем изменения температуры из-за теплопередачи через границы вдоль области взаимодействия среды  $\tau_l \gg \tau$ , и на поперечном размере  $\tau_r \gg \tau$ . Предполагалось, что в течении длительности импульсов излучения акустических волны распространялись по всей области взаимодействия. Выделенные следующие эффекты.

### ***Крупномасштабная модуляция фазы***

Смещение среды из-за теплового расширения приводит к изменению плотности и показателя преломления. Взаимодействующие волны к выходу из среды приобретают фазовую добавку, пропорциональную изменению температуры. Для лазерных пучков с Гауссовым распределением интенсивности этот эффект приводит к образованию тепловой линзы, рассмотренной в [1].

### ***Влияние теплового расширения среды***

Тепловое расширение среды на масштабе поперечных размеров пучков может превысить период температурной решетки и привести к ее размытию. Эффект исчезает при увеличении длительности импульса  $t_u \gg \tau$ . При увеличении длительности импульса излучения давление быстро стремится к равновесному значению, что позволяет считать его постоянным при определении других гидродинамических переменных. Так же можно пренебречь скоростью при определении значений изменения температуры  $\delta T$ , если смещение среды мало, по сравнению с периодом температурных решеток. Это условие можно записать в виде

$$\theta \ll \frac{\theta_0}{\beta_T \delta T},$$

где  $\theta_0$  – дифракционная расходимость волн накачек,  $\theta$  – угол между записываемыми волнами (в среде),  $\beta_T$  – коэффициент теплового расширения.

### ***Влияние теплопередачи через границы среды***

Если конвективное смещение среды за времена релаксации температурных неоднородностей мало, по сравнению с их размерами, то конвекцией можно пренебречь из-за преобладающей роли диффузионной теплопередачи. С учетом двух характерных масштабов и диффузии тепла в продольном направлении подобные условия реализуются при

$$v_k \ll \frac{r_0}{\tau_r}; \quad v_k \ll \Lambda \left( \frac{1}{\tau_l} + \frac{1}{\tau} \right).$$

Здесь  $v_k$  – характерная скорость конвективных потоков жидкости,  $r_0$  – поперечный размер области взаимодействия,  $\Lambda$  – период интерференционной решетки.

Первое условие необходимо для доминирования диффузионной теплопередачи при установлении среднего значения температурного поля  $\delta T_0$ , второе – интерференционной решетки. Степень влияния на ЧВ рассмотренных паразитных эффектов, сопровождающих тепловой механизм нелинейности в жидких средах, определяется нагревом сред. Для уменьшения искажений взаимодействующих волн этот нагрев необходимо ограничивать, используя слабо поглощающие среды.

## **ЛИТЕРАТУРА**

Зельдович Б. Я., Пилипецкий Н. Ф., Шкунов В. В. Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985. 250 с.

**ТЕПЛООБМЕН И МАГНИТНАЯ ГИДРОДИНАМИКА ЖИДКОСТИ  
В СФЕРИЧЕСКОМ СЛОЕ ПРИ ПОДВОДЕ ТЕПЛА  
К ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

**С. В. Соловьев, К. И. Павлов**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [solovjovsv@rambler.ru](mailto:solovjovsv@rambler.ru)

*Представлены результаты численного моделирования нестационарного теплообмена и магнитной гидродинамики электропроводной жидкости в сферическом концентрическом слое. Исследовано влияние внутренних источников/стоков тепла на структуру течения жидкости, поле температуры, магнитной индукции и распределение чисел Нуссельта с учетом диссипации джоулевой теплоты при подводе тепла к внешней сфере.*

Рассматривается нестационарный теплообмен электропроводной жидкости в сферическом слое. Исследовалось влияние внутренних источников (стоков) тепла на теплообмен и магнитную гидродинамику жидкости, находящейся в сильном магнитном поле ( $G = 10^3$ ;  $S = 10^4$ ). Учитывалась диссипация джоулевой теплоты. Ускорение силы тяжести направлено по радиусу к центру сферического слоя. Математическая постановка задачи имеет вид [1, 2]

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\text{Ho}} \frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left[ \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \omega}{\partial r} - \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - \frac{\omega}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} + \omega \operatorname{ctg} \theta \frac{\partial \psi}{\partial r} \right] = \\ & = \frac{1}{\text{Re}} \left[ \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta^2} + \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r^2} \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - \frac{\omega}{r^2 \sin^2 \theta} \right] - \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & - \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta} + \frac{S}{\text{Re}_m} \left[ B_r \frac{\partial^2 B_\theta}{\partial r^2} + 2 \frac{B_r}{r} \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + \frac{\partial B_r}{\partial r} \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + \frac{B_\theta}{r} \frac{\partial B_r}{\partial r} - \right. \\ & \left. - \frac{B_r}{r} \frac{\partial^2 B_r}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial B_r}{\partial r} \frac{\partial B_r}{\partial \theta} + \frac{B_\theta}{r} \frac{\partial^2 B_\theta}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial B_\theta}{\partial r} \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} + \frac{2B_\theta}{r^2} \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} - \frac{B_\theta}{r^2} \frac{\partial^2 B_r}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial B_r}{\partial \theta} \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} \right]; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} - \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} = -\omega r \sin \theta; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\text{Ho}} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left( \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} - \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta} \right) - \frac{1}{\text{Pe}} \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \theta^2} + \right. \\ & \left. + \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r^2} \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta} + Q_v \right) - \frac{J}{\text{Pe}} \left( \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} B_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial B_r}{\partial \theta} \right)^2 = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\text{Ho}} \frac{\partial B_r}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left[ B_\theta \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} + B_r \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r \partial \theta} + \frac{\partial B_r}{\partial \theta} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right] + \\ & + \frac{1}{\text{Re}_m} \left[ \frac{\partial^2 B_r}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 B_r}{\partial \theta^2} + \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r^2} \frac{\partial B_r}{\partial \theta} - \frac{2B_r}{r^2} - \frac{2B_\theta}{r^2} \operatorname{ctg} \theta - \frac{2}{r^2} \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} \right]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
\frac{1}{Ho} \frac{\partial B_\theta}{\partial \tau} &= \frac{1}{r \sin \theta} \left[ -B_r \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} - \frac{\partial B_r}{\partial r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} - \frac{B_\theta}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r \partial \theta} + \frac{B_\theta}{r^2} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \frac{\partial B_\theta}{\partial r} \right] + \\
&+ \frac{1}{Re_m} \left[ \frac{\partial^2 B_\theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 B_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\text{ctg} \theta}{r^2} \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} - \frac{B_\theta}{r^2 \sin^2 \theta} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial B_r}{\partial \theta} \right]. \quad (5) \\
g|_{r_1} &= 0; \quad \frac{\partial g}{\partial r} \Big|_{r_2} = 1. \quad \frac{\partial g}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0,\pi} = 0. \quad \psi|_{r_{1,2}} = \psi|_{\theta=0,\pi} = \omega|_{\theta=0,\pi} = 0; \quad \frac{\partial B_r}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0,\pi} = \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0,\pi} = 0; \\
B_r|_{r_1} &= B_r|_{r_2} = 0; \quad B_\theta|_{r_1} = -0,01 \sin \theta; \quad B_\theta|_{r_2} = 0,01 \sin \theta. \\
Nu_1 &= \frac{\alpha_1 r'_1}{\lambda} = - \frac{\partial g}{\partial r} \Big|_{r_1}, \quad Nu_2 = \frac{\alpha_2 r'_2}{\lambda} = -r_2 \frac{\partial g}{\partial r} \Big|_{r_2}. \quad \overline{Nu}_1 = -\frac{1}{2} \int_0^\pi \left[ \frac{\partial g}{\partial r} \right]_{r_1} \sin \theta d\theta, \\
\overline{Nu}_2 &= -\frac{r_2}{2} \int_0^\pi \left[ \frac{\partial g}{\partial r} \right]_{r_2} \sin \theta d\theta.
\end{aligned}$$

Численное решение задачи осуществлялось методом конечных элементов. Расчеты проводились для следующих значений чисел подобия:  $d/D = r'_1/r'_2 = 1/2$ ;  $Ho = 10$ ;  $Gr = 10^4$ ;  $Re = Pe = Re_m = 10^2$ ;  $Q_v = 5$ ;  $-5$ . На рис. 1, 2 приведены результаты расчетов при учете внутренних объемных источников тепла  $Q_v = 5$ . На рис. 1 приведены результаты расчетов в моменты времени: 1 –  $\tau = 2$ ; 2 –  $\tau = 3$ ; 3 –  $\tau = 5$ .

Теплообмен в слое жидкости осуществляется теплопроводностью. Температура жидкости изменяется в интервале  $g \in [0; 3,137]$ .

На рис. 1е приведены распределения чисел Нуссельта (на внутренней поверхности – красная линия, на внешней – зеленая). Числа Нуссельта на внутренней поверхности слоя принимают следующие значения: 1 –  $\overline{Nu}_1 = Nu_1 = -3,908$ ; 2 –  $\overline{Nu}_1 = Nu_1 = -5,343$ ; 3 –  $\overline{Nu}_1 = Nu_1 = -7,791$ . На внешней поверхности сферического слоя локальные и осредненные числа Нуссельта  $\overline{Nu}_2 = Nu_2 = -r_2 = -2$ .

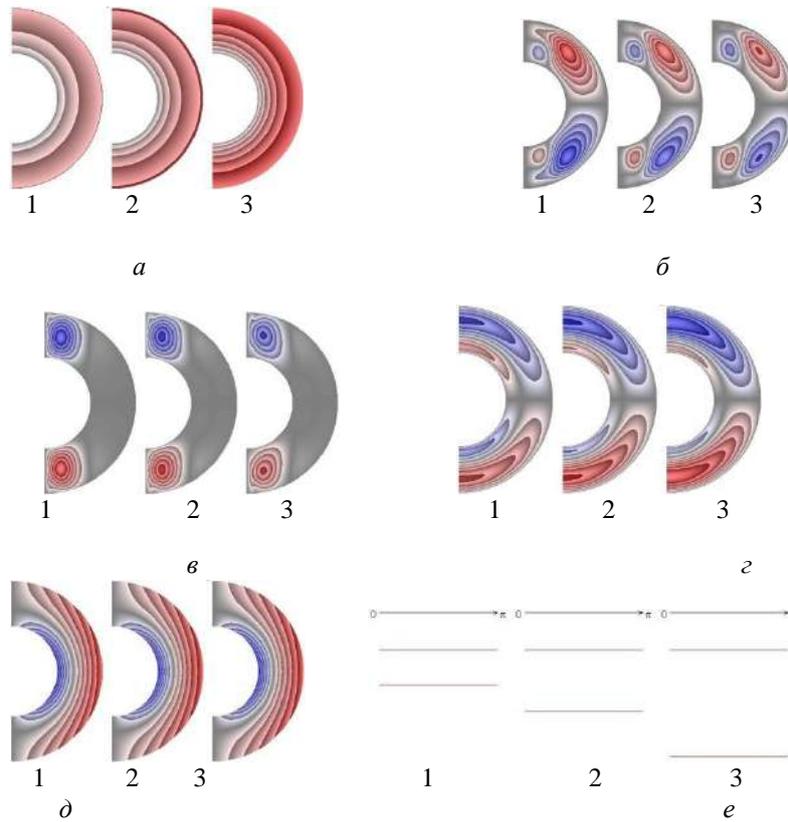
Теплообмен на внешней поверхности слоя интенсивнее, чем на внутренней. На рис. 1б, в приведены поля функции тока и вихря. Синий цвет (отрицательные значения) означает, что жидкость движется по часовой стрелке; красный цвет (положительные значения) – жидкость движется против часовой стрелки.

Поле вихря приведено на рис. 1в. Максимальные значения функции тока и вихря:  $|\Psi_{max}| = 5,30 \cdot 10^{-8}$ ;  $|\omega_{max}| = 1,85 \cdot 10^{-5}$ . Поля радиальной и меридиональной составляющих магнитной индукции приведены на рис. 1г, д.

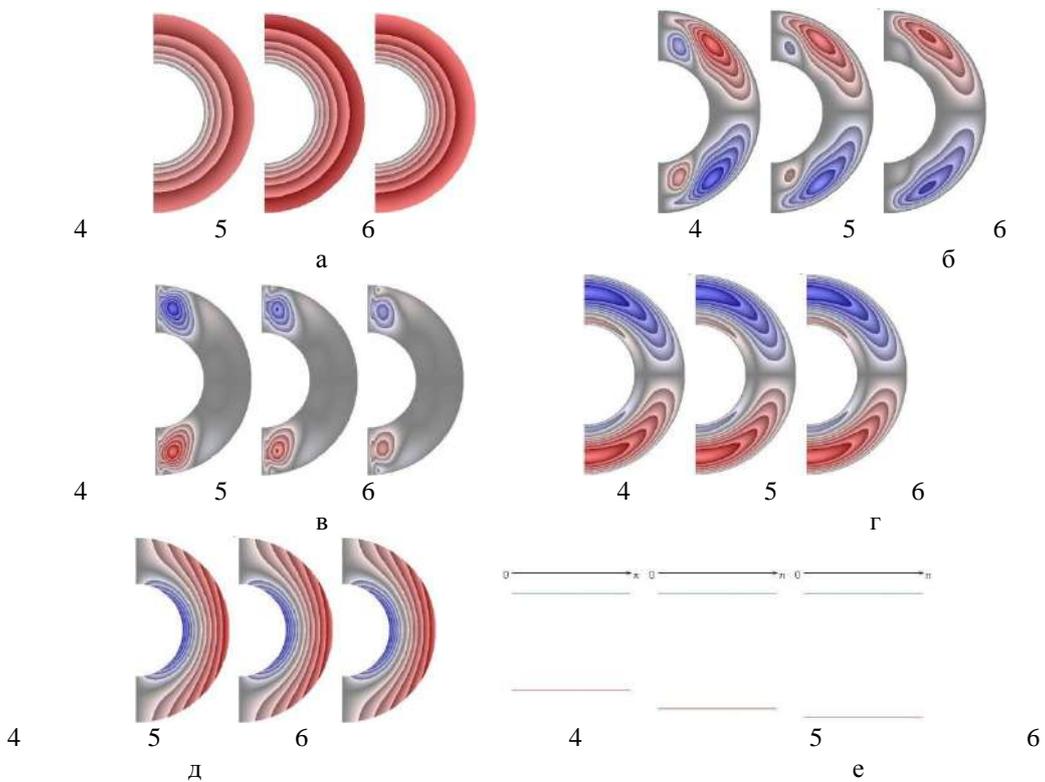
Максимальные значения радиальной и меридиональной составляющих магнитной индукции:  $|B_{rmax}| = 4,69 \cdot 10^{-4}$ ;  $|B_{\theta max}| = 10^{-2}$ .

На рис. 2 приведены результаты расчетов в моменты времени: 4 –  $\tau = 10$ ; 5 –  $\tau = 15$ ; 6 –  $\tau = 20$ .

$g \in [0; 5,671]$ . Числа Нуссельта: 4 –  $\overline{Nu}_1 = Nu_1 = -11,418$ ; 5 –  $\overline{Nu}_1 = Nu_1 = -13,234$ ; 6 –  $\overline{Nu}_1 = Nu_1 = -14,130$ .  $|\Psi_{max}| = 2,68 \cdot 10^{-8}$ ;  $|\omega_{max}| = 8,29 \cdot 10^{-6}$ .  $|B_{rmax}| = 4,83 \cdot 10^{-4}$ ;  $|B_{\theta max}| = 10^{-2}$ .

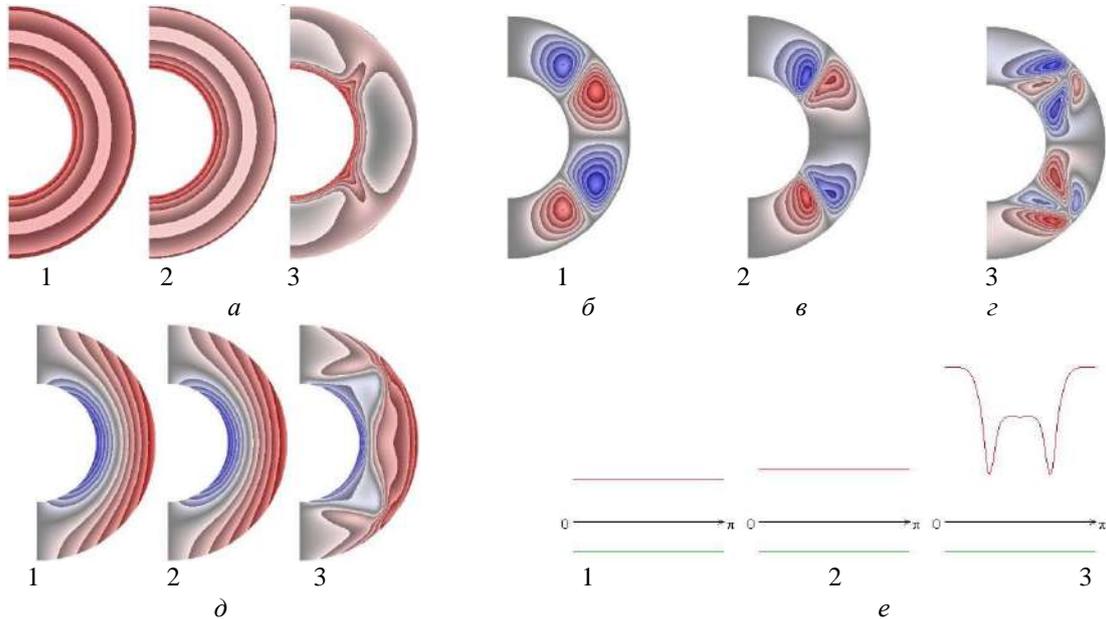


**Рис. 1.** Поля температуры (а), функции тока (б), вихря (в), радиальной (г) и меридиональной (д) составляющих магнитной индукции, распределение чисел Нуссельта (е)



**Рис. 2.** Поля температуры (а), функции тока (б), вихря (в), радиальной (г) и меридиональной (д) составляющих магнитной индукции, распределение чисел Нуссельта (е)

На рис. 3, 4 приведены результаты расчетов при учете внутренних объемных стоков тепла  $Q_v = -5$ . На рис. 3 приведены результаты расчетов в моменты времени: 1 –  $\tau = 2$ ; 2 –  $\tau = 3$ ; 3 –  $\tau = 5$ .



**Рис. 3.** Поля температуры (а), функции тока (б), вихря (в), радиальной (г) и меридиональной (д) составляющих магнитной индукции, распределение чисел Нуссельта (е)

При  $\tau = 2; 3$  теплообмен в жидкости осуществляется теплопроводностью (рис. 3а, е, 1, 2). С течением времени ( $\tau = 5$ ) в слое жидкости имеет место конвективный механизм передачи тепла (рис. 3а, е, 3). В поле температуры образуются три тепловые каверны. Учет стоков тепла приводит к значительным изменениям всех расчетных полей по сравнению с режимом, где учитывались источники тепла. Температура жидкости изменяется в интервале  $\mathcal{S} \in [-1,154; 0]$ .

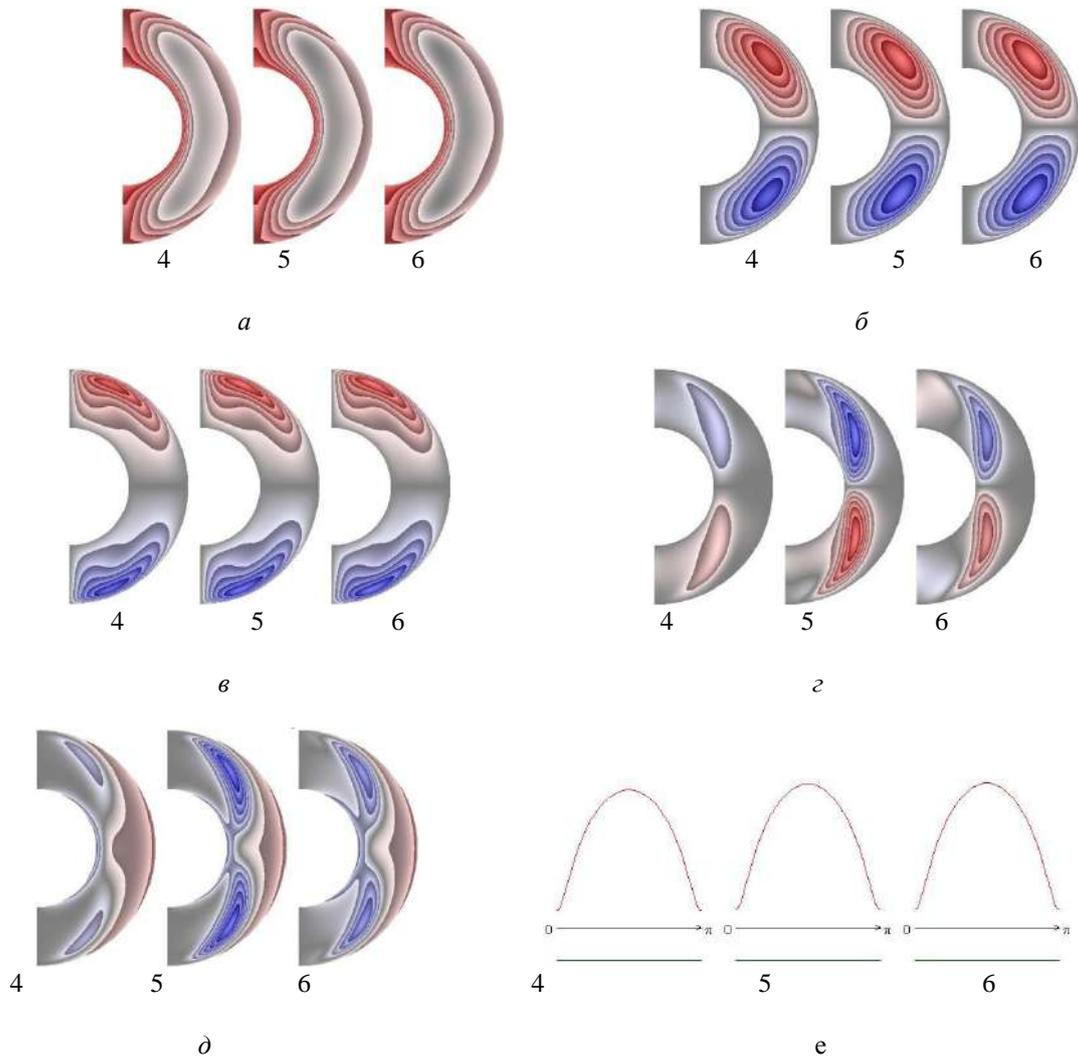
Числа Нуссельта принимают следующие значения: 1 –  $\overline{Nu}_1 = 2,850$ ; 2 –  $\overline{Nu}_1 = 3,444$ ; 3 –  $\overline{Nu}_1 = 6,925$ ;  $3,163 \leq Nu_1 \leq 10,228$ .  $|\Psi_{max}| = 9,93 \cdot 10^{-2}$ ;  $|\omega_{max}| = 3,20$ ;  $|B_{r,max}| = 4,23 \cdot 10^{-3}$ ;  $|B_{\theta,max}| = 10^{-2}$ .

На рис. 4 приведены результаты расчетов в моменты времени: 4 –  $\tau = 10$ ; 5 –  $\tau = 15$ ; 6 –  $\tau = 20$ .

Теплообмен для всех рассмотренных значений времени осуществляется конвекцией, распределение чисел Нуссельта на внутренней поверхности слоя жидкости изменяется по параболическому закону (рис. 4а, е).  $\mathcal{S} \in [-1,279; 0]$ .

Числа Нуссельта: 4 –  $\overline{Nu}_1 = 7,096$ ;  $1,106 \leq Nu_1 \leq 8,465$ ; 5 –  $\overline{Nu}_1 = 7,366$ ;  $1,111 \leq Nu_1 \leq 8,840$ ; 6 –  $\overline{Nu}_1 = 7,407$ ;  $1,113 \leq Nu_1 \leq 8,894$ . Теплообмен на внутренней поверхности слоя интенсивнее, чем на внешней.  $|\Psi_{max}| = 1,37 \cdot 10^{-1}$ ;  $|\omega_{max}| = 3,86$ ;  $|B_{r,max}| = 1,35 \cdot 10^{-2}$ ;  $B_{\theta} \in [-2,45 \cdot 10^{-2}; 10^{-2}]$ .

Полученные результаты позволяют проследить влияние внутренних источников (стоков) тепла на теплообмен электропроводной жидкости в сферическом слое при подводе тепла к внешней поверхности.



**Рис. 4.** Поля температуры (а), функции тока (б), вихря (в), радиальной (г) и меридиональной (д) составляющих магнитной индукции, распределение чисел Нуссельта (е)

### ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев С. В., Павлов К. И. Теплообмен и магнитная гидродинамика жидкости в сферическом слое при отводе тепла от внешней поверхности // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 5 (33). С. 32-40.
2. Solov'ev S. V. Simulation of Convective Heat Exchange in the Electrically Conducting Liquid in a Spherical Cavity. Algorithm of Solution // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015.

**ТЕПЛООБМЕН И МАГНИТНАЯ ГИДРОДИНАМИКА ЖИДКОСТИ  
В СФЕРИЧЕСКОМ СЛОЕ ПРИ ОТВОДЕ ТЕПЛА ОТ ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

**С. В. Соловьев, А. И. Павлова**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [solovjovsv@rambler.ru](mailto:solovjovsv@rambler.ru)

*Представлены результаты численного моделирования нестационарного теплообмена и магнитной гидродинамики электропроводной жидкости в сферическом concentрическом слое. Исследовано влияние внутренних источников/стоков тепла на структуру течения жидкости, поле температуры, магнитной индукции и распределение чисел Нуссельта с учетом диссипации джоулевой теплоты при отводе тепла от внешней сферы.*

Рассматривается нестационарный теплообмен электропроводной жидкости в сферическом слое. Исследовалось влияние внутренних источников (стоков) тепла на теплообмен и магнитную гидродинамику жидкости, находящейся в сильном магнитном поле ( $G = 10^3$ ;  $S = 10^4$ ). Учитывалась диссипация джоулевой теплоты.

Ускорение силы тяжести направлено по радиусу к центру сферического слоя. Математическая постановка задачи имеет вид [1, 2]

$$\frac{1}{\text{Ho}} \frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left[ \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \omega}{\partial r} - \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - \frac{\omega}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} + \omega \operatorname{ctg} \theta \frac{\partial \psi}{\partial r} \right] =$$

$$= \frac{1}{\operatorname{Re}} \left[ \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta^2} + \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r^2} \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - \frac{\omega}{r^2 \sin^2 \theta} \right] -$$

$$- \frac{\operatorname{Gr}}{\operatorname{Re}^2} \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta} + \frac{S}{\operatorname{Re}_m} \left[ B_r \frac{\partial^2 B_\theta}{\partial r^2} + 2 \frac{B_r}{r} \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + \frac{\partial B_r}{\partial r} \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + \frac{B_\theta}{r} \frac{\partial B_r}{\partial r} -$$

$$- \frac{B_r}{r} \frac{\partial^2 B_r}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial B_r}{\partial r} \frac{\partial B_r}{\partial \theta} + \frac{B_\theta}{r} \frac{\partial^2 B_\theta}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial B_\theta}{\partial r} \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} + \frac{2B_\theta}{r^2} \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} - \frac{B_\theta}{r^2} \frac{\partial^2 B_r}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial B_r}{\partial \theta} \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} \right];$$

$$(1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} - \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} = -\omega r \sin \theta;$$

$$(2)$$

$$\frac{1}{\text{Ho}} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left( \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} - \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta} \right) - \frac{1}{\operatorname{Pe}} \left( \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \theta^2} +$$

$$+ \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r^2} \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta} + Q_v \right) - \frac{J}{\operatorname{Pe}} \left( \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r} B_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial B_r}{\partial \theta} \right)^2 = 0;$$

$$(3)$$

$$\frac{1}{\text{Ho}} \frac{\partial B_r}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left[ \frac{B_\theta}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} + B_r \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r \partial \theta} + \frac{\partial B_r}{\partial \theta} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right] +$$

$$+ \frac{1}{\operatorname{Re}_m} \left[ \frac{\partial^2 B_r}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 B_r}{\partial \theta^2} + \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r^2} \frac{\partial B_r}{\partial \theta} - \frac{2B_r}{r^2} - \frac{2B_\theta}{r^2} \operatorname{ctg} \theta - \frac{2}{r^2} \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} \right];$$

$$(4)$$

$$\frac{1}{Ho} \frac{\partial B_\theta}{\partial \tau} = \frac{1}{r \sin \theta} \left[ -B_r \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} - \frac{\partial B_r}{\partial r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} - \frac{B_\theta}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r \partial \theta} + \frac{B_\theta}{r^2} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \frac{\partial B_\theta}{\partial r} \right] +$$

$$+ \frac{1}{Re_m} \left[ \frac{\partial^2 B_\theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial B_\theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 B_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\text{ctg } \theta}{r^2} \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} - \frac{B_\theta}{r^2 \sin^2 \theta} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial B_r}{\partial \theta} \right]. \quad (5)$$

$$\mathcal{G}|_{\Gamma_1} = 0; \quad -\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial r} \Big|_{\Gamma_2} = 1; \quad \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0, \pi} = 0; \quad \psi|_{\Gamma_{1,2}} = \psi|_{\theta=0, \pi} = \omega|_{\theta=0, \pi} = 0; \quad \frac{\partial B_r}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0, \pi} = \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0, \pi} = 0;$$

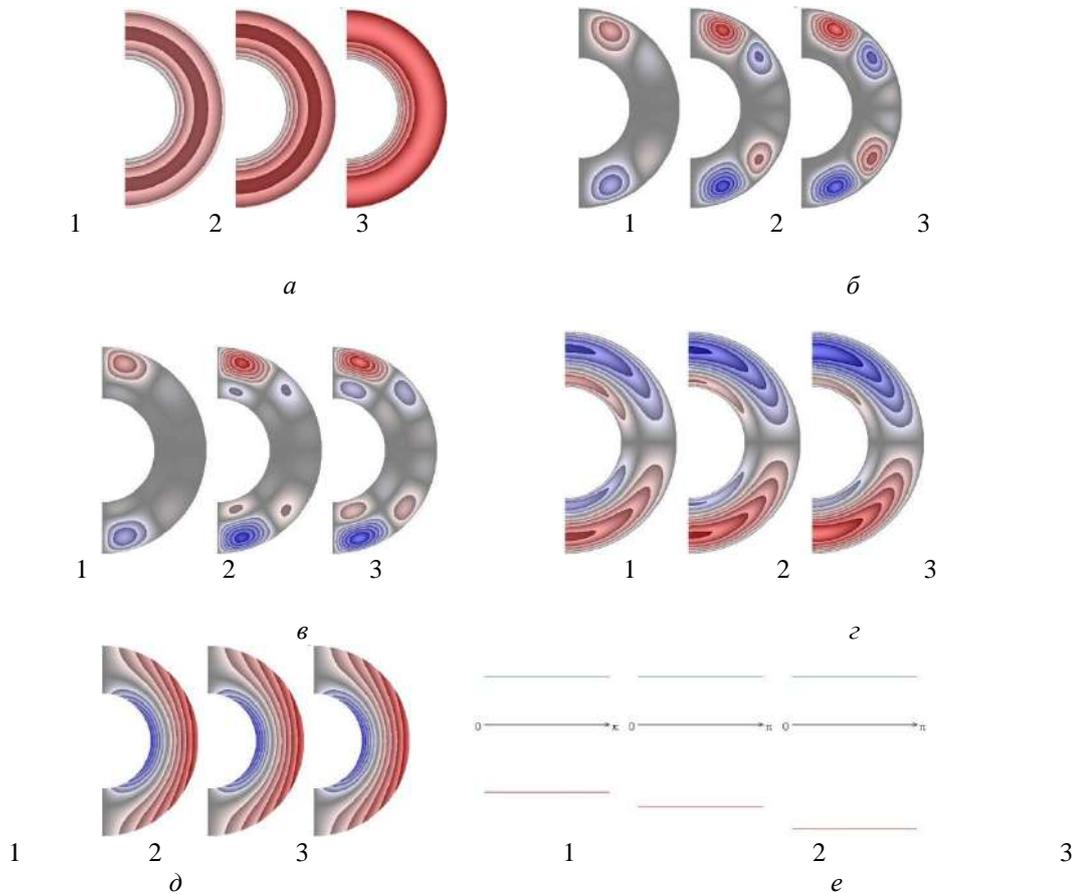
$$B_r|_{\Gamma_1} = B_r|_{\Gamma_2} = 0; \quad B_\theta|_{\Gamma_1} = -0,01 \sin \theta; \quad B_\theta|_{\Gamma_2} = 0,01 \sin \theta.$$

$$Nu_1 = \frac{\alpha_1 r_1'}{\lambda} = -\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial r} \Big|_{\Gamma_1}, \quad Nu_2 = \frac{\alpha_2 r_2'}{\lambda} = -r_2 \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial r} \Big|_{\Gamma_2}, \quad \overline{Nu}_1 = -\frac{1}{2} \int_0^\pi \left[ \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial r} \right]_{\Gamma_1} \sin \theta d\theta,$$

$$\overline{Nu}_2 = -\frac{r_2}{2} \int_0^\pi \left[ \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial r} \right]_{\Gamma_2} \sin \theta d\theta.$$

Численное решение задачи осуществлялось методом конечных элементов. Расчеты проводились для следующих значений чисел подобия:  $d/D = r_1'/r_2' = 1/2$ ;  $Ho = 10$ ;  $Gr = 10^4$ ;  $Re = Pe = Re_m = 10^2$ .

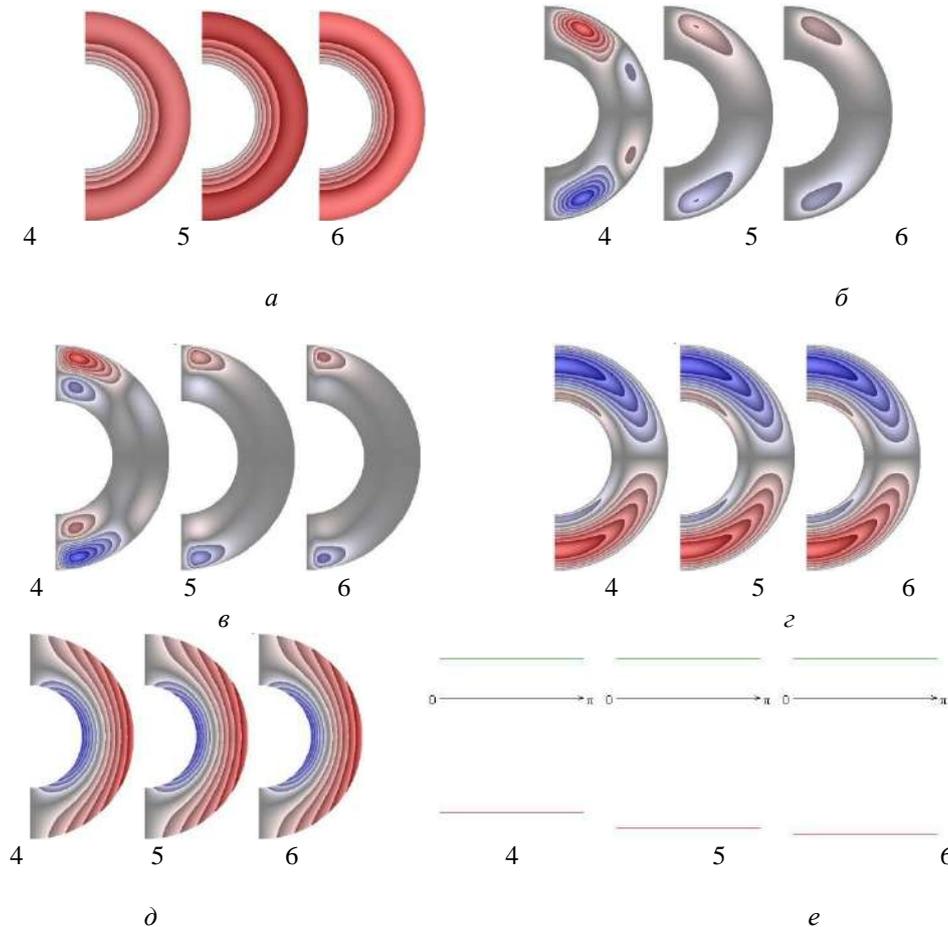
На рис. 1, 2 приведены результаты расчетов при учете внутренних источников тепла  $Q_v = 5$ . На рис. 1 приведены результаты расчетов в моменты времени: 1 –  $\tau = 2$ ; 2 –  $\tau = 3$ ; 3 –  $\tau = 5$ .



**Рис. 1.** Поля температуры (а), функции тока (б), вихря (в), радиальной (г) и меридиональной (д) составляющих магнитной индукции, распределение чисел Нуссельта (е)

Теплообмен в слое жидкости осуществляется теплопроводностью. Температура жидкости изменяется в интервале  $\vartheta \in [0; 1,128]$ . На рис. 1е приведены распределения чисел Нуссельта (на внутренней поверхности – красная линия, на внешней – зеленая). Числа Нуссельта на внутренней поверхности слоя принимают следующие значения: 1 –  $\overline{Nu}_1 = Nu_1 = -2,850$ ; 2 –  $\overline{Nu}_1 = Nu_1 = -3,444$ ; 3 –  $\overline{Nu}_1 = Nu_1 = -4,417$ . На внешней поверхности сферического слоя, в силу заданного для температуры граничного условия второго рода по закону Фурье, локальные и осредненные числа Нуссельта  $\overline{Nu}_2 = Nu_2 = r_2 = 2$ . Теплообмен на внешней поверхности слоя интенсивнее, чем на внутренней. На рис. 1б, в приведены поля функции тока и вихря. Синий цвет (отрицательные значения) означает, что жидкость движется по часовой стрелке; красный цвет (положительные значения) – жидкость движется против часовой стрелки. Поле вихря приведено на рис. 1в. Максимальные значения функции тока и вихря:  $|\Psi_{max}| = 1,07 \cdot 10^{-5}$ ;  $|\omega_{max}| = 6,98 \cdot 10^{-4}$ . Поля радиальной и меридиональной составляющих магнитной индукции приведены на рис. 1г, д. Максимальные значения радиальной и меридиональной составляющих магнитной индукции:  $|B_{rmax}| = 4,68 \cdot 10^{-4}$ ;  $|B_{\theta max}| = 10^{-2}$ .

На рис. 2 приведены результаты расчетов в моменты времени: 4 –  $\tau = 10$ ; 5 –  $\tau = 15$ ; 6 –  $\tau = 20$ .  $\vartheta \in [0; 2,068]$ . Числа Нуссельта: 4 –  $\overline{Nu}_1 = Nu_1 = -5,854$ ; 5 –  $\overline{Nu}_1 = Nu_1 = -6,573$ ; 6 –  $\overline{Nu}_1 = Nu_1 = -6,928$ .  $|\Psi_{max}| = 3,87 \cdot 10^{-7}$ ;  $|\omega_{max}| = 2,79 \cdot 10^{-5}$ .  $|B_{rmax}| = 4,83 \cdot 10^{-4}$ ;  $|B_{\theta max}| = 10^{-2}$ .

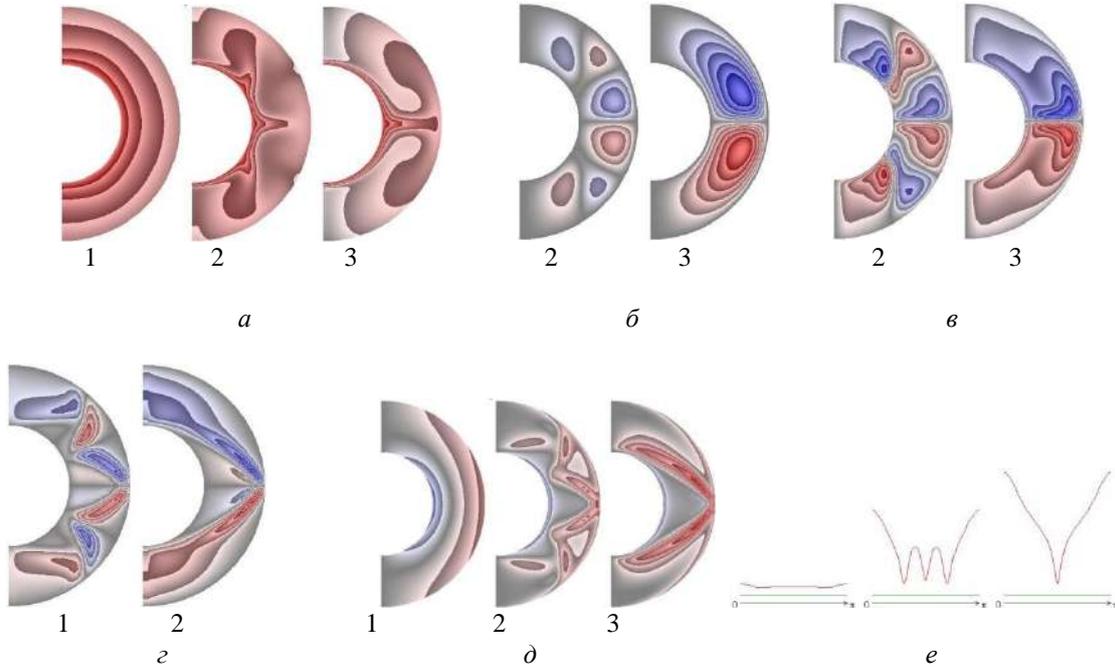


**Рис. 2.** Поля температуры (а), функции тока (б), вихря (в), радиальной (г) и меридиональной (д) составляющих магнитной индукции, распределение чисел Нуссельта (е)

На рис. 3, 4 приведены результаты расчетов при учете внутренних объемных стоков тепла  $Q_v = -5$ .

На рис. 3 приведены результаты расчетов в моменты времени: 1 –  $\tau = 2$ ; 2 –  $\tau = 3$ ; 3 –  $\tau = 5$ .

$\mathcal{G} \in [-2,622; 0]$ . Числа Нуссельта: 1 –  $\overline{Nu}_1 = 3,917$ ;  $3,725 \leq Nu_1 \leq 4,608$ ; 2 –  $\overline{Nu}_1 = 11,372$ ;  $4,745 \leq Nu_1 \leq 22,395$ ; 3 –  $\overline{Nu}_1 = 17,808$ ;  $4,889 \leq Nu_1 \leq 31,512$ .  $|\Psi_{max}| = 3,28 \cdot 10^{-1}$ ;  $|\omega_{max}| = 5,18$ ;  $|B_{rmax}| = 1,65 \cdot 10^{-2}$ ;  $B_\theta \in [-10^{-2}; 2,48 \cdot 10^{-2}]$ .

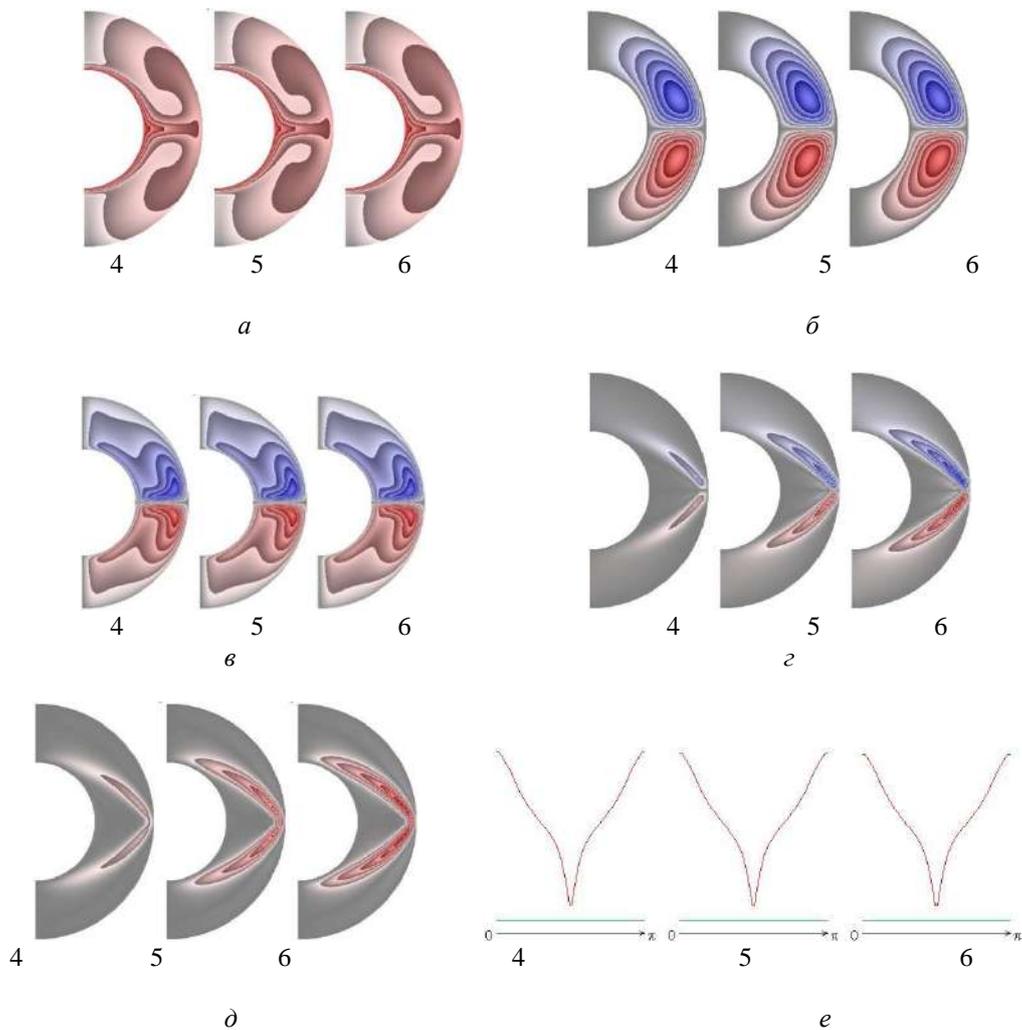


**Рис. 3.** Поля температуры (а), функции тока (б), вихря (в), радиальной (г) и меридиональной (д) составляющих магнитной индукции, распределение чисел Нуссельта (е)

На рис. 4 приведены результаты расчетов в моменты времени: 4 –  $\tau = 10$ ; 5 –  $\tau = 15$ ; 6 –  $\tau = 20$ .

Теплообмен осуществляется конвекцией.  $\mathcal{G} \in [-2,313; 0]$ . Числа Нуссельта: 4 –  $\overline{Nu}_1 = 15,274$ ;  $4,263 \leq Nu_1 \leq 27,098$ ; 5 –  $\overline{Nu}_1 = 15,089$ ;  $4,211 \leq Nu_1 \leq 26,811$ ; 6 –  $\overline{Nu}_1 = 15,073$ ;  $4,206 \leq Nu_1 \leq 26,787$ .  $|\Psi_{max}| = 3,34 \cdot 10^{-1}$ ;  $|\omega_{max}| = 4,96$ ;  $|B_{rmax}| = 5,56 \cdot 10^{-1}$ ;  $B_\theta \in [-4,32 \cdot 10^{-2}; 7,36 \cdot 10^{-1}]$ .

Полученные результаты позволяют проследить влияние внутренних источников (стоков) тепла на теплообмен электропроводной жидкости в сферическом слое при отводе тепла от внешней поверхности.



**Рис. 4.** Поля температуры (а), функции тока (б), вихря (в), радиальной (г) и меридиональной (д) составляющих магнитной индукции, распределение чисел Нуссельта (е)

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев С. В., Павлов К. И. Теплообмен и магнитная гидродинамика жидкости в сферическом слое при отводе тепла от внешней поверхности // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 5 (33). С. 32-40.
2. Solov'ev S. V. Simulation of Convective Heat Exchange in the Electrically Conducting Liquid in a Spherical Cavity. Algorithm of Solution // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. Vol. 88, Issue 6. P. 1416-1431.

## Секция «Физика конденсированных сред»

УДК 534

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В РОМБОЭДРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

М. Е. Адамова

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

e-mail: [008035@pnu.edu.ru](mailto:008035@pnu.edu.ru)

*В работе исследована анизотропия распространения объемных акустических волн в кристалле ромбоэдрической симметрии. Лучевая и нормальная поверхности отражают анизотропию упругих свойств и позволяют получить направления строго поперечных и продольных мод и акустических осей. Фазовые скорости для различных поляризованных акустических волн были получены из решения задачи о собственных значениях матрицы Кристофеля. Также были получены и другие волновые величины, характеризующие распространение акустических волн в среде: групповая скорость, вектор медленности и угол потока мощности. Полученные графики были выполнены в полярных координатах с использованием стандартных инструментов графики OriginPro. Все расчеты были выполнены для кристалла гематита, но метод применим для анализа упругих свойств в различных кристаллах.*

Детальное изучение распространения волн в анизотропных упругих средах представляет интерес в областях геофизики [1, 2], рассеяния фононов [3], для создания приборов акустооптики и акустоэлектроники [4, 5] и др.

Дальнейшее совершенствование таких технологий требует исследования более сложных геометрий распространения.

Распространение волн в анизотропных средах характеризуется следующими отличительными чертами [6]:

- фазовая и групповая скорости зависят от направления распространения
- в одном направлении распространяются три различно поляризованные волны: квазипродольная (L) и две квазипоперечные - быстрая (FT) и медленная (ST)
- в общем случае направление групповой скорости не соответствует направлению фазовой скорости, это приводит к существованию угла потока мощности - угла между направлениями фазовой и групповой скорости

Проблема аналитического исследования распространения волн в кристалле рассмотрена многими авторами [7-9]. С увеличением мощности ЭВМ становится возможным рутинный расчет всех основных волновых величин только из тензора упругости.

#### **Определение фазовой скорости и вектора медленности**

Задача распространения недисперсионных акустических фононов в анизотропном твердом теле состоит в решении уравнений Кристофеля (1) из теории упругости среды и сводится к нахождению собственных значений  $v_{(\alpha)}^2$  и собственных векторов  $\vec{p}_{(\alpha)}$  тензора Кристофеля [10]:

$$(\Gamma_{ik} - \delta_{ik}\rho v_{(\alpha)}^2) p_{(\alpha)k} = 0, \quad (1)$$

где предполагается суммирование по повторяющемуся индексу,  $p_k$  - компоненты единичного вектора смещения  $\vec{p}$ , - тензор Кристофеля,  $C_{ijkl}$  - тензор коэффициента упругости

четвертого порядка,  $l_i$  - компоненты единичного вектора распространения  $\vec{l}$ ,  $\rho$  – плотность кристалла,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера,  $\alpha = L, FT, ST$  – тип поляризации волны (мода).

Из характеристического уравнения (2) получаем три зависящих от направления решения для фазовых скоростей  $v_{(\alpha)}$ , соответствующих L, FT и ST, где предполагаем  $v_L > v_{FT} > v_{ST}$ .

$$\det|\Gamma_{ik} - \delta_{ik}\rho v_{(\alpha)}^2| = 0 \quad . \quad (2)$$

Также вводится вектор медленности  $\vec{s} = \frac{\vec{k}}{\omega} = \frac{\vec{l}}{v}$ , направленный вдоль волнового вектора  $\vec{k}$ ,  $s = v^{-1}$ .

Для каждой поляризации можно построить нормальную поверхность (график  $v(\vec{l})$ ) и поверхность медленности (график  $v^{-1}(\vec{l})$ ) – обе они отражают симметрию конкретного кристалла.

Рассмотрим следующий частный случай определения фазовой скорости и построения поверхности медленности для гематита - кристалла ромбоэдрической симметрии. В силу симметрии кристаллической решетки для ромбоэдрического кристалла можно уменьшить число  $C_{ijkl}$ -коэффициентов до 6 [12].

Плотность кристалла  $\rho = 5.29 \text{ г/см}^3$ . Значения упругих констант взяты из [13]:

$$C_{11} = 24.2 \cdot 10^{11} \text{ Эрг/см}^3, C_{12} = 5.5 \cdot 10^{11} \text{ Эрг/см}^3, C_{13} = 1.6 \cdot 10^{11} \text{ Эрг/см}^3, C_{14} = -1.32 \cdot 10^{11} \text{ Эрг/см}^3, C_{33} = 22.6 \cdot 10^{11} \text{ Эрг/см}^3, C_{44} = 8.5 \cdot 10^{11} \text{ Эрг/см}^3.$$

Компоненты тензора Кристоффеля:

$$\begin{aligned} \Gamma_{11} &= C_{11}l_1^2 + \frac{C_{11}-C_{12}}{2}l_2^2 + C_{44}l_3^2 + 2C_{14}l_3l_2; & \Gamma_{22} &= \frac{C_{11}-C_{12}}{2}l_1^2 + C_{11}l_2^2 + C_{44}l_3^2 - 2C_{14}l_3l_2; \\ \Gamma_{33} &= C_{44}(l_1^2 + l_2^2) + C_{33}l_3^2; & \Gamma_{12} = \Gamma_{21} &= \frac{C_{11}+C_{12}}{2}l_1l_2 + 2C_{14}l_3l_1; \\ \Gamma_{13} = \Gamma_{31} &= 2C_{14}l_1l_2 + (C_{13}+C_{44})l_3l_1; & \Gamma_{32} = \Gamma_{23} &= C_{14}(l_1^2 - l_2^2) + (C_{44}+C_{13})l_2l_3; \end{aligned} \quad (3)$$

Раскрывая определитель в уравнении (2) получаем кубическое уравнение  $x^3 + ax^2 + bx + c = 0$  относительно  $x = v^2$ , где коэффициенты выражаются через компоненты тензора Кристоффеля. Искомые  $v_\alpha$  можно получить, как  $\sqrt{x_\alpha}$  с помощью формулы Кардано для вещественных корней  $x_\alpha$  кубического уравнения с вышеописанными коэффициентами  $a, b$  и  $c$ .

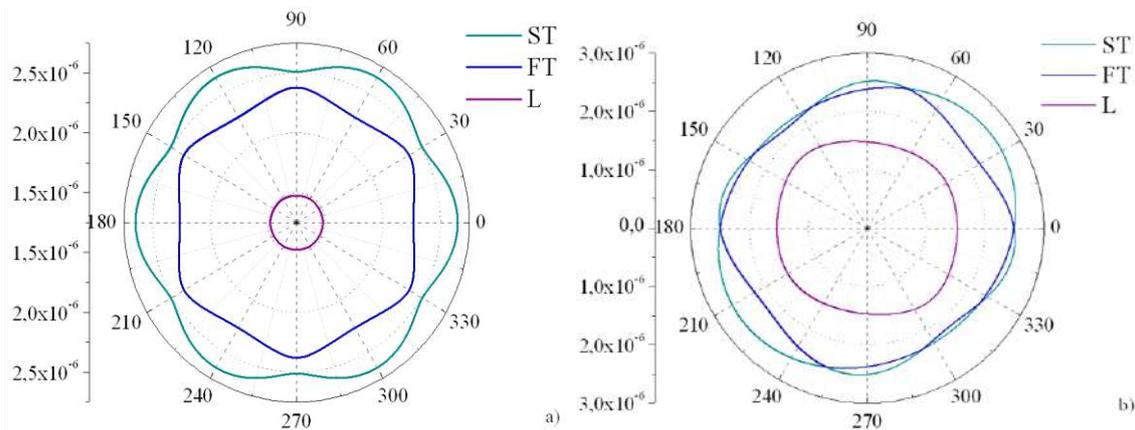
Графики на рис. 1 (сечения трехмерных поверхностей медленности) показывают связь между значением вектора медленности  $\vec{s}$  и углом распространения волны ( $l_1 = \sin\theta\cos\varphi, l_2 = \sin\theta\sin\varphi, l_3 = \cos\theta$ ).

Из рис. 1 видно, что поверхности медленности (как и нормальные поверхности) для конкретного кристалла отражают анизотропию его упругих свойств.

Поверхности медленности для различных мод не пересекаются, однако могут иметь точки соприкосновения [14].

Пример конических точек соприкосновения показан на рис. 1 (b) – кривые ST и FT выглядят на первый взгляд пересекающимися.

Таким точкам соответствуют направления, вдоль которых совпадают скорости поперечных волн, т.е. акустические оси. Топологические особенности конических и клиновых сингулярностей отмечены в [15, 16].



**Рис. 1.** Сечения поверхностей медленности  $v^{-1}(\theta, \phi)$  (с/см) для кристалла гематита плоскостями XY (a) и YZ (b)

### Определение групповой скорости и угла потока мощности

Групповая скорость волны может быть получена численно или аналитически из ее фазовой скорости [17].

Например, компоненту групповой скорости  $v_{gi}$  для недисперсионных сред можно определить из фазовой скорости по формуле. (4) [18]:

$$v_{gi} = \frac{\partial v}{\partial l_i} + \left( v - l_j \frac{\partial v}{\partial l_j} \right) l_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Групповую скорость можно также описать с помощью угла потока мощности  $\psi$  - угла между вектором  $\vec{n}$  нормали к поверхности медленности и направлением распространения волны  $\vec{l}$  в той же точке [19, 20]:  $v = v_g \cos \psi$ .

Определение угла потока мощности заключается в вычислении направления групповой скорости как вектора, нормального к поверхности медленности, а затем угла  $\psi$  из условия:

$$\cos \psi = \frac{(\vec{l}, \vec{n})}{|\vec{l}| \cdot |\vec{n}|}.$$

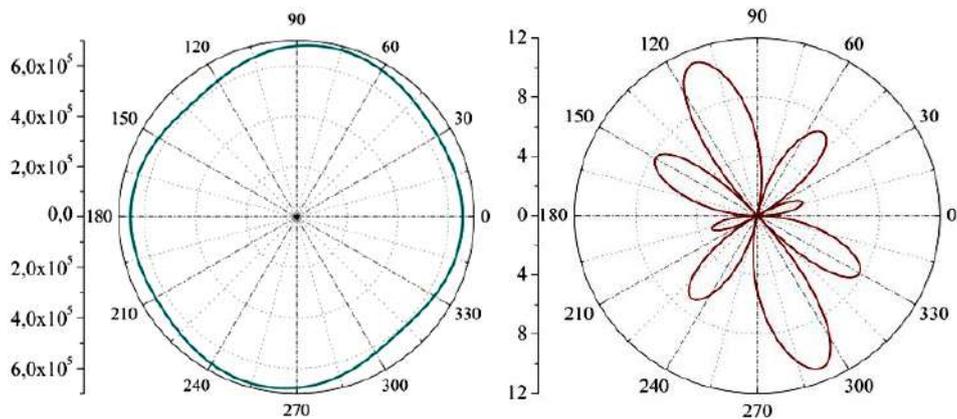
Для волн L, FT и ST зависимости угла потока мощности от угла распространения волны при с соответствующем сечении нормальной поверхности волны представлены на рисунках 2-3.

Нулевое значение угла потока мощности соответствует случаю, когда направления групповой и фазовой скоростей строго параллельны и, соответственно, вектор  $\vec{v}_g$  нормален к поверхности  $v(\vec{l})$ .

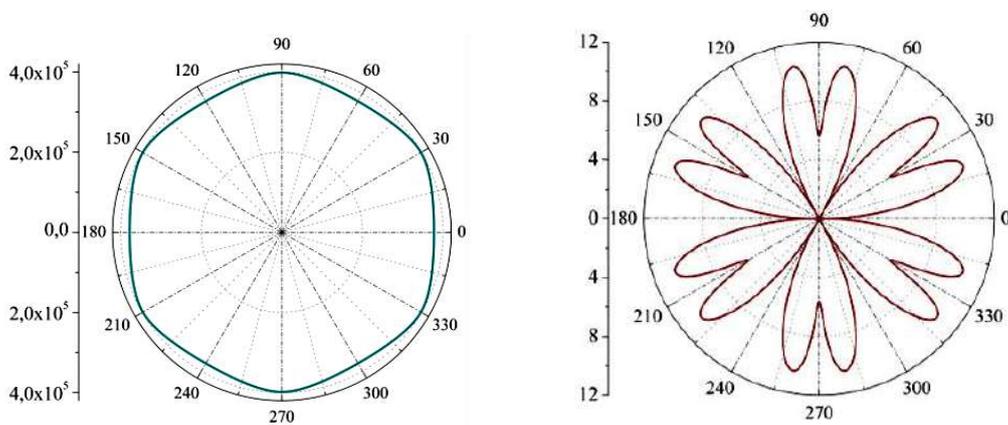
Направление групповой скорости  $\vec{n}$  также называется лучевым направлением. Совокупность всех векторов групповой скорости образует *волновую* (или лучевую) поверхность.

Поскольку  $\vec{l}$  и  $\vec{n}$  не параллельны, то в одних направлениях поток энергии концентрируется – явление фокусировки фононов [21-23], а в других ослабляется.

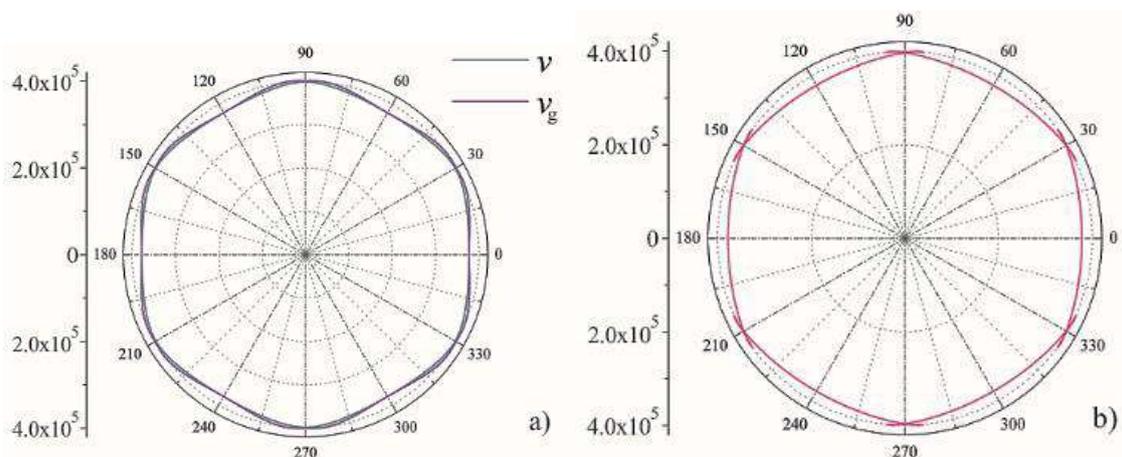
На рис. 4 (a) показано сечение нормальных поверхностей  $v(\vec{l})$  и  $v_g(\vec{l})$ . Сечения лучевых поверхностей  $v_g(\vec{n})$  показаны на рис. 4 (b).



**Рис. 2.** Сечение нормальной поверхности L-моды плоскостью YZ (см/с) и соответствующее значение угла потока мощности  $\psi$



**Рис. 3.** Сечение нормальной поверхности ST-моды плоскостью XY (см/с) и соответствующее значение угла потока мощности  $\psi$



**Рис. 4.** Для ST-моды сечения плоскостью XY (а) - нормальные поверхности  $v(\vec{l})$  и  $v_g(\vec{l})$ , (см/с) и (б) - лучевая поверхность  $v_g(\vec{n})$ , (см/с)

По сравнению с нормальной поверхностью, лучевая поверхность часто имеет гораздо более сложную геометрию – заданному лучевому направлению может соответствовать более одного значения групповой скорости [24]. На лучевой поверхности это выглядит в виде петель (рис. 6 (b)), соответствующих изменению кривизны поверхности медленности. Края петли соответствуют точкам перегиба поверхности медленности, где ее кривизна меняет знак.

### Заключение

Для ромбоэдрического кристалла гематита были рассчитаны фазовая и групповая скорости, а также угол отклонения потока мощности. Построены поверхности медленности, нормальные и лучевые поверхности. Анализ поверхностей медленности позволяет определить акустические оси с достаточной точностью. Полученные лучевые поверхности могут быть использованы в будущем для детального исследования явления фокусировки фононов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Kerner C., Dyer B., Worthington M. Wave propagation in a vertical transversely isotropic medium: field experiment and model study // *Geophysical Journal International*. 1989. Т. 97. №. 2. С. 295-309.
2. Pachano K. et al. Calculation of phase and group angles, slowness surfaces and ray tracing in transversely isotropic media // *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*. 2006. Т. 3. №. 2. С. 41-56.
3. Maris H. (ed.). *Phonon scattering in condensed matter*. – Springer Science & Business Media, 2012.
4. Gottlieb M. Design and fabrication of acousto-optic devices // *Chap*. 1994. Т. 4. С. 197-283.
5. Bogdanov S. V., Sapozhnikov V. K. An acoustooptic method for sound velocity measurements in strongly sound-absorbing materials // *Instruments and Experimental Techniques*. 2008. Т. 51. №. 4. С. 625-629.
6. Achenbach J. *Wave propagation in elastic solids*. – Elsevier, 2012.
7. V. Farra, "Improved First-Order Approximation of Group Velocities in Weakly Anisotropic Media", *Studia Geophysica et Geodaetica*, vol. 48, no. 1, pp. 199-213, 2004. Farra V. Improved first-order approximation of group velocities in weakly anisotropic media // *Studia Geophysica et Geodaetica*. – 2004. Т. 48. №. 1. С. 199-213.
8. Song L. P., Every A. G. Approximate formulae for acoustic wave group slownesses in weakly orthorhombic media // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2000. Т. 33. №. 17. С. L81.
9. Vavryčuk V. Elastodynamic and elastostatic Green tensors for homogeneous weak transversely isotropic media // *Geophysical Journal International*. 1997. Т. 130. №. 3. С. 786-800.
10. Федоров Ф. И. Теория упругих волн в кристаллах // Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1965.
11. Kochaev A. I., Brazhe R. A. Pure modes for elastic waves in crystals: mathematical modeling and search // *Acta mechanica*. 2011. Т. 220. №. 1-4. С. 199-207.
12. Speidel S. Parametric excitation of phonons in iron borate (FeBO<sub>3</sub>) // *Applied Physics A*. 1982. Т. 28. №. 1. С. 35-43.
13. Турицын С. К., Фалькович Г. Е. Устойчивость магнитоупругих солитонов и самофокусировка звука в антиферромагнетиках // *ЖЭТФ*. 1985. Т. 89. №. 1. С. 258.
14. Wolfe J. P. *Imaging phonons: acoustic wave propagation in solids*. Cambridge University Press, 2005.
15. Vavryčuk V. Parabolic lines and caustics in homogeneous weakly anisotropic solids // *Geophysical Journal International*. 2003. Т. 152. №. 2. С. 318-334.
16. Shuvalov A. L. Topological features of the polarization fields of plane acoustic waves in anisotropic media // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1998. Т. 454. №. 1979. С. 2911-2947.
17. Sharma M. D. Group velocity along general direction in a general anisotropic medium // *International Journal of Solids and Structures*. 2002. Т. 39. №. 12. С. 3277-3288.
18. Northrop G. A. Acoustic phonon anisotropy: Phonon focusing // *Computer Physics Communications*. 1982. Т. 28. №. 1. С. 103-107.
19. Muñoz-Santiburcio D., Hernández-Laguna A., Soto J. I. AWESoMe: A code for the calculation of phase and group velocities of acoustic waves in homogeneous solids // *Computer Physics Communications*. 2015. Т. 192. С. 272-277.

20. Jaeken J. W., Cottenier S. Solving the Christoffel equation: Phase and group velocities //Computer Physics Communications. 2016. Т. 207. С. 445-451.
21. Every A. G. General closed-form expressions for acoustic waves in elastically anisotropic solids //Physical Review B. 1980. Т. 22. №. 4. С. 1746.
22. Eisenmenger W. Phonon imaging //Le Journal de Physique Colloques. 1981. Т. 42. C6-201-C6-208.
23. Taylor B., Maris H. J., Elbaum C. Phonon focusing in solids //Physical Review Letters. 1969. Т. 23. №. 8. С. 416.
24. Vavryčuk V. Calculation of the slowness vector from the ray vector in anisotropic media //Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2006. Т. 462. №. 2067. С. 883-896.

УДК 537.5

## СТРУКТУРА МАГНЕТРОННЫХ ПЛЕНОК АРСЕНИДА КАДМИЯ

**Зо Хтет Аунг<sup>1</sup>, А. В. Кочура<sup>1</sup>, В. С. Захвалинский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет, г. Курск

<sup>2</sup> Белгородский государственный университет, г. Белгород

e-mail: [zawh0898@gmail.com](mailto:zawh0898@gmail.com)

*В данной работе представлена технология получения тонких плёнок дираковского полуметалла  $Cd_3As_2$ . Приведены результаты исследования тонких плёнок методами сканирующей электронной микроскопии, рамановской спектроскопии и дифракционного рентгеновского анализа. Показано, что полученные плёнки соответствуют стехиометрии  $Cd_3As_2$ , являются сплошными и имеют гранулированный характер.*

По результатам теоретических и экспериментальных исследований [1], было установлено, что  $Cd_3As_2$  относится к особому классу топологических изоляторов – дираковским полуметаллам, в которых носители заряда – дираковские фермионы имеют нулевую эффективную массу и подчиняются релятивистским законам движения. Подобные материалы в объеме проявляют свойства, которые ранее были обнаружены только в монослоях углерода – графене. Недавно было обнаружено, что пленки арсенида кадмия обладают низкотемпературной сверхпроводимостью [2, 3]. Это обуславливает значительный интерес к ним, как с точки зрения фундаментальной науки, так и с точки зрения потенциальных приложений.

Для напыления плёнок  $Cd_3As_2$  был применен магнетронный метод, поскольку он отличается достаточно равномерным распылением различных атомов мишени и слабой зависимостью процесса роста плёки от разницы давления их паров [4].

Осаждение тонких плёнок  $Cd_3As_2$  проводилось в вакуумной системе, оснащенной приставкой ВЧ – магнетронного неактивного напыления, в атмосфере аргона. Мишень изготавливалась из предварительно синтезированных монокристаллов  $Cd_3As_2$  малых размеров (не более 3 мм). Вначале кадмий (99.999%) и мышьяк (99.99%) в стехеометрическом соотношении сплавлялись в кварцевой графитизированной ампуле, откаченной до давления  $p < 0.01$  Па, при температуре 1100 К, которая на 10% превышает температуру плавления  $Cd_3As_2$  (994 К).

Длительность синтеза составляла 10 ч с последующим медленным охлаждением в градиенте трубчатой печи до комнатной температуры. Затем, полученный поликристаллический слиток измельчался, а порошок закладывался в кварцевый

контейнер с двойными стенками. Сама ампула и межстеночное пространство вакуумировались. После чего происходила перегонка (сублимация) арсенида кадмия в паровой фазе в горизонтальной двухзонной печи. Зона испарения нагревалась до 945 К, а в зоне осаждения имела температуру на 170 К ниже. Полученные монокристаллы были пластинчатыми или игольчатыми, имеющие характерную для микрокристаллов полиморфной модификации  $\alpha$ - $\text{Cd}_3\text{As}_2$  (пр. гр.  $I4_1cd$ ) форму в виде пирамид и призм [5, 6].

В качестве подложек для напыления использовались монокристаллические полированные ориентированные пластины кремния  $p$ -Si(100) ( $p = 2$  Ом см), лейкосап-фира  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3(001)$  и титаната стронция  $\text{SrTiO}_3(001)$ . Следует отметить, что кристаллографические плоскости (0001)  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  и (224)  $\alpha$ - $\text{Cd}_3\text{As}_2$  структурно близки – расхождение их усредненного межатомного (межузельного) расстояния 6% (4.75 и 4.49 Å соответственно), что является предпосылкой для получения ориентированных пленок. Хорошее соответствие параметров решетки наблюдается так же для  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  и  $\text{SrTiO}_3$  [7]. Для различных ориентаций такого совпадения кристаллической структуры Si и  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  не наблюдается, поэтому удаление аморфного слоя естественного оксида с подложек из Si перед напылением не проводилось. Всего были получены три группы пленок  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ : без нагрева подложек, при нагреве подложек 520 К и отожженные в атмосфере аргона при температуре 520 К после напыления без нагрева подложек.

Рентгенофазовый анализ (РФА) плёнок был выполнен с помощью рентгеновского дифрактометра GBC EMMA при комнатной температуре. На примере образца (рис. 1) хорошо заметно, что используемая РФА методика успешно может быть применена для идентификации кристаллической решетки тонких пленок  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  с толщиной в несколько десятков нанометров. Анализ полученной дифрактограммы показал, что  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  кристаллизуется в тетрагональной  $\alpha$ -фазе. В области до 45 градусов проявляются дифракции от 10 ее плоскостей. То есть, полученная пленка является поликристаллической со случайной ориентацией кристаллитов. Наиболее интенсивные пики на дифрактограмме принадлежат кристаллическому алюминию, из которого состоит держатель дифрактометра. Избежать появления этих пиков не удастся из-за приборных ограничений – минимальный размер пятна рентгеновского излучения превышает размер пленки.

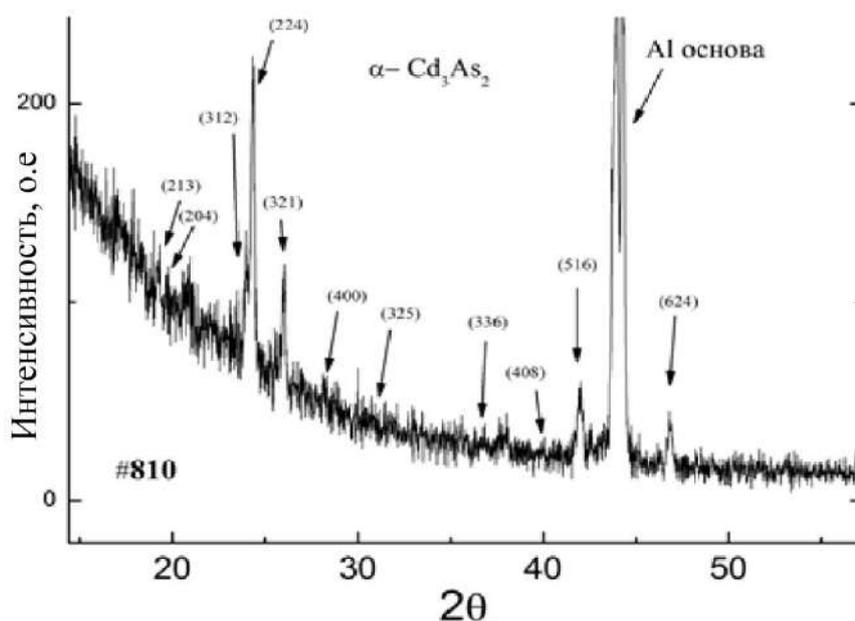
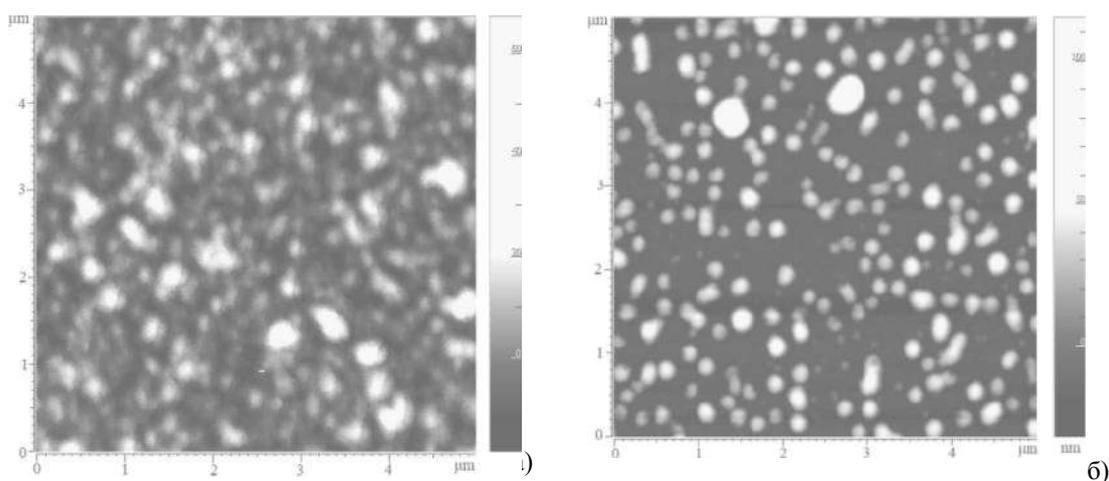


Рис. 1. Дифрактограммы пленки  $\alpha$ - $\text{Cd}_3\text{As}_2$

Для образцов на подложках из кремния на дифрактограммах не обнаруживаются пики от его кристаллографических плоскостей. У образцов с подложкой из сапфира, наоборот, несколько интенсивных пиков присутствует (например около  $33^\circ$  на рис.1). Таким образом, по результатам РФА установлено формирование в результате магнетронного напыления на различные подложки поликристаллических пленок  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ .

Для исследования структуры образцов, их состава и распределения элементов на поверхности использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JSM-6610LV (Jeol) с приставкой для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) X-MaxN (Oxford Instruments). При съемке применялись детекторы вторичных и обратно рассеянных электронов.



**Рис. 2.** АСМ изображение поверхности тонких пленок на подложке  $\text{SrTiO}_3$ :  
(а) отожженной, (б) неотожженной.

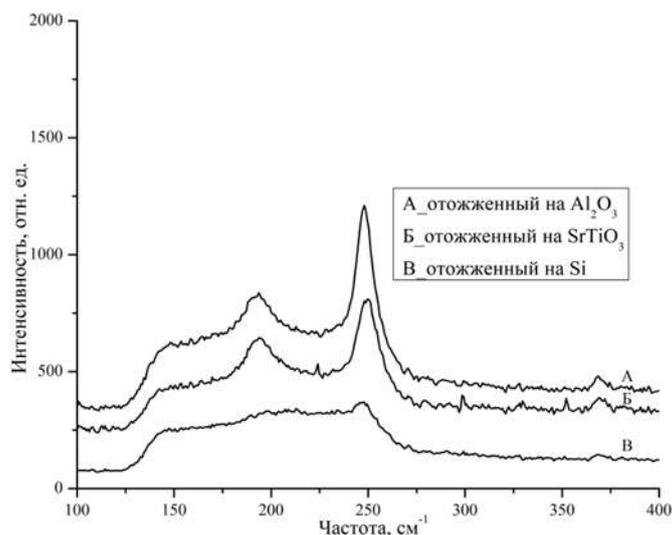
Пленки демонстрируют рост по Странскому-Карстанову, с первоначальным напылением однородного тонкого слоя и последующим ростом с интенсивным зародышеобразованием. Состав пленок соответствовал стехиометрическому в пределах ошибки измерения и был равномерным, как это наблюдается на картах распределения атомов Cd и As.

На рис. 2 показано типичное изображение, полученное с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ), для тонких пленок  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  без отжига и после него на подложке из титаната стронция. Результаты сканирующей зондовой микроскопии показывают, что пленки являются сплошными с гранулированной структурой поверхности со средним размером гранул, зависящим от материала подложки и степени отжига. Так для неотожженных пленок на Si он составлял 120 нм, а после отжига уменьшался до 40 нм.

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) исследуемых плёнок были измерены при комнатной температуре с помощью конфокального спектрометра КРС OmegaScoreTM (AIST-NT Inc) с длиной волны лазерного излучения 532 нм, мощностью 50 мВт и размером пятна сфокусированного света на поверхности образца около 500 нм. Спектральное разрешение прибора составляло  $0.8 \text{ см}^{-1}$ .

Исследование тонких плёнок с помощью спектров КРС в дальней ИК – области (рис. 3) подтверждает, то, что пленки формируются из арсенида кадмия. Два широких пика с положением около  $198 \text{ см}^{-1}$  и  $250 \text{ см}^{-1}$ , природа которых не связана с классическим механизмом неупругого рассеяния света часто используют для характеристики наноструктур, содержащих  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ . На рисунке 3 приводятся спектры КРС измеренный в отдельных областях кристалла для образца. Для кристаллической структуры  $\alpha\text{-Cd}_3\text{As}_2$

экспериментальные спектры КРС в области  $\omega > 100 \text{ см}^{-1}$  содержали только три сильных колебательных моды, располагающихся вблизи  $140, 195$  и  $250 \text{ см}^{-1}$ . К сожалению, из-за особенностей используемого оборудования КРС спектры измерены только при  $\omega > 140 \text{ см}^{-1}$ .



**Рис. 3.** Спектры комбинационного рассеяния света для образца области фаз  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ , измеренные с различным временем накопления сигнала

В этой области для  $\alpha\text{-Cd}_3\text{As}_2$  должны наблюдаться три широких пика, не являющихся проявлением классического механизма неупругого рассеяния света: около  $140; 195$  и  $250 \text{ см}^{-1}$ .

Их появление обусловлено особенностям зонной структуры  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ , и объясняется с помощью трехзонной модели с учетом как межзонных, так и внутризонных переходов. В качестве эталонного образца для сравнения мы использовали совершенный игольчатый монокристалл  $\alpha\text{-(Cd,Zn)}_3\text{As}_2$ , выращенный из паровой фазы. Так как общий вид спектров монокристаллического и пленочного образцов схожи, то, можно заключить, что полученные пленки имеют высокой степень кристалличности с тетрагональной структурой, аналогичной объемным кристаллам  $\alpha\text{-Cd}_3\text{As}_2$ .

Таким образом, методами рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, совмещенной с энерго-дисперсионным анализом, спектроскопии комбинационного рассеяния света выполнено исследование состава и структурных свойств тонких наноструктурированных пленок  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ .

Окончательным практическим результатом является получение и исследование структурных свойств нанокompозитных пленок на основе  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ , которые можно использовать для наблюдения и практического использования эффектов, связанных с нетривиальной зонной топологией и реализацией управляемого спинзависимого транспорта носителей заряда для сверхбыстродействующих электронных устройств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Crassee I., Sankar R., Lee W.-L. et.al. 3D Dirac semimetal  $\text{Cd}_3\text{As}_2$ : A review of material properties // *Physical Review Materials*. 2018. Vol. 2. Iss. 12. P. 120302.
2. Suslov A. V., Davydov A. B., Oveshnikov L. N. et.al. Observation of subkelvin superconductivity in  $\text{Cd}_3\text{As}_2$  thin films // *Physical Review B*. 2019. V. 99. iss. 9. p. 094512.

3. Давыдов А. Б., Овешников Л. Н., Суслов А. В. и др. Сверхпроводимость в тонких пленках дираковского полуметалла  $Cd_3As_2$  // Физика твердого тела. 2020. Т. 62. Вып. 3. С. 369-372.
4. Кочура А. В., Захвалинский В. С., Зо Хтет Аунг и др. Синтез магнетронным распылением и структура тонких пленок арсенида кадмия // Неорганические материалы. 2019. Т. 55. № 9. С. 933-940.
5. Bergerhoff G., Brown I. D. Crystallographic databases / Eds. Allen F. H. et. Al. Chester: International Union of Crystallography, 1987.
6. Kochura A.V., Oveshnikov L.N., Kuzmenko A.P. et.al. Vapor-phase synthesis and magnetoresistance of  $(Cd_{1-x}Zn_x)_3As_2$  ( $x = 0.007$ ) single crystals // JETP Letters. 2019. V. 109. Iss. 3. P. 175-179.
7. Nakazawa Yu., Uchida M., Nishihaya Sh. et.al. Structural characterisation of high-mobility  $Cd_3As_2$  films crystallised on  $SrTiO_3$  // Scientific Reports. 2018. V. 8. P. 2244.

УДК 533.9

## САМООРГАНИЗАЦИЯ НАНОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР В КОЛЛОИДНОЙ УГЛЕРОДНОЙ СИСТЕМЕ В СТАБИЛИЗИРОВАННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

**Ней Вин Аунг, В. А. Мамонтов, М. А. Пугачевский, Мьо Мин Тан**

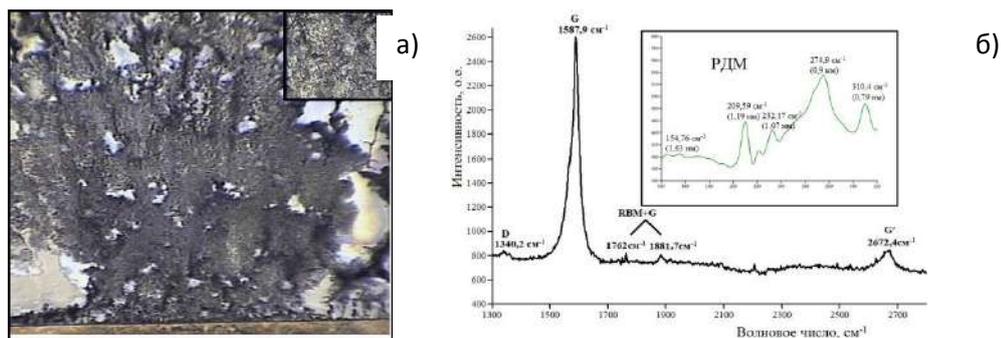
<sup>1</sup>Юго-Западный государственный университет, г. Курск  
e-mail: [naywinaungnano@gmail.com](mailto:naywinaungnano@gmail.com)

*Изучены особенности и закономерности процессов самосборки и самоорганизации в диффузионно-ограниченных условиях (методом из капли) водных коллоидных растворов углеродных наночастиц под действием постоянного электрического поля. Обнаружено формирование пленочных структур из коллоидных растворов углеродных наночастиц в процессе испарения капли в однородном электрическом поле. Структурная характеристика тонких пленок на основе углерода, содержащих внедренные кластеры углеродных наночастиц, была использована для определения механизма образования нанокompозитных углеродных материалов, осажденных с использованием внешнего источника электроэнергии.*

Углеродные наноструктуры, такие как фуллерены, нанотрубки и наностержни, исследуются в течение последних нескольких лет благодаря их выдающимся электронным, механическим и электрохимическим свойствам [1]. Тонкие пленки, состоящие из углеродных наночастиц, представляют собой новый класс материалов с исключительными электрическими, механическими и оптическими свойствами, которые могут быть применены во многих приложениях [3]. Кроме того, благодаря высокой прозрачности в видимом диапазоне, а также способности поглощать большую часть инфракрасного спектра, углеродные наночастицы могут быть использованы как эффективные сенсоры инфракрасного излучения.

В данной работе изучались углеродные системы на базе углеродных трубок и наночастиц УНТ TUBALL™, производимые ООО «МНЦТЭ», по технологии компании OCSiAl. Образцы УНТ (TUBALL™, OCSiAl) в исходном состоянии (технический паспорт производителя для TUBALL BATT™: 0,2%, номер партии 19H05.N1.003) в коллоидной системе ( $H_2O$ -98,8%, ОУНТ-0,10% , PVP-0,10%). Для получения рабочей коллоидной системы исходный раствор углерода и дистиллированную воду (0.03 % v/v) смешивали в течение 45 минут с ультразвуковой ванной (Quick 218). Этот раствор центрифугировали с помощью miniSpin (Eppendorf AG 5452, 22331 Hamburg) и декантировали 90% верхней час-

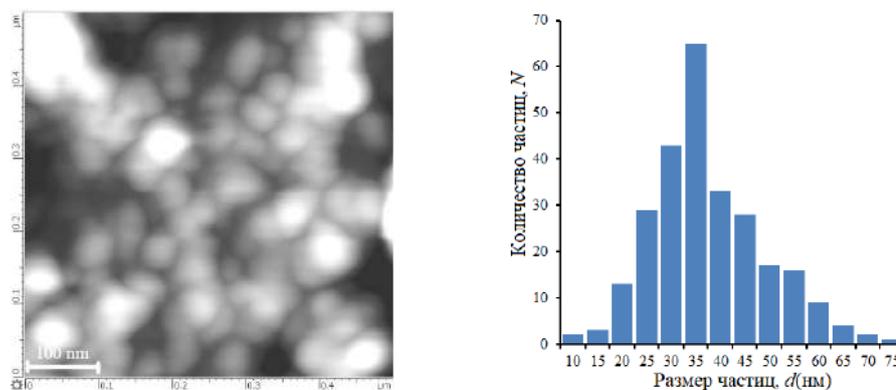
ти объема. В эксперименте коллоидный раствор с помощью пиктометра наносился (методом из капли) на поверхность кремниевой подложки между предварительно напыленными ленточными электродами. После нанесения коллоидные капли на кремниевой подложке имели следующие размеры: высота –  $h_k = 500$  мкм, диаметр –  $d_k = 1000$  мкм. Процесс испарения капли происходил под действием Ленц-Джоулева тепла при прохождении электрического тока в течение 4 мин. Процесс испарения капли продолжался 5÷10 мин в электрическом поле в зависимости от величины протекающего тока. На рис.1,а представлено конфокальное изображение синтезированных электрофоретическим методом углеродных нанопленок.



**Рис. 1.** (а) Конфокальное изображение углеродных наноструктур в направлении напряженности статического электрического поля. (б) КРС с разрешением в области тангенциальный мод (D, G) из коллоидной углеродной системы после испарения. На вставке в области РДМ

В экспериментах изучались процессы наноструктурирования в испаряющейся капле на поверхности подложки в постоянном однородном электрическом поле. Постоянное напряжение изменяемой от 10 до 20 В, подавалось на электроды от стабилизированного источника питания, программируемого АКТАКОМ АТН-1351 (300 В/0.4 А). Структура полученных углеродных нанопленок была исследована с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). Согласно результатом гранулометрического анализа размер наночастиц формирующих нанопленку составлял от 10 до 80 нм, со средним количественным размером 33 нм.

Анализ спектров комбинационного рассеяния (КРС) на рисунке 1,б углеродных наночастиц из коллоидной углеродной системы после испарения в электрическом поле, осажденных на подложку из окисленного кремния, показывает присутствие полос G- (~1588 см<sup>-1</sup>) и D- (~1340 см<sup>-1</sup>), указывающих на графитовую структуру синтезированных нанотрубок.



**Рис. 2.** АСМ изображения из коллоидных растворов, средний размер структуры пленки - 39 нм

Подразумевается, что полосы D и G связаны с углеродными связями  $sp^3$  и  $sp^2$  соответственно. Интенсивность и форма этих пиков дают информацию об электрических свойствах углерода. Низкое соотношение интенсивностей полос D и G предполагает наличие высококачественных углеродных объектов с низким уровнем дефектов ( $I_G > I_D$ ). На вставке КРС проявляется наличие нескольких пиков ( $200 - 350 \text{ см}^{-1}$ ) рамановского сдвига. Считается, что эти пики проявляются из-за радиальных дышащих мод (РДМ). Используя эмпирическую зависимость между частотой пика рамановского РДМ  $\omega_{\text{РДМ}}$  и диаметром  $d_{\text{ОУНТ}}$  для ОУНТ NiPCO,  $\omega_{\text{РДМ}} = \frac{239(\text{см}^{-1} \text{ нм})}{d_{\text{ОУНТ}}(\text{нм})} + 8,5 \text{ см}^{-1}$ , можно оценить диаметры объектов, демонстрирующих спектральные пики РДМ. Например, пик РДМ при  $209,59 \text{ см}^{-1}$  на вставке 2,б соответствует отдельному объекту диаметром  $1,19 \text{ нм}$ .

Таким образом, метод электрофоретического синтеза позволяет получать нанопленки на основе углеродных наночастиц с высокой степенью сплошности. Данная технология может быть применена с целью получения пленочных материалов для инфракрасных сенсоров с отличительными оптическими и эксплуатационными характеристиками.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аунг Н. В. Электропроводность структурированных углеродных нанотрубок в постоянном электрическом поле / Аунг Н. В., Тан М. М., Пугачевский М. А., Родионов В. В., Кузьменко А. П. Миргород Ю. А, Тет Пью Наинг // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия техники и технологии. 2020. Т. 10. № 1. С.86-98.
2. Chowdhury, Hossain, Farzana A. Graphene oxide/carbon nanoparticle thin film based IR detector: Surface properties and device characterization // AIP Advances. 2015. Vol. 5. P. 107228(1) – 107228(12).

УДК 539.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНОНИОБАТА-СКАНДОНИОБАТА СВИНЦА МЕТОДОМ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

**С. В. Барышников, А. А. Антонов**

Благовещенский государственный педагогический университет, г. Благовещенск  
e-mail: [svbar2003@list.ru](mailto:svbar2003@list.ru)

*Представлены результаты исследования нелинейных свойств магнониобата-скандониобата свинца (PMN-PSN). Показано, что в температурном интервале 306 К – 459 К (PMN)<sub>0,55</sub>-(PSN)<sub>0,45</sub> находится в «суперпараэлектрическом» состоянии. Ниже 306 К в (PMN)<sub>0,55</sub>-(PSN)<sub>0,45</sub> электрическим полем индуцируется сегнетоэлектрическое состояние, а выше 459 К (PMN)<sub>0,55</sub>-(PSN)<sub>0,45</sub> переходит в параэлектрическое состояние.*

Релаксорные сегнетоэлектрики представляют собой неупорядоченные структуры, у которых фазовый переход в полярное состояние и температурные аномалии всех физических свойств значительно размыты в широкой области температур [1]. По современным представлениям такое поведение определяется существованием параэлектрической матрицы, в которой присутствуют полярные нанообласти, имеющие размеры от 10 до 100 нм [1-3]. Кластеры зарождаются при температуре Бёрнса, которая существенно выше температуры максимума  $\epsilon'(T)$ . К примеру, для  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  пик диэлектрической про-

нищаемости наблюдается при  $T_m \approx 250 - 260 \text{ K}$ , а температура Бёрнса  $T_B \approx 600 - 650 \text{ K}$ . Сегнетоэлектрики с такими размытыми фазовыми переходами представляют собой структуры, в которых отсутствует дальнедействующее упорядочение дипольных моментов, но при низких температурах для составов на основе PMN имеет место ближний сегнетоэлектрический порядок. Приложение электрического поля приводит к ориентации локальных дипольных моментов и к появлению ненулевой общей поляризации образца [2]. Отсутствие сформированной доменной структуры в области релаксорного состояния делает такие среды восприимчивыми к внешним воздействиям, таким как электрическое поле и деформация. При воздействии электрического поля в релаксорах может возникать индуцированный сегнетоэлектрический переход, в связи с чем они обладают большой диэлектрической нелинейностью.

Одним из наиболее чувствительных методов исследования зависимости  $\varepsilon'(E)$  и определения присутствия полярной фазы в сегнетоэлектриках является метод нелинейной диэлектрической спектроскопии.

В сегнетоэлектриках при приложении гармонического электрического поля  $E = E_0 \sin(\omega t)$ , меньше коэрцитивного, электрическое смещение  $D$  можно разложить в степенной ряд по  $E$  [4.5]:

$$D = P_s + \varepsilon \frac{\partial P}{\partial E} E + \frac{1}{2} \varepsilon^2 \frac{\partial^2 P}{\partial E^2} E^2 + \frac{1}{6} \varepsilon^3 \frac{\partial^3 P}{\partial E^3} E^3 + \dots = P_s + \varepsilon E + \varepsilon_2 E^2 + \varepsilon_3 E^3 \dots, \quad (1)$$

где  $P_s$  – спонтанная поляризация, величина  $\varepsilon$  соответствует линейной диэлектрической проницаемости, а  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$  диэлектрическим проницаемостям второго и третьего порядков, соответственно. Нелинейная зависимость  $D$  от  $E$  приводит к тому, что в токе образца будут присутствовать высшие гармоники на частотах  $2\omega$ ,  $3\omega$ , ...  $n\omega$ , амплитуды которых будут пропорциональны  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$ , ...,  $\varepsilon_n$  соответственно.

В сегнетоэлектрической фазе, имеющей выделенное направление, большую амплитуду имеют нечетные гармоники, из которых самая большая третья. Как было показано в [5], для сегнетоэлектриков с фазовым переходом первого рода ток третьей гармоники будет определяться соотношением:

$$I_{3\omega} = 3SE_0^3 \left[ (\beta + 10\gamma P_s^2) \omega \chi^4 + \frac{5}{2} \gamma \omega \chi^6 E_0^2 \right] \cos(3\omega t), \quad (2)$$

где  $\chi$  – линейная диэлектрическая восприимчивость,  $P_s$  – спонтанная поляризация,  $\beta$  и  $\gamma$  – коэффициенты разложения Ландау,  $S$  – площадь образца. Учитывая выражение для тока на частоте  $\omega$ ,  $I_\omega = E_0 S \omega \chi \cos(\omega t)$ , получим коэффициент третьей гармоники, который определяется как отношение амплитуд тока на частоте  $3\omega$  к току основной частоты  $\omega$  ( $\gamma_{3\omega} = I_{3\omega} / I_\omega$ ):

$$\gamma_{3\omega} = 3 \left[ (\beta + 10\gamma P_s^2) \chi^3 E_0^2 + \frac{5}{2} \gamma \chi^5 E_0^4 \right] \quad (3)$$

Из (3) следует, что коэффициент третьей гармоники  $\gamma_{3\omega}$  значительно возрастает в полярной фазе за счет возникновения спонтанной поляризации и имеет минимум в точке фазового перехода за счет обращения  $P_s$  в ноль. Таким образом, по коэффициенту третьей гармоники можно регистрировать появление полярного состояния.

В качестве объекта исследований нами был выбран магнониобат-скандониобат свинца, который является релаксорным сегнетоэлектриком и представляет собой твёрдый раствор  $[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]_{0.55}\text{-}[\text{Pb}(\text{Sc}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3]_{0.45}$ .

Для проведения диэлектрических измерений применялся цифровой измеритель иммитанса E7-25 с частотным диапазоном от 25 Гц до 1 МГц. Измерения проводились в режиме непрерывного охлаждения и нагрева в диапазоне от 100 до 500 К со скоростью 1 К/мин. Амплитуда измерительного напряжения составляла 0,7 В. Для измерения температуры в интервале 100 – 300 К использовался медный термометр-сопротивление, в температурном интервале 300 – 500 К – электронный термометр ТС-6621 с хромель-алюмелевой термопарой. Точность определения

температуры составляла 0.2 К. Данные с измерителя иммитанса и термометра подавались на компьютер и обрабатывались в автоматическом режиме.

Установка для исследований нелинейных диэлектрических свойств включала в себя генератор гармонических колебаний с рабочей частотой 1 КГц. Напряженность поля на образце могла варьироваться в пределах 2 – 180 В/мм.

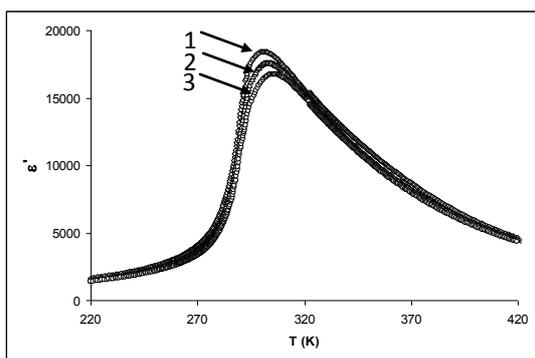
Сигнал снимался с резистора, включенного последовательно с образцом, и подавался на цифровой анализатор спектра, представляющий собой компьютер с 24-разрядным аналого-цифровым преобразователем ZET 230.

На рис. 1 приведены температурные зависимости диэлектрической проницаемости на разных частотах.

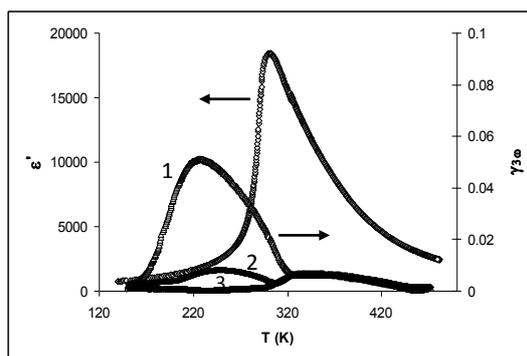
Максимальное значение диэлектрической проницаемости достигается при  $T_m \approx 302$  К на частоте 1 КГц и при  $T_m \approx 306$  К на частоте 100 КГц.

На рис. 2 показана температурная зависимость коэффициентов нечетных гармоник для состава  $[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]_{0.55}-[\text{Pb}(\text{Sc}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3]_{0.45}$  при напряженности измерительного поля  $E = 100$  В/см. Коэффициент третьей гармоники в максимуме достигает порядка 5%, что свидетельствует о том, что ниже  $T_m$  при приложении напряжения в PMN-SBN возникает сегнетоэлектрическое состояние.

При увеличении напряженности электрического поля максимум  $\gamma_{3\omega}(T)$  возрастает и смещается в область более низких температур (рис.3). При повышении напряжения вплоть до полей  $E \sim 1800$  В/см насыщение не наблюдается.



**Рис. 1.** Зависимость  $\epsilon'(T)$  в районе фазового перехода для разных частот измерительного поля: 1 – 1 КГц, 2 – 10 КГц, 3 – 100 КГц



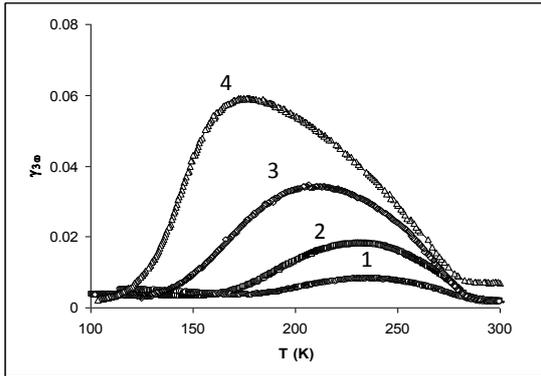
**Рис. 2.** Зависимость  $\epsilon'(T)$  и коэффициентов нечетных гармоник: 1 –  $\gamma_{3\omega}$ , 2 –  $\gamma_{5\omega}$ , 3 –  $\gamma_{7\omega}$ . Основная измерительная частота 1 КГц

В температурном интервале от  $T_m$  до температуры Бёрнса ( $T_B \approx 459$  К) все коэффициенты нечетных ( $\gamma_{3\omega}$ ,  $\gamma_{5\omega}$ ,  $\gamma_{7\omega}$ ) и четных ( $\gamma_{4\omega}$ ,  $\gamma_{6\omega}$ ,  $\gamma_{8\omega}$ ) высших гармоник имеют примерно одинаковое значение (рис. 4). Это может наблюдаться, если коэффициенты ( $\epsilon_3$ ,  $\epsilon_4$ ,  $\epsilon_5 \dots$ ) в разложении (1) в этом температурном интервале имеют один порядок.

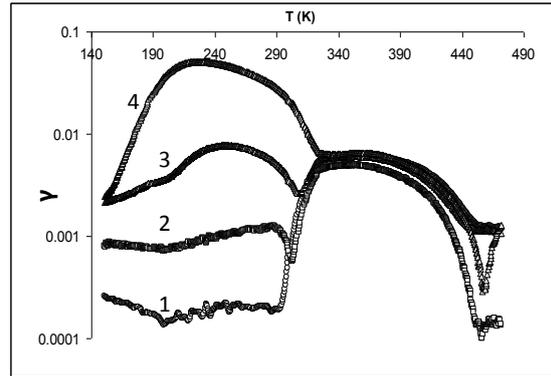
В 1987 г. для обозначения паразлектрической фазы сегнеторелаксоров, насыщенной полярными областями, Л. Кросс [6] ввел термин «суперпараэлектричество».

Очевидно, что называть систему суперпараэлектрической с более или менее полным основанием можно только тогда, когда она содержит несегнетоэлектрическую матрицу, которая никогда не переходит в сегнетоэлектрическое состояние.

Хотя малые области, внедренные в эту матрицу, являются полярными и могут под действием тепловых флуктуаций и внешнего электрического поля менять направление своих дипольных моментов.



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента третьей гармоники от напряженности электрического поля: 1 – 475 В/см, 2 – 720 В/см, 3 – 950 В/см, 4 – 1800 В/см



**Рис. 4.** Температурный ход коэффициентов различных гармоник: 1 –  $\gamma_{60}$ , 2 –  $\gamma_{40}$ , 3 –  $\gamma_{50}$ , 4 –  $\gamma_{30}$

В классическом случае для системы невзаимодействующих диполей поляризация должна описываться функцией Ланжевена:

$$P = \sum_{i=1}^N p_i L\left(\frac{p_i E}{kT}\right), \quad (4)$$

где  $p_i$  – дипольный момент полярной области,  $N$  – концентрация полярных областей. Учитывая, что функция Ланжевена

$$L(x) = \coth(x) - \frac{1}{x} \quad \text{для малых} \quad x = \left(\frac{p_i E}{kT}\right)$$

может быть разложена в ряд Тейлора:

$$L(x) = \frac{1}{3}x - \frac{1}{45}x^3 + \frac{3}{945}x^5 - \frac{1}{4729}x^7 + \dots \quad (5)$$

Получим:

$$P = \sum_{i=1}^N p_i L\left(\frac{p_i E}{kT}\right) \approx \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{p_i^2}{3kT} E - \frac{p_i^4}{45(kT)^3} E^3 + \frac{p_i^6}{945(kT)^5} E^5 + \dots \right\} \quad (6)$$

Из соотношения (6) следует, что коэффициенты разложения ряда, которые имеют смысл диэлектрических восприимчивостей ( $\chi$ ,  $\chi_3$ ,  $\chi_5$  ...), быстро убывают. И эта модель не может объяснить высокие значения нелинейности выше  $T_m$ , полученные по генерации высших гармоник для магнониобата-скандониобата свинца. Для объяснения полученных результатов можно предположить либо рост размеров полярных областей при приложении поля, либо существование набора диполей с разными энергиями активации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гладкий В. В. Аномалии процессов поляризации в релаксорных сегнетоэлектриках / В. В. Гладкий, В. А. Кириков, Е. С. Иванова, Т. Р. Волк // ФТТ. 2006. Т.48. № 6. С. 1042-1046.
2. Смирнова Е. П., Сотников А. В., Юшин Н. К. Петли переполяризации в сегнетоэлектриках с размытым фазовым переходом // ФТТ. 1995. Т.37. № 3. С. 752-759.
3. Исупов В. А. Природа физических явлений в сегнеторелаксорах // ФТТ. 2003. Т.45, № 6. С. 1056-1060.
4. Ikeda S. Nonlinear dielectric constant and ferroelectric-to-paraelectric phase transition in copolymers of vinylidene fluoride and trifluoroethylene / S. Ikeda, H. Kominami, K. Koyama, Y. Wada // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. iss. 8. С. 3339-3342.
5. Yudin S. G. Ferroelectric phase transition in Langmuir-Blodgett films of copper phthalocyanine / S. G. Yudin, L. M. Blinov, N. N. Petukhova, P. S. Palto // JETP Letters. 1999. V. 70, iss. 9. P. 633-640.

## ВЛИЯНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО И ОДНОВРЕМЕННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРОТОНАМИ И ЭЛЕКТРОНАМИ НА ОБРАЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОКСИДЕ ЦИНКА

**И. В. Верхотурова<sup>1</sup>, В. Ю. Юрина<sup>1</sup>, В. В. Нецименко<sup>1</sup>, Чундун Ли<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Амурский государственный университет, г. Благовещенск

<sup>2</sup>Харбинский политехнический университет, г. Харбин, КНР

e-mail: [russia@mail.ru](mailto:russia@mail.ru)

*В работе представлено исследование влияния одновременного, последовательного и раздельного облучения одинаковыми по энергии, но разными по типу заряженными частицами на оптические свойства пигмента терморегулирующих покрытий на основе микророшков оксида цинка.*

В оксиде цинка, применяемого в качестве пигмента терморегулирующих покрытий класса «солнечные отражатели», при длительном действии ионизирующего излучения космического пространства образуется большое количество центров поглощения. Их образование и накопление негативно сказывается на оптических свойствах терморегулирующих покрытий. В основном это влияет на отражательную способность терморегулирующих покрытий, приводя к ее уменьшению [1, 2]. Ионизирующее излучение космического пространства сочетает в себе несколько компонент излучений (различных как по составу, так и по энергиям), которые могут воздействовать на терморегулирующие покрытия в различных сочетаниях, поэтому при таком воздействии возникающие в материалах радиационные эффекты имеют сложный характер [1-3].

В данной работе проведено исследование влияния облучения потоками протонов (энергией 100 кэВ, флюенсом  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , плотностью потока  $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) и электронов (энергией 100 кэВ, флюенсом  $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , плотностью потока  $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) на оптические свойства микророшков ZnO.

Облучение микророшков ZnO одинаковыми по энергии, но разными по типу заряженными частицами при различных режимах (табл. 1) проводилось в комплексном имитаторе факторов космического пространства «КИФК» (Харбинский политехнический университет).

Регистрация спектров диффузного отражения ZnO до и после облучения ионизирующим излучением проводилась на месте (*in situ*).

Таблица 1

Режимы облучения микророшков оксида цинка

Режим облучения	Раздельно		Комбинированный		
	протонами	электронами	одновременно протонами и электронами	комплексно сначала электронами затем протонами	комплексно сначала протонами затем электронами
Символьное обозначение режима облучения	$p^+$	$e^-$	$p^+ + e^-$	$e^- \rightarrow p^+$	$p^+ \rightarrow e^-$

Облучение оксида цинка заряженными частицами оказывает влияние на деградацию оптических свойств оксида цинка в ультрафиолетовой и видимой области спектра, что выражается в уменьшении коэффициента отражения. Полученные спектры диффузного отражения необлученного и облученного при разных режимах оксида цинка позволили рассчитать значения интегрального коэффициента поглощения и его изменение (табл. 2).

Таблица 2

Значения интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения  $\alpha_s$  и его изменение  $\Delta\alpha_s$  после воздействия

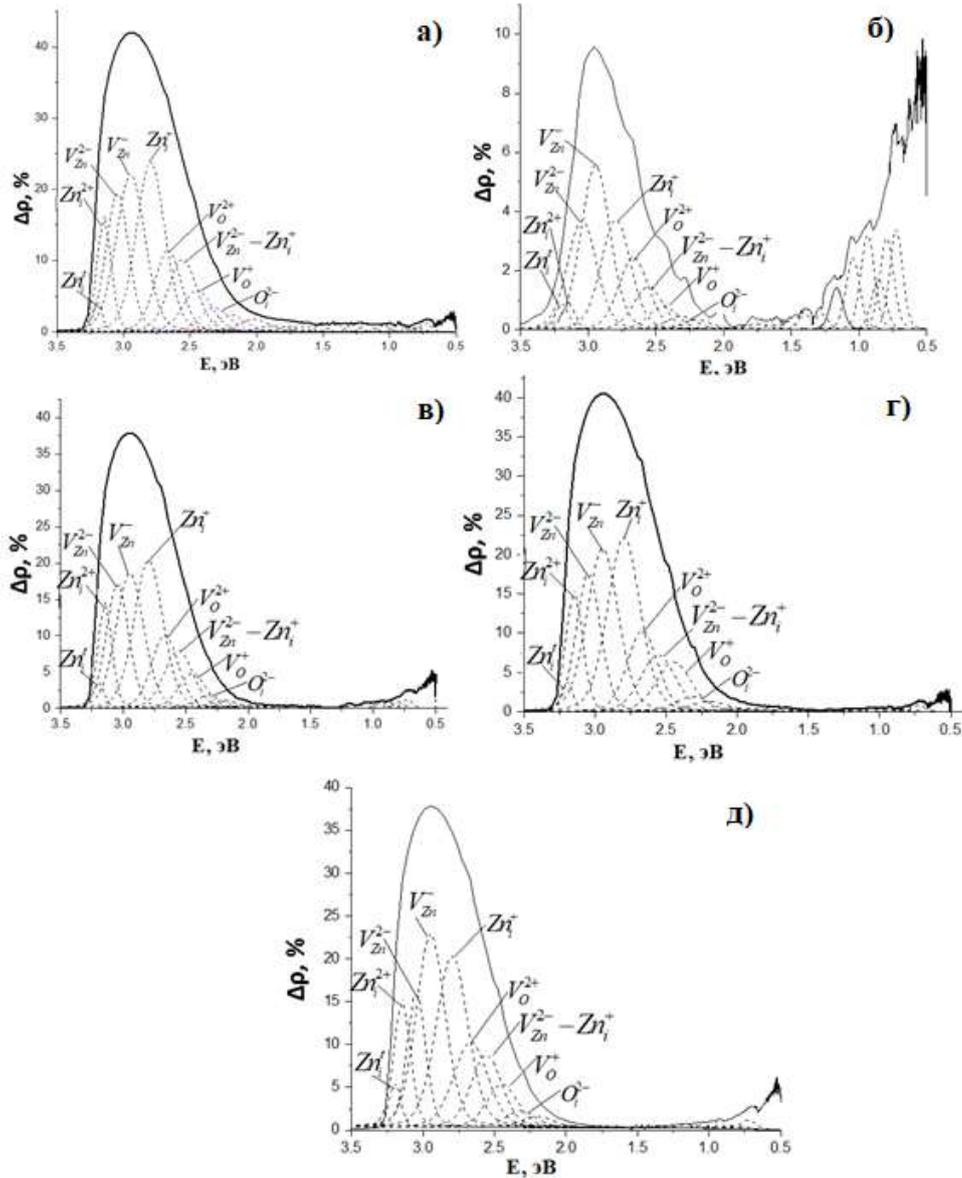
$\alpha_s$ до облучения	$\Delta\alpha_s^{p^+}$ после облучения только протонами	$\Delta\alpha_s^{e^-}$ после облучения только электронами	$\Delta\alpha_s^{p^++e^-}$ после одновременного облучения протонами и электронами	$\Delta\alpha_s^{e^- \rightarrow p^+}$ после комплексного облучения сначала электронами затем протонами	$\Delta\alpha_s^{p^+ \rightarrow e^-}$ после комплексного облучения сначала протонами затем электронами
0,120±0,002	0,081±0,002	0,056±0,002	0,079±0,002	0,078±0,002	0,050±0,002

При облучении оксида цинка только протонами наблюдается наибольшее значение изменения интегрального коэффициента поглощения, что приводит к значительному ухудшению отражательной способности пигментов. Присутствие потока электронов при одном из режимов комбинированном воздействии на ZnO компенсирует деградацию отражательной способности пигментов, поскольку изменение интегрального коэффициента поглощения меньше по сравнению с суммарным изменением коэффициента поглощения при раздельном воздействии каждого из видов излучений. Причем при комплексном воздействии сначала протонами затем электронами поток электронов значительно компенсирует воздействие потока протонов, уменьшая тем самым изменение отражательной способности микропорошков оксида цинка. Данный факт может объясняться тем, что при этом виде комбинированного воздействия концентрация определённого типа наведенных центров поглощения, механизмы радиационного дефектообразования и взаимодействия с исходными дефектами облучаемой структуры могут отличаться от аналогичных процессов при двух других режимах комбинированного облучения.

В связи с этим для определения концентрации наведенных центров поглощения (ЦП) в оксиде цинка, облученного при разных режимах, проведено разложение разностных спектров диффузного отражения на индивидуальные полосы (рис.). Разложение спектров осуществлялось исходя из энергии полос поглощения донорных и акцепторных дефектов оксида цинка. Расчет концентрации центров поглощения проводился по площади под индивидуальными полосами поглощения.

Разложение спектров на индивидуальные полосы поглощения и расчет концентрации радиационных центров поглощения показали, что наибольшей концентрацией в облученных микропорошках оксида цинка обладают ЦП, имеющие следующие полосы поглощения в видимой области спектра: вакансии цинка  $V_{Zn}^{2-}$  (3,05 эВ),  $V_{Zn}^-$  (2,95 эВ); междоузельные ионы цинка  $Zn_i^{2+}$  (3,15 эВ),  $Zn_i^+$  (2,80 эВ); акцепторно-донорная пара  $V_{Zn}^{2-} - Zn_i^+$  (2,56 эВ) и кислородные вакансии  $V_O^{2+}$  (2,67 эВ),  $V_O^+$  (2,45 эВ). В оксиде цинка, облученного только электронами, помимо выше перечисленных ЦП значительную концентрацию имеют также ЦП, имеющие полосы поглощения в ближней ИК области спектра: акцеп-

торно-донорные пары  $O_i^- - V_O^{2+}$  (1,28 эВ) и  $V_O^X - Zn_i'$  (1,17 эВ); нейтральные кислородные вакансии  $V_O^X$  (1,05 эВ) и междуузельный кислород  $O_i^X$  (0,73 эВ) [4, 5].



Разностные спектры диффузного отражения оксида цинка, разложенные на индивидуальные полосы: а – облучение только протонами; б – облучение только электронами; в – облучение одновременно протонами и электронами; г – облучение последовательно, сначала электронами затем протонами; д – облучение последовательно, сначала протонами затем электронами

В облученном оксиде цинка концентрация наведенных ЦП схожих по типу с ЦП в необлученном оксиде цинка примерно в десять раз выше независимо от режима облучения. Самая наименьшая концентрация всех видов ЦП наблюдается после облучения оксида цинка электронами по сравнению с другими режимами облучения. С максимальной же концентрацией дефекты катионной подрешетки образуются при облучении оксида цинка только протонами. Комбинированное воздействие (независимо от режима облучения)

ния) приводит к уменьшению концентрации дефектов катионной подрешетки по сравнению со значением концентрации дефектов, образующихся при облучении только протонами.

Из выше перечисленных ЦП катионной подрешетки максимальную концентрацию имеет междоузельный цинк  $Zn_i^+$  (полоса поглощения 2,80 эВ). Однако при комплексном воздействии сначала протонами затем электронами ( $p^+ \rightarrow e^-$ ) концентрация данного вида наведенного ЦП самая наименьшая по сравнению с другими режимами комбинированными облучения и облучения только протонами.

А так же при данном режиме облучения в отличие от других наблюдается возрастание концентрации вакансии цинка  $V_{Zn}^-$  (2,95 эВ) [4, 5]. Для объяснения этого необходимы дальнейшие исследования совместного действия заряженных частиц на оксидные материалы пигментов.

Таким образом, при воздействии на оксид цинка одинаковых по энергии, но разных по типу заряженных частиц (вне зависимости от режима облучения) наибольший вклад в изменение оптических свойств порошков оксида цинка вносят образующиеся с наибольшей концентрацией радиационные дефекты в катионной подрешетке цинка по сравнению с дефектами анионной кислородной подрешетки.

Комбинированное воздействие (независимо от вида режима облучения) приводит к уменьшению концентрации дефектов катионной подрешетки по сравнению с концентрацией этих же ЦП, образующихся при облучении только протонами.

Однако при комплексном воздействии  $p^+ \rightarrow e^-$  концентрация данного наведенного ЦП самая наименьшая по сравнению с другими режимами комбинированного облучения и облучения только протонами. А так же при данном режиме облучения в отличие от других режимов наблюдается возрастание концентрации вакансии цинка  $V_{Zn}^-$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Нецименко В. В. Структура, свойства и радиационная стойкость оксидных микро- и нанопорошков и отражающих покрытий, изготовленных на их основе: дис. доктора физ.-мат. наук: 01.04.07 // ФГБОУ ВО ТУСУР. Томск. 2016. 273 с.
2. Новиков Л. С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов: учеб. пособие. М.: Университетская книга, 2010. 192 с.
3. Михайлов М. М., Шарафутдинова В. В. Изменение оптических свойств терморегулирующих покрытий космических летательных аппаратов под действием протонов солнечного ветра // Известия Вузов. Физика. 1998. № 6. С. 83-88.
4. Верхотурова И. В., Нецименко В. В. Исследование совместного действия заряженных частиц на микропорошки оксида цинка // Вестник АмГУ. Серия «Естественные и экономические науки». 2020. Вып. 89. С. 45-48.
5. Верхотурова И. В., Нецименко В. В. Расчет концентрации наведенных центров поглощения в оксиде цинка // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование: матер. XVII регион. науч. конф. (15-21 сентября 2019 г. Благовещенск). Благовещенск: Изд-во АмГУ, БГПУ, 2019. С. 70-72

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОТОНОВ НА ПОЛЫЕ ЧАСТИЦЫ ZnO И ZnO/SiO<sub>2</sub>

**А. Н. Дудин<sup>1</sup>, В. В. Нецименко<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Амурский государственный университет, г. Благовещенск

<sup>2</sup>Харбинский политехнический университет, г. Харбин, Китай

e-mail: [andrew.n.dudin@gmail.com](mailto:andrew.n.dudin@gmail.com)

*Представлены результаты компьютерного моделирования воздействия пучка низкоэнергетических протонов с энергиями от 50 до 100 кэВ, на полую частицу ZnO и полую двухслойную частицу ZnO/SiO<sub>2</sub>, в программном комплексе Geant4. Геометрии мишеней представляли собой сферические объекты диаметром в 1000 нм, с толщиной стенки: в первом случае – 50 нм; во втором – 100 нм (поровну, по 50 нм для ZnO и SiO<sub>2</sub>). Облучение, в количестве 100 протонов, осуществлялась относительно нормали к поверхности мишени. Рассмотрены закономерности пробега протонов в зависимости от энергий частиц для моделируемых образцов полых частиц и определено значение общего количества поглощенной энергии.*

### **Введение**

Материалы на основе оксида цинка представляет собой интерес, связанный с высокой фото- и радиационной стойкостью, высокими фото-эмиссионными характеристиками. В связи с чем непосредственной применяются в космической технике, в качестве оптоэлектронных преобразователей, светодиодов, а также в составе пигментов терморегулирующих покрытий (ТРП) космических аппаратов [1, 2]. Среди большого числа ТРП, таких как TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Zn<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, BaTiO<sub>3</sub>, имеют высокую базовую позицию [3]. Разработка способов повышения стойкости, в частности изменения геометрической конфигурации частиц ZnO к действию излучений различных видов, представляет научный интерес и практическую ценность.

Модифицирование порошка ZnO наночастицами приводит к увеличению радиационной стойкости отражающих покрытий, изготовленных на его основе с полимерным лаком. Выполненные исследования [4] показали, что модифицирование порошка оксида цинка наночастицами диоксида кремния приводит к уменьшению коэффициента отражения по всему спектру с характерными признаками в трех областях, определяемых поглощением собственными точечными дефектами, меньшим рассеянием на наночастицах по сравнению с микрочастицами и меньшей концентрацией свободных электронов.

В данной работе представлены результаты математического моделирования воздействия пучков протонов энергиями от 50 до 100 кэВ, с полыми сферическими мишенями ZnO и ZnO/SiO<sub>2</sub>, с целью установления закономерностей пробега протонов в зависимости от энергий частиц для моделируемых образцов полых частиц и определения общего количества поглощенной энергии.

### **Постановка задачи**

Исходные объекты моделирования находились в объеме моделируемой области, превышаем размер частиц в 1.5 раза по трем осям. В качестве мишени для расчетов были выбраны: полая сферическая частица ZnO с характерной структурой вюрцита и плотностью 5,61 г/см<sup>3</sup>; полая двухслойная сферическая частица ZnO/SiO<sub>2</sub>, где верхний слой аналогичен первой представленной частице, внутренний слой с характерной структурой а-

кварца и плотностью  $2,6 \text{ г/см}^3$ . Диаметр построенных полых частиц составлял - 1000 нм, толщина стенки для первой частицы имело значение в 50 нм, для второй 100 нм (по 50 нм для каждого слоя).

Для генерации пучков протонов с энергией от 50 до 100 кэВ использован общий источник частиц. Профиль интенсивности пучка описан гауссовым распределением. Пороговая энергия смещения: ZnO - для атома цинка 52 эВ, для кислорода – 57 эВ [5]; SiO<sub>2</sub> - для атома кремния 33 эВ, для кислорода – 16.5 эВ [6]. Регистрацию рожденных частиц осуществляли на всем протяжении моделируемого объема. Схема взаимного расположения пучка протонов и мишени представлена на рис. 1.

При моделировании учитывались процессы используемы в наборе физики QGSP\_BIG\_EMU [4]: ионизация среды, множественное рассеивание частиц на атомах мишени, упругие и неупругие потери энергии, тормозное излучение.

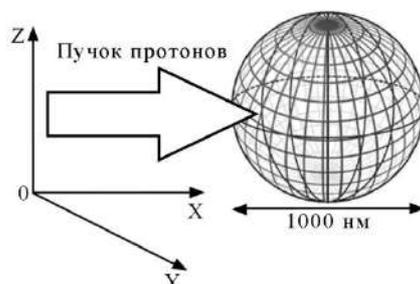


Рис. 1. Схема взаимной ориентации пучка протонов и мишени

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты моделирования прохождения пучка протонов с энергиями 50, 60, 70, 80, 90 и 100 кэВ через полые частицы ZnO и ZnO/SiO<sub>2</sub> с толщиной 1000 нм, представлены в виде зависимости поглощённой энергии от глубины на рис. 2.

Можно заметить, что в связи с особенностями геометрий мишеней, в частности – полости, основное поглощение энергии происходит в стенках 50 нм для ZnO и 100 нм для ZnO/SiO<sub>2</sub>. Расчеты показывают, что в среднем около 68 % энергии протонов при облучении ZnO и 70 % при ZnO/SiO<sub>2</sub> рассеивается в стенках мишеней.

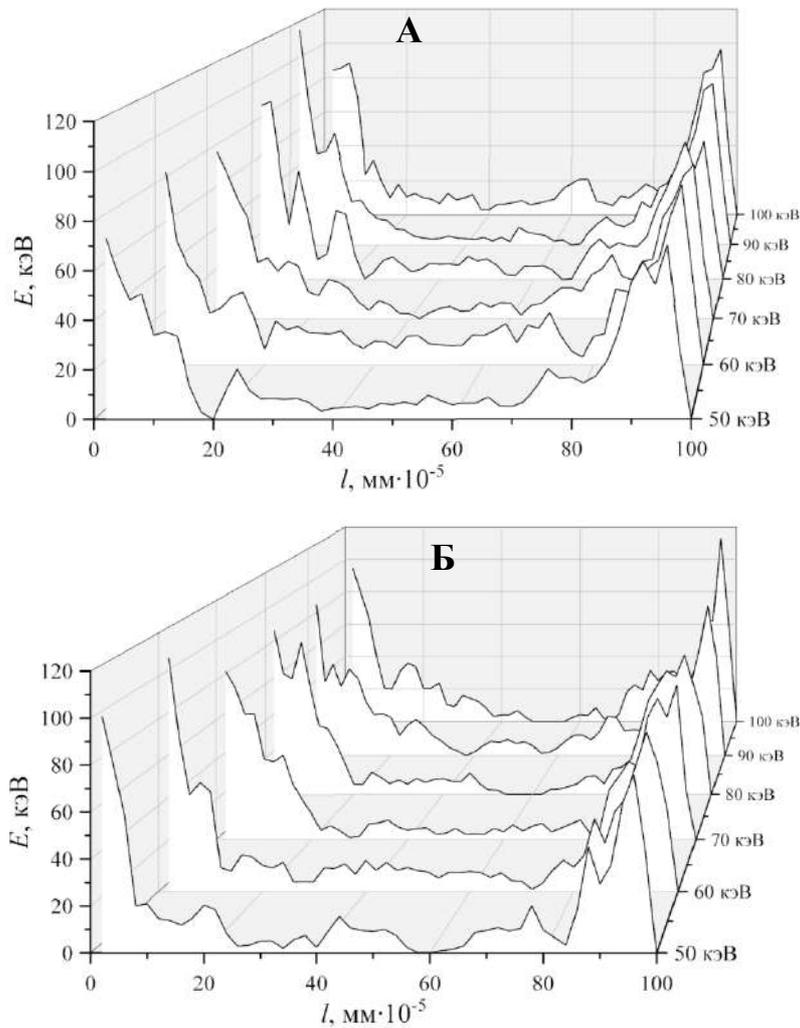
Стоит отметить, что для расчетов поглощенной энергии, в моделируемых мишенях происходил подсчет в слоях равных 20 нм. Тогда если в процессе движения частицы через вещество, происходила потеря энергии, то данное значение фиксировалось в ячейке с номером, соответствующим координате данной частицы.

Соответственно учитывалась потерянная энергия каждой выпущенной частицы на каждом шаге моделирования.

В таблице представлено общее количество энергии  $E_{dep}$ , поглощённое полыми частицами ZnO и ZnO/SiO<sub>2</sub> в зависимости от энергии налетающих протонов  $E_p$ .

Полученные данные демонстрируют постепенный рост накопленной энергии по мере увеличения энергии протонов.

Исключение составляет вариант при облучении в 60 кэВ полый частицы ZnO, который можно вполне списать на некоторые флуктуации. Общее количество накопленной энергии полый двухслойной частицей ZnO/SiO<sub>2</sub> превышает аналогичные показатели для полый частицы ZnO в 1.9 раза.



**Рис. 2.** Количество поглощенной энергии относительно толщины мишеней:  
 А – ZnO, Б – ZnO/SiO<sub>2</sub>

Общее количество энергии, поглощенное полыми частицами

$E_p$ , кэВ	$E_{dep}(ZnO)$ , МэВ	$E_{dep}(ZnO/SiO_2)$ , МэВ
50	1.037	1.811
60	1.157	2.034
70	1.147	2.038
80	1.171	2.240
90	1.198	2.298
100	1.280	2.242

### Закключение

Проведено моделирование воздействия пучка протонов с энергией от 50 до 100 кэВ, на полую частицу ZnO и полую двухслойную частицу ZnO/SiO<sub>2</sub>. Установлены закономерности пробега протонов в зависимости от энергий частиц для моделируемых образцов полых частиц. Проведены расчеты количества энергии, поглощенной полыми частицами. Показано, что преимущественно частицы двухслойной полую частицы ZnO/SiO<sub>2</sub> имеют наибольшее значение поглощенной энергии, превышающей аналогичное значение для полую частицы ZnO в 1.9 раз.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kiomarsipour N., Razavia R.S., Ghani K. Improvement of spacecraft white thermal control coatings using the new synthesized Zn-MCM-41 pigment // *Dyes and Pigments*. 2013. V. 96. P.403-406.
2. Singh S.C. Zinc oxide nanostructures. synthesis, characterizations and device applications // *Journal of Nanoengineering and Nanomanufacturing*. 2013. V.3. P.1-28.
3. Михайлов М. М. Фотостойкость терморегулирующих покрытий космических аппаратов. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2007. 380 с.
4. Михайлов М. М., Нешименко В. В., Юрьев С. А. Отличительные особенности спектров отражения и радиационной стойкости покрытий, изготовленных на основе порошков ZnO, модифицированных наночастицами SiO<sub>2</sub> // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2013. № 96. С. 78-82.
5. Lorenz K., Alves E., Wendler E., Bilani O., Wesch W., Hayes M. Damage formation and annealing at low temperatures in ion implanted ZnO // *Applied physics letters*. 2005. V.87. P.191904-191907.
6. Рау Э. И., Татаринцев А. А., Зыкова Е. Ю., Иваненко И. П. Электронно-лучевая зарядка диэлектриков, предварительно облучённых ионами и электронами средних энергий // *Физика твёрдого тела*. СПб.: Наука. С.-Петербург. отд-ние, 2017. № 8. С. 1504-1513.

УДК 537.5

### ФОРМИРОВАНИЕ УПОРЯДОЧЕННЫХ СТРУКТУР ЗОЛОТА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Г. Г. Капустина

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [g.kapustina@mail.ru](mailto:g.kapustina@mail.ru)

*При воздействии лазерного излучения на ультрадисперсные золотосодержащие минеральные среды происходит формирование агломерированных кристаллических структур золота, установлены фазовые изменения алюмосиликатной матрицы, заключающиеся в их аморфизации и возникновении гидроксильных групп при более интенсивном излучении.*

Процесс взаимодействия света с непрозрачными средами сводится к отражению и рассеиванию света поверхностью, а так же поглощению света в очень тонком поверхностном слое. Под действием лазерного излучения твердые тела нагреваются до высокой температуры, расплавляются и испаряются. Характер и эффективность воздействия электромагнитных волн лазерного излучения на вещество определяется плотностью потока энергии (плотностью мощности или интенсивностью) электромагнитного поля, поглощенная материалом.

Процесс взаимодействия света с поверхностью твердого непрозрачного тела происходит следующим образом: световая волна, падающая на поверхность, взаимодействует с электронами, возбуждая их колебания. Вынужденные колебания электронов приводят к возникновению отраженной волны. Если электроны в твердом теле полностью свободны, то излучение полностью отражается, поглощение отсутствует. Если электроны частично связаны, то часть энергии падающей волны передается твердому телу, вызывая его нагревание. Весь процесс взаимодействия света с электронами обычно разыгрывается в тонком поверхностном слое, так что часто можно говорить о взаимодействии света с поверхностью твердого тела. Теплофизические коэффициенты, которые являются функци-

ями температуры, в инженерных расчетах обычно считают постоянными и используют их усредненные значения [1-3].

Металл представляет собой трехмерную решетку из положительных ионов, которая погружена в газ электронов проводимости, связанных с ионной решеткой силами электростатического притяжения. В видимом и инфракрасном диапазонах частот все излучение, которое не отражается от металла, поглощается им в весьма тонком поверхностном скин-слое (толщиной  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  см) на электронах проводимости. Это позволяет упростить описание и рассматривать лишь два процесса: отражение и поглощение, пренебрегая процессом распространения излучения в металле. У металлов поглощенная энергия распространяется за счет электронной теплопроводности.

Для полупроводников и диэлектриков основной является фонная теплопроводность. Полупроводники имеют низкую концентрацию свободных электронов, и если энергия светового кванта меньше ширины запрещенной зоны ( $h\nu < E$ ), то их оптические свойства подобны свойствам диэлектриков. Если  $h\nu > E$ , то за счет внутреннего фотоэффекта электроны из валентной зоны переходят в зону проводимости. При достаточно большой интенсивности излучения число свободных электронов существенно возрастает, значительно увеличивая долю световой энергии, поглощенной электронным газом и передаваемой в решетку за время  $10^{-10} - 10^{-11}$  с.

Поглощение света диэлектриками обусловлено наличием колебательных степеней свободы кристаллической решетки, молекул и атомов, межмолекулярными колебаниями, имеющимися примесями, дефектами структуры и т. п. Коэффициент поглощения зависит от длины волны излучения и обычно имеет большое значение как в области ультрафиолетового (УФ), так и в области инфракрасного (ИК) излучений; в промежуточной спектральной области диэлектрики могут быть частично или полностью прозрачными. У диэлектриков с большой энергетической щелью в начале лазерного воздействия отсутствует поглощение излучения за счет обратного тормозного рассеяния.

При достижении пороговой интенсивности, зависящей от свойств конкретного материала, начинается нарушение структуры диэлектрика, выражающееся в изменении коэффициентов отражения и поглощения с последующим плавлением поверхности. Свободные электроны эффективно поглощают энергию лазерного излучения за счет обратного тормозного рассеяния, в результате чего развивается процесс лавинной ионизации. Появление большого количества электронов в зоне проводимости приводит к металлизации поверхностного слоя диэлектрика, что выражается в увеличении коэффициентов поглощения и отражения.

Далее электрон-решеточная релаксация может быть описана по аналогии с ее описанием для металлов. Однако, в отличие от металлов плотность электронов в зоне проводимости диэлектриков сильно зависит от времени и расстояния вглубь мишени. По окончании лазерного импульса с течением времени происходят рекомбинация (захват) электронов в связанное состояние и оже-рекомбинация, что приводит к постепенному возвращению мишени свойств диэлектрика [4-5].

В исследованиях импульсного лазерного воздействия на конденсированные среды важное место в последнее время заняла проблема возникновения упорядоченных поверхностных структур. Несфокусированный пучок импульсного лазера падает на поверхность поглощающего твердого тела; с поверхностью взаимодействует почти плоская световая волна и на освещенной поверхности возникает периодическая модуляция рельефа. Она образуется в процессе взаимодействия (длительность которого изменяется от  $10^{-3}$  до  $10^1$  с) и обычно сохраняется после его прекращения.

Для определения режимов и параметров лазерного воздействия разработаны и созданы многоячейчатая подложка и площадка из электротехнического графита, внешний вид которых представлен на фотографии (рис. 1).



**Рис. 1.** Внешний вид многоячейстой подложки и площадки из электротехнического графита

Подложка и ли площадка устанавливались на координатном столе. На них наносились золотосодержащие продукты высотой 1-2 мм. Скорость подачи и перемещения продуктов в зоне лазерного луча поддерживалась постоянной, и могла также изменяться в зависимости от их состава и мощности применяемого лазерного излучения и достигала нескольких см/мин.

При выборе лазерной установки для изучения процессов лазерной агломерации минеральных и техногенных продуктов, содержащих модельные и естественные включения ультрадисперсного и коллоидно-ионного золота, принималось во внимание перспективы достижения экономической эффективности при ее эксплуатации в реальных условиях. Этим условиям оптимально соответствовала лазерная установка на основе иттербиевого волоконного лазера ЛС-06. Вид лабораторной установки на основе иттербиевого волоконного лазера ЛС-06 показан на рис. 2.



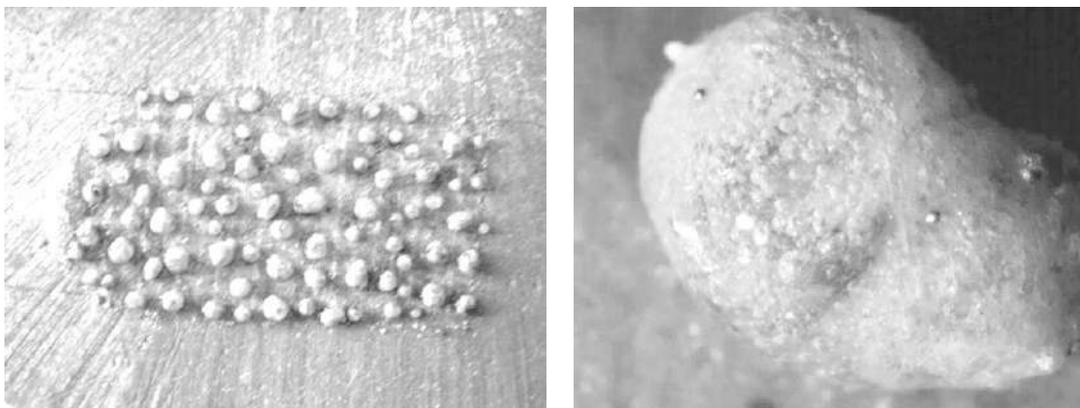
**Рис. 2.** Процесс изменения режима лазерной агломерации золота на опытном образце лабораторной установки на основе иттербиевого волоконного лазера

Установка обладает следующими основными характеристиками: длина волны излучения 1070 нм; ширина линии излучения практически не зависит от мощности и варьируется в пределах 4 нм; поляризация излучения случайная; режим работы непрерывный; мощность лазерного излучения изменяется программно через интерфейсы внешнего управления или с помощью дистанционного пульта в пределах 600 Вт.

При мощности излучения равном 90 Вт наблюдались "спеки" в виде цепочечных структур. Оптические исследования таких спеков выявило концентрирование золотин на отдельных участках.

Увеличение мощности до 180 Вт приводит к образованию алюмосиликатных агломератов, по краю которых наблюдаются неоплавленные золотины.

При дальнейшем увеличении мощности лазерного излучения 220 и 270 Вт наблюдаются оплавленные "агломераты" золота, которые сидят в оплавившемся стекловидном материале (рис. 3).



*Рис. 3.* Оплавленные силикатные объекты с золотом

При тестировании нескольких модельных золотосодержащих проб минерального сырья до и после воздействия лазерного излучения был отмечен рост размеров нано- и мезомасштабных частиц золота до технологически значимых размеров.

Проведенные исследования процесса лазерной агломерации при воздействии непрерывного излучения от волоконного иттербиевого лазера позволили установить рациональные режимы лазерной обработки.

Предварительные исследования выявили возможность ведения лазерной обработки минеральных объектов в интервале мощностей 60 – 270 Вт.

Оптимальная мощность излучения данного лазерного источника, возможно, находится в диапазоне 90-180 Вт.

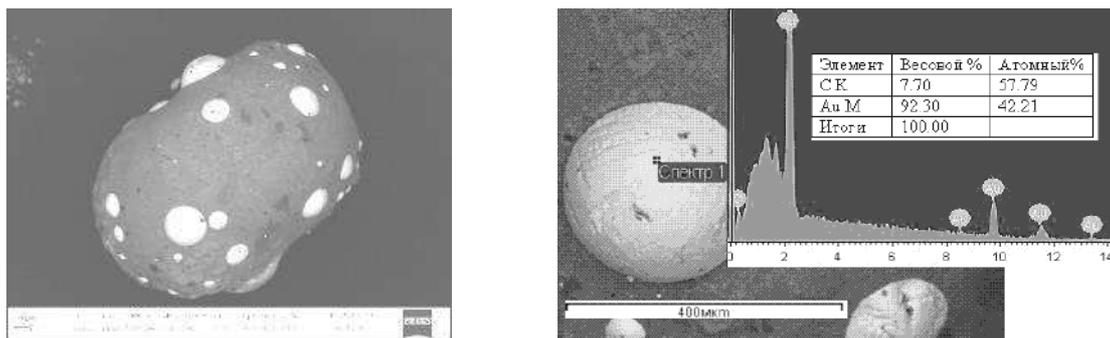
С помощью АСМ были получены снимки фазового контраста поверхности модельных алюмосиликатных золотосодержащих образцов, после обработки непрерывным лазерным излучением, которые позволили сделать вывод о наличии локальной самоорганизации золота вокруг точечных центров (сканирование осуществлялось полуконтактным методом, площадь сканирования 5·5 мкм, направление движения кантилевера – горизонтальное).

Агломерирование нанометрических и субмикронных форм золота доказано и подтверждено с помощью локального рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) – энергодисперсионного спектрометра (EDX) "INCA-ENERGY". Чувствительность метода составляет примерно 0,1%.

Ширина электронного пучка от 20 до 30 нм. Глубина проникновения электронного пучка примерно 1 мкм.

С помощью РСМА было зарегистрировано образование обожженных темных сфер. Их диаметр варьировался в пределах от 500 до 3000 мкм.

На поверхностях этих сфер наблюдалось образование частиц расплавленного золота каплевидной, сферической формы с размером от 50 до 500 мкм и более (рис. 4).



**Рис. 4.** Растровое изображение образца после взаимодействия с ЛИ и его спектральный анализ

Таким образом, экспериментально установлено, что при воздействии лазерного излучения на ультрадисперсные золотосодержащие минеральные среды происходит формирование агломерированных кристаллических структур золота, размером от 300 нм до 30 микрон; установлены фазовые изменения алюмосиликатной матрицы, заключающиеся в их аморфизации и возникновении гидроксильных групп при более интенсивном излучении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абельсиитов Г. А., Голубев В. С., Майров В. С. // Технологические лазеры: Справ. / Под ред. Абильсиитова Г. А. М.: Машиностроение. 1991. Т. 1. 432 с.
2. Голубев В. С., Лебедев Ф. В. Лазерная техника и технология // Кн. 1. Физические основы технологических лазеров: учебное пособ. для вузов / Под ред. Григорьянца А. Г. М.: Высш. шк. 1987. 191 с.
3. Голубев В. С., Лебедев Ф. В. Физические основы технологических лазеров. М.: «Высшая школа». 1987. 355 с.
4. Булгаков Л. В. Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество/ Булгаков Л. В., Булгакова Н. М., Бураков И. М. Новосибирск: институт теплофизики СО РАН. 2009. 462 с.
5. Ванина Е. А. Исследование процессов лазерной агломерации ультрадисперсного и коллоидно-ионного золота. / Е. А. Ванина А. А. Гальцов, Н. А. Леоненко, Г. Г. Капустина // Перспективные материалы. Спецвыпуск (13). 2011. Материалы XI Российско-Китайского Симпозиума «Новые материалы и технологии» т.1 10-14 октября 2011 г. Санкт Петербург: Интерконтакт Наука, Москва, Россия. С. 144-148.
6. Леоненко Н. А. Лазерные технологии в обработке минерального сырья // Упрочняющие технологии и покрытия. М.: «Новые технологии». 2019. Т. 15. № 10 (178). С. 470-474.
7. Леоненко Н. А. Интегрирование лазерных технологий в переработку минерального сырья / В книге: Современные проблемы регионального развития // Материалы VII Всероссийской научной конференции. Под редакцией Е. Я. Фрисмана. 2018. С. 62-66

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИОКСИДТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА ЦЕРИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ И РЕЖИМОВ ЦЕНТРОФУГИРОВАНИЯ

**В. А. Мамонтов, М. А. Пугачевский, А. П. Кузьменко**

<sup>1</sup>Юго-Западный государственный университет, г. Курск  
e-mail: [vladimir-mamontov2013@yandex.ru](mailto:vladimir-mamontov2013@yandex.ru)

*В работе рассмотрены антиоксидантные свойства наночастиц диоксида церия. Методом лазерной абляции были получены наночастицы  $\text{CeO}_2$ , напылённые на кремниевые подложки. С синтезированными частицами, которые подверглись диспергированию в водном растворе, выполнены исследования спектрофотометрическим методом. На органическом веществе проведена реакция Фентона без присутствия наночастиц диоксида церия и с их присутствием в системах при различных условиях центрифугирования для выявления зависимости антиоксидательных свойств  $\text{CeO}_2$  от времени и режимов центрифугирования.*

Объектом исследования в работе являются наночастицы диоксида церия, полученные методом лазерной абляции. Изучение их физико - химических свойств – одно из распространённых направлений в современной науке. Диоксид церия представляет собой активный оксид редкоземельного металла, который может применяться в различных областях, таких как пирокатализ, солнечная энергетика, оптические и биомедицинские приложения. В работе [1] указывается, что нанокристаллический диоксид церия проявляет антиоксидательные и противоопухолевые свойства; в других исследованиях отмечаются способности наночастиц диоксида церия выполнять функции антиоксидантов, имитируя поведение ряда ферментов – каталазы, супероксиддисмутазы, что говорит о перспективе его применения в медицине.

В данной работе наночастицы диоксида церия получали методом лазерной абляции. Преимуществом данного способа является возможность диспергирования аблированных наночастиц с поверхностными структурными дефектами типа кислородных вакансий [2], в результате чего их антиоксидантные свойства могут значительно увеличиваться. В эксперименте кремниевые подложки с нанесёнными наночастицами диоксида церия подвергали диспергированию в ультразвуковой ванне. В результате были получены коллоидные растворы с наночастицами  $\text{CeO}_2$ . Процесс диспергирования длился не менее 40 минут. После диспергирования полученным растворам давали отстояться в течение 24 часов для осаждения крупных частиц и агломератов наночастиц  $\text{CeO}_2$ .

Антиоксидательные свойства наночастиц  $\text{CeO}_2$  изучались спектрофотометрическим методом по следующей схеме: на органическом веществе проводили реакцию Фентона без присутствия наночастиц диоксида церия и с их присутствием в системах при различных условиях центрифугирования и с помощью спектрофотометрического метода выявить зависимость антиоксидательных свойств  $\text{CeO}_2$  от времени и режимов центрифугирования. В качестве органического вещества для экспериментов был выбран краситель метиленовый синий. Диапазон для измерения спектра метиленового синего составляет от 550 до 750 нм. В водных растворах мономерная форма метиленового синего поглощает свет при длине волны  $\lambda_{max} = 668$  нм, димер – в  $\lambda_{max} = 612$  нм.

Реакция Фентона играет главную роль в проведённых экспериментах. Высокореакционный короткоживущий гидроксильный радикал (\*ОН) является одной из самых опас-

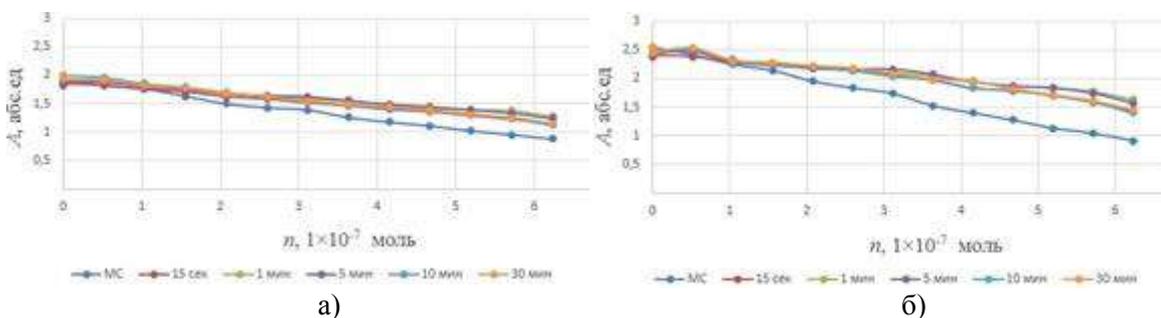
ных активных форм кислорода. Гидроксильный радикал легко образуется в процессе реакции Фентона:



Данный радикал окисляет многие органические вещества, инициирует цепные реакции перекисного окисления липидов и обесцвечивает красители. По скорости обесцвечивания красителя метилового фиолетового можно регистрировать образование и расходование в системе гидроксильного радикала.

При исследовании зависимости антиокислительных свойств наночастиц диоксида церия от времени их центрифугирования были выполнены два опыта. Раствор с наночастицами диоксида церия, который ранее отстаивался 24 часа, помещался на электрическую плиту. Далее путём конвективного испарения с помощью термовоздушной паяльной станции производилось увеличение концентрации наночастиц  $\text{CeO}_2$  в коллоидном растворе. Испарение раствора с наночастицами диоксида церия начиналось со 100 мл и заканчивалось на 50 мл. В дальнейшем, из 50 мл было взято по 2 мл 5 раз для центрифугирования на 5000 об/мин с разным временем центрифугирования от 15 секунд до 30 минут. Также был поставлен второй опыт, но при 13 400 об/мин и начиная с 2 секунд. При 13 400 об/мин невозможно центрифугировать на 15 секундах, так как сама центрифуга разгоняется за 13 секунд. Количество оборотов не менялось и оставалось постоянным для каждого опыта. Далее проводилась реакция Фентона, и измерялись спектры поглощения образцов в видимом диапазоне от 550 до 800 нм.

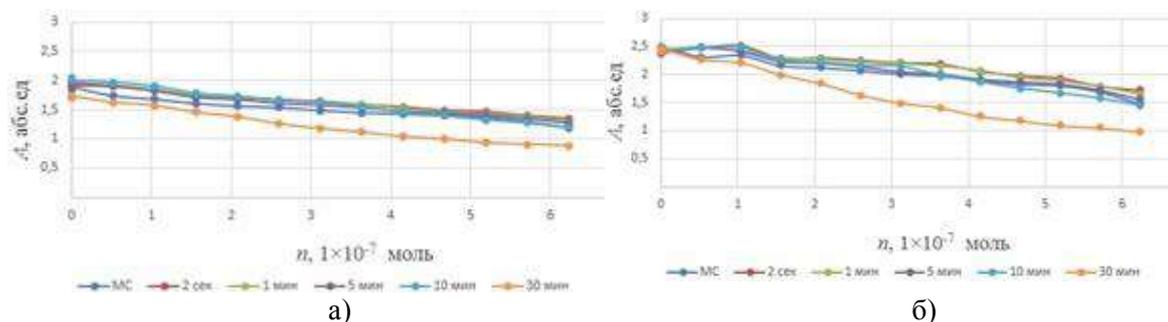
По результатам опытов были построены графики зависимости оптической плотности раствора метиленового синего от количества вещества приливаемого пероксида водорода на длинах волн  $\lambda = 612$  нм и  $\lambda = 668$  нм (рис. 1 и рис. 2).



**Рис. 1.** Зависимость оптической плотности раствора метиленового синего без и с присутствием наночастиц  $\text{CeO}_2$  от количества вещества приливаемого пероксида водорода при различных длинах волн а)  $\lambda = 612$  нм, б)  $\lambda = 668$  нм (фиксированный режим оборотов 5000 об/мин)

Из рис. 1 и рис. 2 видно уменьшение оптической плотности раствора метиленового синего от количества вещества перекиси водорода на длинах волн  $\lambda = 612$  нм и  $\lambda = 668$  нм. Аббревиатурой «МС» на графиках обозначен раствор метиленового синего без наночастиц диоксида церия. Отметим, что при фиксированном режиме оборотов 5000 об/мин антиокислительные способности наночастиц диоксида церия более выражены, чем при фиксированном режиме оборотов 13 400 об/мин, при одинаковом временном диапазоне каждого из режимов центрифугирования. Результаты опытов говорят о том, что при больших режимах центрифугирования значительная часть частиц диоксида церия осаждается из раствора, в том числе и наночастицы, и соответственно уменьшается их концентрация. В конечном итоге при проведении реакции Фентона количества наночастиц  $\text{CeO}_2$  не хватает для инактивации гидроксил-радикала, что и наблюдается на графике рис. 2 на длинах волн 612 нм и 668 нм с образцом «30 мин». Следовательно, наиболее

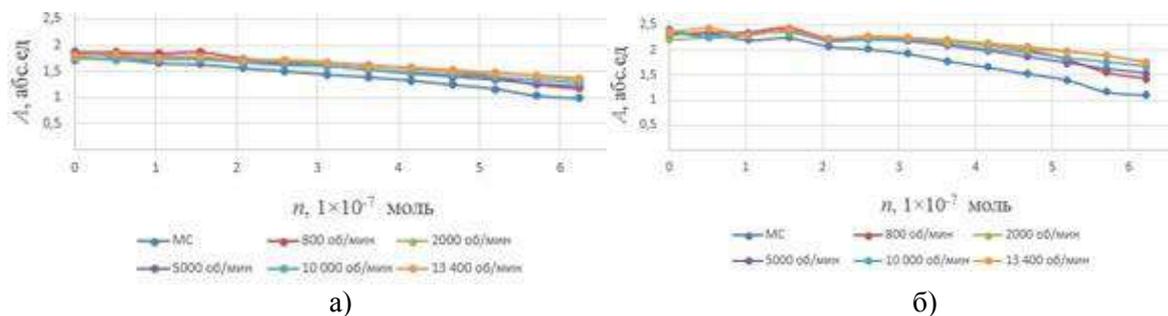
эффективным из двух применённых в опытах режимов центрифугирования является 5000 об/мин.



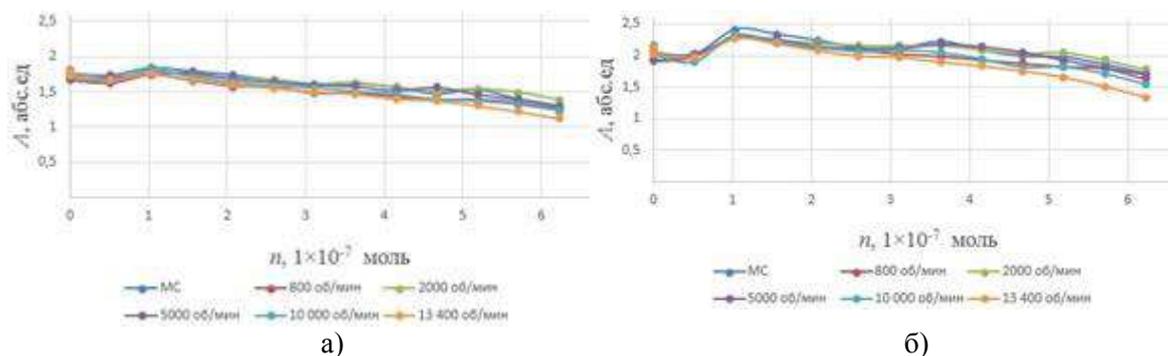
**Рис. 2.** Зависимость оптической плотности раствора метиленового синего без и с присутствием наночастиц  $\text{CeO}_2$  от количества вещества приливаемого пероксида водорода при различных длинах волн а)  $\lambda = 612$  нм, б)  $\lambda = 668$  нм (фиксированный режим оборотов 13 400 об/мин)

На представленных графиках рис. 1 и рис. 2 диапазон измерений в опытах (5000 об/мин и 13 400 об/мин) составлял от  $5,19 \times 10^{-8}$  моль до  $6,23 \times 10^{-7}$  моль. В каждом опыте учитывались два измерения до добавления пероксида водорода, а именно, были сняты спектры поглощения первоначального раствора метиленового синего и его раствора с добавлением катализатора – железным купоросом. Как видно из графиков изменение оптической плотности метилсинего при добавлении железного купороса незначительно.

Для исследования зависимости антиокислительных свойств наночастиц диоксида церия от режима (об/мин) их центрифугирования были выполнены два опыта. Как и в предыдущем эксперименте сначала было произведено испарение раствора с наночастицами  $\text{CeO}_2$  до 50 мл. Параметры и метод испарения соответствуют опытам описанным выше. В дальнейшем, из 50 мл было взято по 2 мл 5 раз для центрифугирования при различных режимах от 800 до 13 400 об/мин в течение 10 мин при каждом режиме оборотов. Также был поставлен второй опыт, но центрифугирование производилось уже на 30 мин. Время центрифугирования не менялось и оставалось постоянным для каждого опыта. Далее проводилась реакция Фентона, и измерялись спектры поглощения образцов в видимом диапазоне от 550 до 800 нм (рис. 3 и рис. 4).



**Рис. 3.** Зависимость оптической плотности раствора метиленового синего без и с присутствием наночастиц  $\text{CeO}_2$  от количества вещества приливаемого пероксида водорода при различных длинах волн а)  $\lambda = 612$  нм, б)  $\lambda = 668$  нм (фиксированное время центрифугирования 10 мин)



**Рис. 4.** Зависимость оптической плотности раствора метиленового синего без и с присутствием наночастиц  $\text{CeO}_2$  от количества вещества приливаемого пероксида водорода при различных длинах волн а)  $\lambda = 612$  нм, б)  $\lambda = 668$  нм (фиксированное время центрифугирования 30 мин)

По представленным графикам рис. 3 и рис. 4 видно уменьшение оптической плотности раствора метиленового синего от количества вещества перекиси водорода на длинах волн  $\lambda = 612$  нм и  $\lambda = 668$  нм. Аббревиатурой «МС» на графиках обозначен раствор метиленового синего без наночастиц диоксида церия.

Отметим, что при фиксированном времени центрифугирования 10 минут антиокислительные свойства наночастиц диоксида церия более выражены, чем при фиксированном времени центрифугирования 30 минут, при одинаковом режиме оборотов каждого. Объясняя полученные результаты можно отметить, что при длительном времени центрифугирования значительная часть частиц диоксида церия осаждается из раствора, в том числе и наночастицы, и соответственно уменьшается их концентрация.

Это приводит к тому, что при проведении реакции Фентона количественно недостаточно наночастиц  $\text{CeO}_2$ , которые необходимы для антиокислительных реакций, что и наблюдается на графике (Рис. 3) на длинах волн 612 нм и 668 нм с образцом «13 400 об/мин». Таким образом, наиболее оптимальным из двух временных диапазонов центрифугирования является 10 минут.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-02-00599. Работа выполнена также при поддержке Министерства образования и науки РФ (г/з 2020 № 0851-2020-0035).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Heckert E. G. The role of cerium redox state in the SOD mimetic activity of nanoceria / E. G. Heckert, A. S. Karakoti, S. Seal, W. T. Self // Biomaterials. 2008. V. 29. I. 18. P. 2705-2709. Bibliogr.: p. 2705-2709.
2. Pugachevskii M. A. /Formation of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles by laser ablation and their properties // Nanosci. Nanotechnol. Lett. 2014. V. 6. P. 519-523.

## КВАЗИЛИНЕЙЧАТЫЕ СПЕКТРЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ МОДИФИКАЦИЙ

Т. А. Меределина

Благовещенский государственный педагогический университет, г. Благовещенск  
e-mail: [biofirm@mail.ru](mailto:biofirm@mail.ru)

*«Методом Шпольского» получены квазилинейчатые спектры углеродных модификаций. Показано, что n-гептан может использоваться как молекулярная матрица для углеродных аллотропов. По спектрам флуоресценции установлены возможные сингулярные переходы электронов между энергетическими уровнями, нелинейность оптических свойств.*

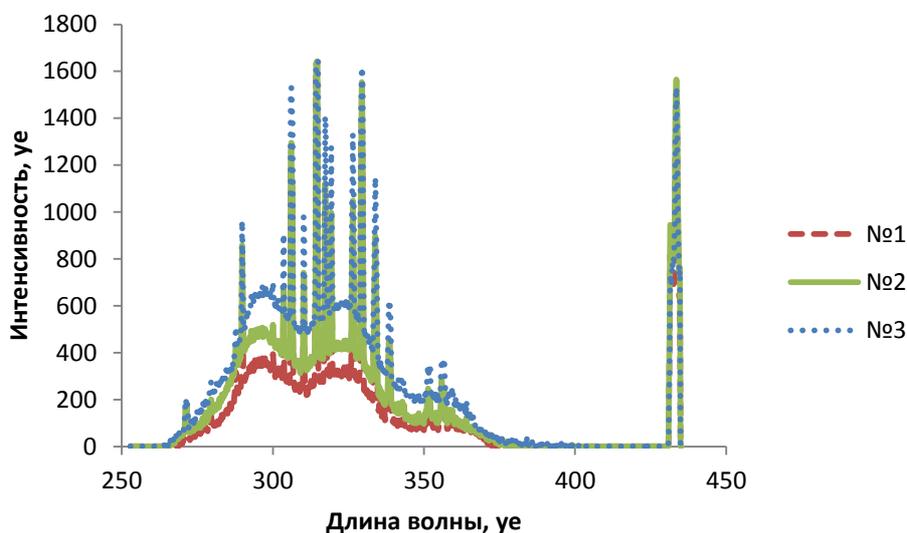
Фуллеренсодержащие материалы обладают рядом важнейших нелинейно-оптических свойств, что позволяет, в частности, использовать их для разработки механизма оптического ограничения энергии излучения. В основе данного механизма лежит явление поглощения света с возбужденного электронно-колебательного уровня молекулы. Большие моменты инерции многоатомных молекул приводят к тому, что вращательные уровни расположены очень тесно и образуют диффузные спектры. Чтобы избежать последнего, необходимо устранить свободное вращение молекул и уменьшить их взаимодействие [1]. Такой эффект достигается растворением вещества в специально подобранном растворителе и последующим замораживанием при температуре кипения азота (77 К). В этом состоянии молекулы лишены возможности свободно вращаться, находятся на больших расстояниях друг от друга, не взаимодействуют с молекулами растворителя. Оставшиеся электронно-колебательные переходы дают четкие квазилинейчатые спектры. Данное явление впервые было обнаружено и изучено советским ученым Шпольским и носит название «эффект Шпольского» [2].

В данной работе исследованы квазилинейчатые спектры нескольких модификации углерода, а именно, аморфный аллотроп – сажа (в дальнейшем образец №2), Шунгит (образец №3) – смесь аморфного и кристаллического углерода, кристаллы фуллерена C<sub>60</sub> (образец №1). При комнатной температуре кристалл C<sub>60</sub> имеет гранецентрированную кубическую (ГЦК) решётку, период решётки составляет  $a = 1,417$  нм. Средний диаметр молекулы – 0,708 нм, масса молекулы C<sub>60</sub> – 720 а.е.м., расстояние между соседними молекулами примерно 1 нм. На каждую молекулу приходится по 60 свободных  $\pi$ -электронов, фуллерен является полупроводником с ЗП 1,5 эВ. При температуре 165 К происходит вымораживание вращательных свобод. Твёрдое природное шунгитовое вещество представляет собой смесь разнообразных кристаллических углеродных аллотропов, соединённых аморфным углеродом. Диаметр многослойных шунгитовых глобул порядка 10 нм, основу которых составляет элементарный углерод в количестве до 98 %. В углеродную матрицу встраиваются высокодисперсные силикаты с размером частиц до 0,5 мкм. Образец № 2 – сажа представляет собой аморфный углерод, продукт неполного сгорания углеводородов. Диаметр частиц сажи от 40 до 100 ангстрем, элементарный состав сажи: 98% – углерод, 1,5% – кислород, 0,5% – водород.

Для подготовки образцов использовался метод холодной экстракции, 2 г вещества заливалось 5 мл растворителя, в течение суток встряхивалось при комнатной температуре. После чего осаждалось на фильтровальную бумагу, образованная на бумаге люминесцентная зона вырезалась полоской размером 0,8·20 см, и заливалась 2 мл n-гептана. Для получения квазилинейчатых спектров флуоресценции, стеклянная пробирка с иссле-

дуемым раствором погружалась в сосуд Дьюара с жидким азотом. Возбуждение флуоресценции проводилось светом лазера ЛГИ-21, с длиной волны 337 нм. Спектр регистрировался с помощью спектрографа ИСП-51 на высокочувствительную ПЗС линейку TCD1304DG с макетной платой Nucleo-F303re. Линейка содержит 3648 активных пикселей размерами 8 x 200 мкм, ширина рабочей зоны составляет 29,1 мм, спектральный диапазон 300 - 1100 нм. Обработка данных и построение графиков осуществлялось на компьютере на специально созданной программе [3].

По снятым спектрам видно, что все три модификации углерода обладают нелинейными оптическими свойствами. Об этом говорит и анализ электронных структур образцов, наличие  $\pi$ -электронных систем приводит к большим величинам нелинейной восприимчивости. По количеству линий спектров можно сделать вывод, что все образцы имеют одинаковое количество возможных сингулярных вариантов переходов электронов между энергетическими уровнями. Действительно, иначе не может быть, т.к. все три спектра являются спектрами аллотропных модификаций одного химического элемента – углерода. Однако спектры имеют разную высоту общего фона, на котором просматриваются два максимума (рис. 1). Общий фон формируется числом колебательных степеней свободы, наличием примесей, неоднородностей и дефектов в образцах.



**Рис. 1.** Спектры люминесценции:  
№1 – фуллерена  $C_{60}$ ; №2 – сажи; №3 – шунгита

Вследствие высокой симметрии молекулы фуллерена  $C_{60}$  и отсутствия примесей он имеет относительно небольшое количество разрешенных колебаний, что нельзя сказать о шунгите. Шунгитовые породы кроме кристаллического и аморфного углерода имеют в своем составе различные силикатные образования, карбонаты, алюмосиликаты и др. Неоднородность пространственного распределения вещества и разнообразный минеральный состав привели к тому, что шунгит имеет максимальную интенсивность общего фона спектра по сравнению со спектрами фуллерена  $C_{60}$  и сажи. Сажа представляет собой совершенно аморфный, дисперсный продукт, по спектру которого видны возможные колебательные состояния атома углерода. Сравнивая спектры трех различных углеродных модификаций, можно сделать вывод, что, независимо от строения аллотропа, квазилинейчатый спектр формируется квантовыми переходами именно в атоме углерода и не зависит от модификации.

Решающую роль в получении квазилинейчатых спектров играют два фактора – это подбор растворителя с удобной матрицей к исследуемой молекуле и оптимальная концентрация раствора. Избыток растворенного вещества может привести к образованию различных кристаллических агрегатов, что приведет к размытию спектральной картины. Поэтому необходимо продолжить данные исследования по поиску растворителей с наиболее удобной матрицей для углеродных модификаций и определению оптимальных концентраций растворов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Макарова Т. Л., Захарова И. Б. Электронная структура фуллеренов и фуллеритов // СПб.: Наука. 2001. 67 с.
2. Теплицкая Т. А. Квазилинейчатые спектры люминесценции как метод исследования сложных природных органических смесей //Изд. Московский университет. 1971. 73 с.
3. Антонов А. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017616306 «Модуль автоматизации спектрального анализа для спектрографа ИСП-51». Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07 мая 2019 г.

УДК 532

## ПОПРАВКИ К ЗАКОНУ СТОКСА

**В. В. Насыров<sup>1</sup>, М. Г. Насырова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

<sup>2</sup>Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск

e-mail: [000612@pnu.edu.ru](mailto:000612@pnu.edu.ru)

*В работе выполнен расчет поправочного коэффициента к формуле закона Стокса, для случая движения сферического тела в трубках, заполненных глицерином.*

Аналитическое выражение закона Стокса, описывающего силу сопротивления  $F^{St}$ , действующую на движущееся в жидкости сферическое тело, достаточно часто приводит-ся в учебной и специализированной технической литературе в следующем виде:

$$F^{St} = 3\pi\mu Ud, \quad (1)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости,  $U$  – модуль скорости сферы относительно жидкости,  $d$  – диаметр сферы.

Как правило, формула (1) используется для количественного определения динамической вязкости жидкости в экспериментальных методах с «падающим шариком». В классических лабораторных практикумах по курсу общей физики присутствует соответствующая лабораторная работа, например, «Определение вязкости жидкости методом Стокса» [1], использующая закон Стокса (1) как исходное уравнение. При этом следует помнить, что формула (1) была получена на основании приближенного решения системы уравнений Навье – Стокса в предположении, сферическое тело движется в неограниченной жидкости. Однако если жидкость находится в сосуде, то на его стенках из-за вязкого трения скорость жидкости становится равной нулю, а вблизи стенок формируются пограничные гидродинамические слои. Это приводит к изменению поля скоростей, и, как следствие, к изменению силы сопротивления  $F_S$ , что можно учесть введением в закон Стокса (1) поправочного коэффициента  $C_{corr}$ :

$$F_S = C_{corr} F^{St}. \quad (2)$$

В 1961 г. Бреннером в работе [4] на основе качественного учета влияния плоских стенок на движение сферического тела получено следующее приближенное выражение для поправочного коэффициента:

$$C_{corr}^{Br} = 1 + 2,105 \frac{d}{D} + o \left[ \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где  $D$  – внутренний диаметр трубки,  $d$  – диаметр движущегося тела. Формулу (3) применяют при обычном для вискозиметров условии [2], [3]:

$$\frac{D}{d} \geq 10. \quad (4)$$

Несмотря на то, что (3) также является приближенным выражением, очевидно, что при проведении опытов по измерению вязкости использование формулы (1) может привести к весьма большим систематическим погрешностям при неправильно подобранном размере сосуда.

В работе [5] на основании результатов выполненного численного моделирования движения сферического тела в неподвижной жидкости вдоль оси цилиндрического сосуда предложена альтернативное выражение для поправочного коэффициента:

$$C_{corr}^{Ns} = 1 + 15,4 \frac{d^2}{D^2} + o \left[ \left( \frac{d}{D} \right)^3 \right], \quad (5)$$

которое более точно совпадает с экспериментом как при условии (4), так и при меньших диаметрах сосуда:

$$\frac{D}{d} \geq 2.$$

Для сравнения поведения поправочных коэффициентов в формулах (3) и (5) на рис. 1 приведен график из работы [5], на котором нанесено два набора экспериментальных данных. В работе [5] для вычисления экспериментальных значений  $C_{corr}$  был применён метод «падающего шарика», в котором измерялась установившаяся скорость стальных шариков, падающих в вертикальных стеклянных трубках, заполненной глицерином. При таком падении сила сопротивления, действующая на шарик при установлении равномерного движения, будет одинаковой в трубках разного диаметра. Поэтому поправочный множитель можно определить формулой

$$C_{corr} = \frac{U_{D/d}}{U_{\infty}}, \quad (6)$$

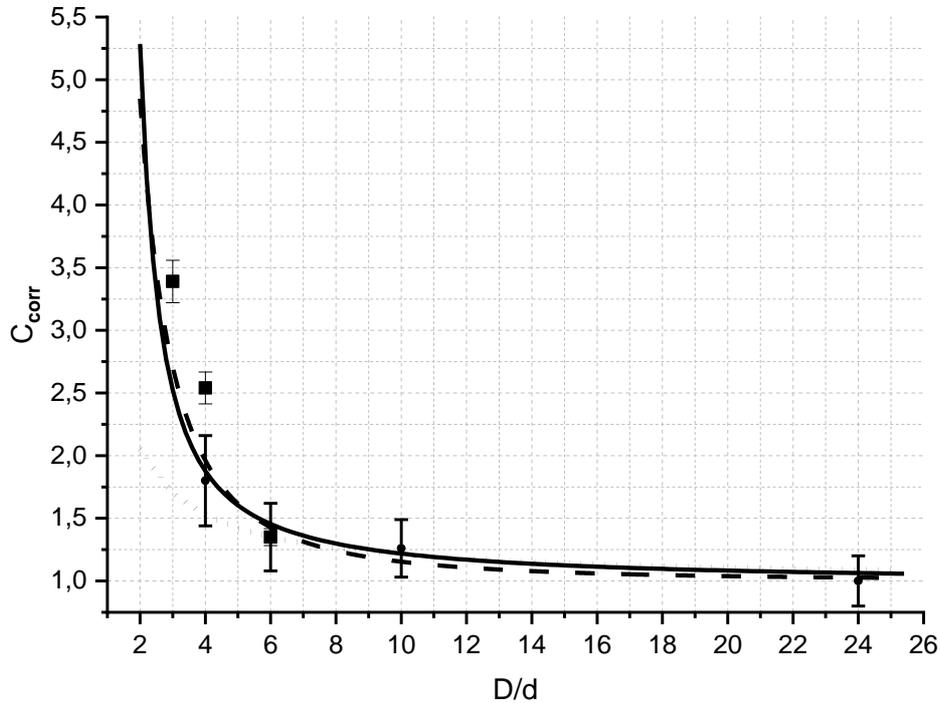
где  $U_{D/d}$  – установившаяся скорость шарика в трубке с диаметром  $D$ ,  $U_{\infty}$  – установившаяся скорость шарика в случае неограниченной жидкости.

Экспериментально значение  $U_{\infty}$  измеряется в достаточно широкой трубке: в [5] использовалась трубка с  $D = 24d$ . В работе [6] измерялась непосредственно сила, действующая на неподвижный шарик, со стороны движущегося потока жидкости (глицерин). Для получения экспериментальных значений  $C_{corr}$  по результатам из [6] использовалась формула (2).

Поправочный коэффициент Бреннера, практически совпадает с экспериментом при  $D/d > 10$ , что соответствует границам применимости формулы (3), интерполяционная формула (5) для поправочного коэффициента, лучше описывает эксперимент в более широком интервале  $D/d$ .

Следует отметить, что (5) получена как интерполяция данных численного моделирования, выполненного в [5], следующей задачи: сферическое тело – «шарик» двигался с фиксированной скоростью 4 мм/с в неподвижном глицерине с вязкостью 0,825039 Па · с.

Так как возможная зависимость поправочного коэффициента от относительной скорости потока в работе [5] не исследовалась, то выяснение этой зависимости и есть цель данной работы.



**Рис. 1.** Зависимость поправочного коэффициента  $C_{corr}$ . Сплошная линия – МКЭ расчёт из [5], пунктирная линия – расчет по формуле (5), точки – расчет по формуле (3), ■ – экспериментальные данные из [6], ● – экспериментальные данные из [5]

Процесс стационарного движения сферического тела в покоящейся жидкости описывается системой уравнений Навье – Стокса, которую при отсутствии поля внешних сил можно записать в следующем виде:

$$\rho(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = \nabla \cdot (-P\hat{I} + \hat{K}), \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\rho\vec{u}) = 0,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $\vec{u}$  – поле скоростей,  $P$  – абсолютное давление,  $\hat{K} = 2\mu\hat{S} - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \vec{u})\hat{I}$  – тензор вязких напряжений,  $\hat{S} = \frac{1}{2}(\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T)$  – тензор скоростей деформации,  $\hat{I}$  – единичная матрица.

Для численного решения системы уравнений (7) был использован метод конечных элементов (МКЭ) [7].

В предположении, что центр шарика находится на оси трубки мы можем выбрать осесимметричную двухмерную постановку задачи, тогда расчетная область представляет собой прямоугольник **B** с вырезом **A**, соответствующим сфере (рис. 2).

Страна прямоугольника  $R = \frac{D}{2}$  – радиус трубки,  $r_0 = \frac{d}{2}$  – радиус шарика, ось  $Z$  совпадает с осью симметрии задачи.

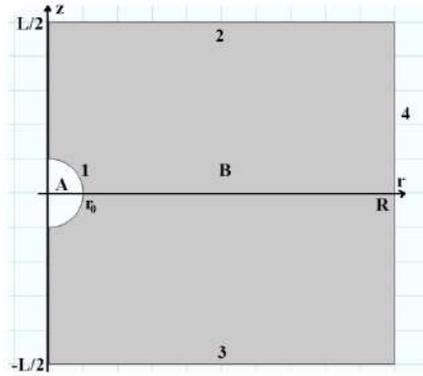


Рис. 2. Геометрия расчетной области

На границах **2** и **3** расчетной области было выбрано граничное условие, соответствующее отсутствию добавочного манометрического давления

$$P_M = P - P_0 = 0. \quad (8)$$

На границе **1** выбрано граничное условие «прилипания» жидкости к поверхности тела, движущегося против оси  $Oz$  со скоростью  $U$ :

$$u_z = -U \text{ при } r = r_0. \quad (9)$$

На границе **4** выбрано граничное условие «прилипания» жидкости к неподвижной стенке

$$\vec{u} = 0 \text{ при } r = R. \quad (10)$$

Корректность выбора граничных условий (8) – (10) проверена автором в работе [5], где было показано, что в расчете при выборе  $D = 100d$ , когда можно пренебречь влиянием стенок сосуда на поле скоростей в потоке жидкости в области, окружающей движущееся тело, численное решение системы уравнений (7) совпадает с аналитическим решением Стокса для случая движения тела в неограниченной жидкости.

В данной работе расчеты выполнены для различных размеров расчетной области ( $L = 40$  мм;  $R = 2 \div 10$  мм,  $r = 1$  мм) и изменяющейся скорости тела в интервале  $U = 4 \div 140$  мм/с. Вязкость жидкости  $\mu = 0,825039$  Па · с (глицерин).

На рис. 3-6 показаны результаты расчетов поля скоростей, в которых очевидно прослеживается возмущение в потоке жидкости в области вблизи стенки, в сечении  $z = 0$  для малых диаметров  $D \leq 5$  (рис. 3 и рис. 4), исчезающее с увеличением диаметра трубки  $D$  (рис. 5 и рис. 6).

Отметим, что в отличие от расчетов в [5] в данном случае инерционные слагаемые  $(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u}$  входящие в систему уравнений (7) были учтены в численном решении.

Схема вычисления поправочного коэффициента, используемая в работе, следует из (2):

$$C_{corr} = \frac{F_S}{3\pi\mu U d}.$$

Вектор силы лобового сопротивления  $\vec{F}_S$  определяется по результатам МКЭ расчетов, как интеграл по поверхности  $\Omega$  шара (граница 1 расчетной области):

$$\vec{F}_S = \iint_{\Omega} \vec{n} \cdot \hat{T} dS,$$

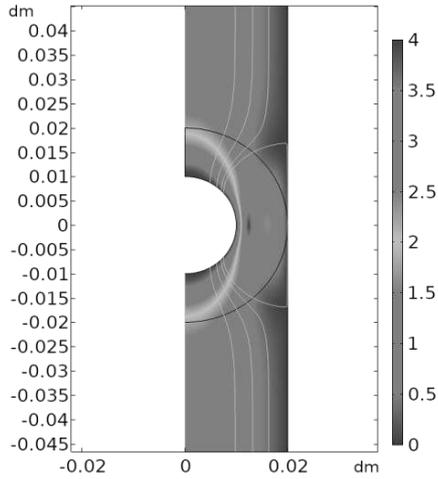
где  $\vec{n}$  – нормаль к поверхности,  $\hat{T} = -P\hat{I} + \hat{K}$  – тензор напряжений.

Вследствие аксиальной симметрии задача модуль силы лобового сопротивления  $F_S$  равен проекции  $\vec{F}_S$  на ось  $Oz$ :

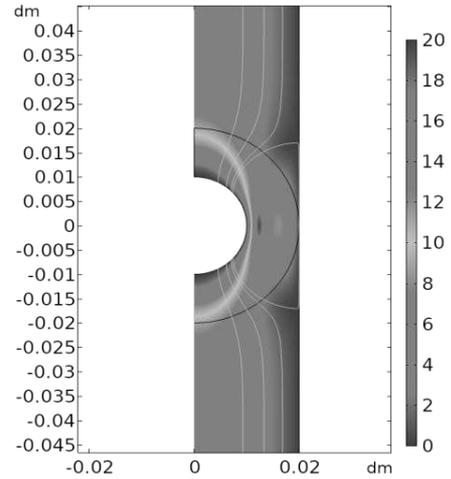
$$F_s = \iint_{\Omega} (T_{rr} \cos \theta - T_{r\theta} \sin \theta) dS,$$

где

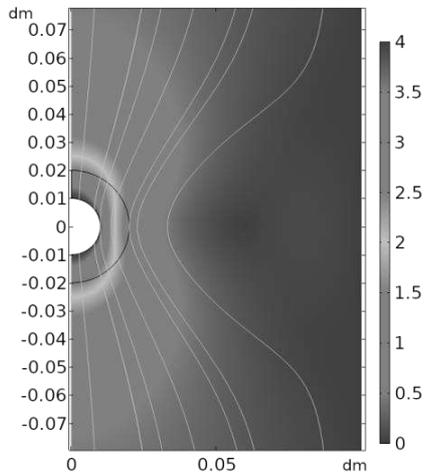
$$T_{rr} = -P(r, \theta) + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad T_{r\theta} = \mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right).$$



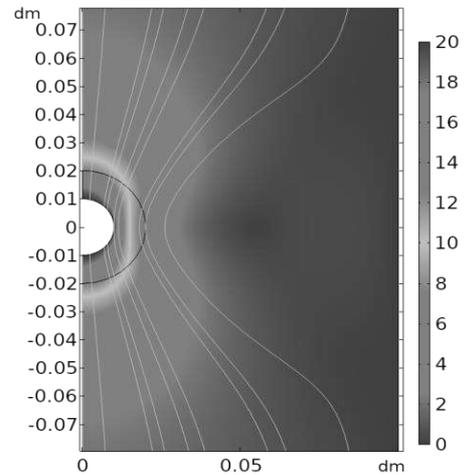
**Рис. 3.** Поле скоростей жидкости в цилиндрической трубке.  
 $D = 2d, U = 4 \text{ мм/с}$



**Рис. 4.** Поле скоростей жидкости в цилиндрической трубке.  
 $D = 2d, U = 20 \text{ мм/с}$



**Рис. 5.** Поле скоростей жидкости в цилиндрической трубке.  
 $D = 10d, U = 4 \text{ мм/с}$



**Рис. 6.** Поле скоростей жидкости в цилиндрической трубке.  
 $D = 10d, U = 20 \text{ мм/с}$

Рассчитанные графики поправочного коэффициента показаны на рис. 7.

Можно отметить, что для модели ламинарного течения коэффициент  $C_{corr}$  увеличивается не более чем на 5% с ростом скорости потока.

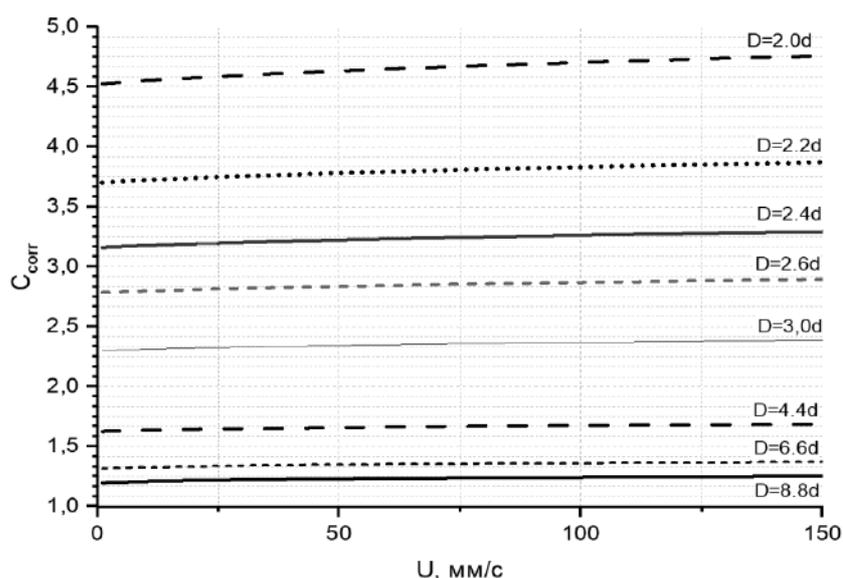


Рис. 7. Зависимость  $C_{corr}$  от скорости потока

В заключении отметим, что существуют отдельные статьи по теме данной работы (например, [4], [8]), но из-за отсутствия в настоящее время точного аналитического решения рассматриваемой задачи, с одной стороны, и широкого практического применения закона Стокса, с другой, численные оценки, предлагаемые в рамках данного исследования, могут иметь несомненное прикладное значение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ерёмина Р. М., Скворцов А. И., Мутыгуллина А. А. Экспериментальные задачи общего физического практикума по молекулярной физике и термодинамике. Процессы переноса. Жидкости и твердые тела. Казань: Казан. ун-т, 2015. С.42.
2. J.R. van Wazer, Lyons J.W., Kim K.Y. and Colwell R.E. Viscosity and Flow Measurement. A Laboratory Handbook of Rheology // Interscience Publishers, New York, 1963.
3. Greenwood M.S., Fazio F., Russotto M. and Wilkosz A. Using the Atwood machine to study Stokes' law // Am. J. Phys. 1986. Vol. 54. pp. 904-906.
4. Brenner H. The slow motion of a sphere through a viscous fluid towards a plane surface // Chemical Engineering Science. 1961. Vol. 16. pp. 24-251.
5. Насыров В.В., Насырова М. Г. О применимости закона Стокса // Математические структуры и моделирование. М.: «Новые технологии». 2020. № 2(54). С.1-8.
6. Dolz M., Casanovas A., Delegido J. and Hernandez M.J. An experimental setup to verify Stokes' law using an electronic balance // Revista Mexicana de Fisica E. 2004. vol. 50. № 1. pp. 29-32.
7. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
8. Auerbach D. Some limits to Stokes' law // Am. J. Phys. 1988. Vol. 56. № 9. pp. 850-851.

**ФОРМИРОВАНИЕ  $BaSi_2$  НА  $Si(111)$  И ИССЛЕДОВАНИЕ  
КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ДИСИЛИЦИДА  
МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ**

**Н. С. Новгородцев<sup>1</sup>, Д. В. Фомин<sup>1</sup>, В. Л. Дубов<sup>1</sup>, С. А. Пячин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Амурский государственный университет, г. Благовещенск

<sup>2</sup>Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск  
e-mail: [nnc19991999@gmail.com](mailto:nnc19991999@gmail.com)

*В работе представлены результаты исследования плёнок дисилицида бария, сформированных методом твердофазной эпитаксии, расчёта параметров элементарной ячейки и размеров кристаллитов на основе данных, полученных методом рентгеновской дифракции.*

Кремний является основным материалом для создания солнечных панелей, используемых на промышленных предприятиях, в автономных городских и сельских поселениях, а также в частных домохозяйствах [1].

К наиболее перспективным фотообразующим элементам относятся широкозонные (1,3–1,4 эВ) силициды металлов, эпитаксиально выращенные на кремнии [2]. Среди них особого внимания заслуживает орторомбический дисилицид бария ( $BaSi_2$ ), ширина запрещенной зоны которого составляет не менее 1,3 эВ [3-5].

Одним из основных способов формирования плёнок  $BaSi_2$  на кремниевых подложках из смеси  $Ba-Si$  является метод твердофазной эпитаксии (ТФЭ).

В данной работе плёнки  $BaSi_2$  были получены в сверхвысоковакуумной камере с остаточным давлением не менее  $10^{-7}$  Па методом твердофазной эпитаксии по следующей методике.

После стандартных процедур очистки кремневой подложки формировался 20 нм затравочный слой  $BaSi_2$  соосаждением бария и кремния со скоростями 0,6 и 0,4 нм/мин соответственно при температуре подложки 600°C.

Затем осуществлялось формирование пленки  $BaSi_2$  толщиной 100 нм при комнатной температуре соосаждением  $Ba$  и  $Si$  при тех же скоростях.

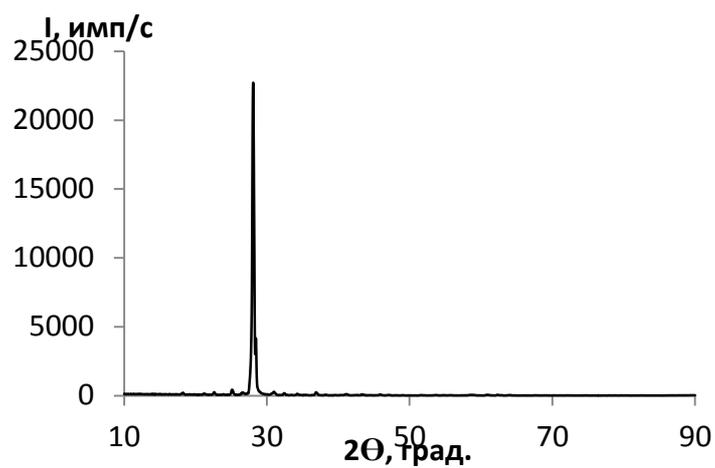
Далее осуществлялась кристаллизация пленок путем нагрева и отжига до высокой температуры 600-800 °С в течение часа для каждой пленки отдельно с последующим охлаждением в течении 10 минут до комнатной температуры.

Всего было сформировано три образца: образец № 1 – при 600°C, образец № 2 – при 700°C и образец № 3 – при 800 °С.

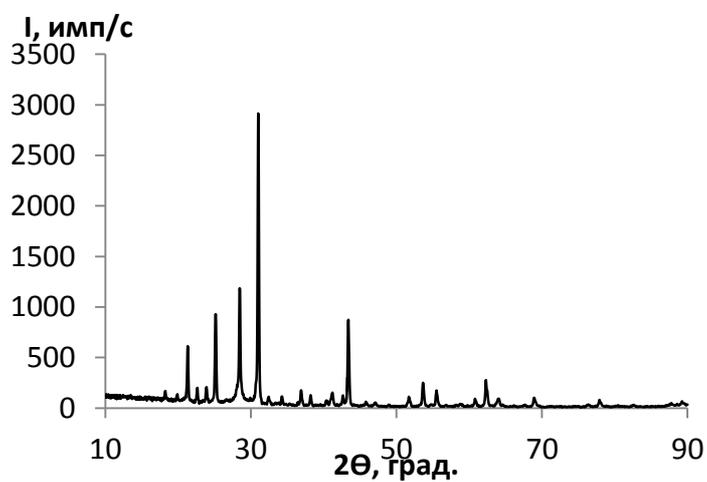
Сформированные пленки были исследованы методом рентгеноструктурного анализа.

Из полученных спектров образцов № 1, 2, 3 (соответственно рисунки 1-3) можно предположить, что термический отжиг при 600, 700 и 800 °С привел к образованию поликристаллических пленок  $BaSi_2$  с орторомбической структурой.

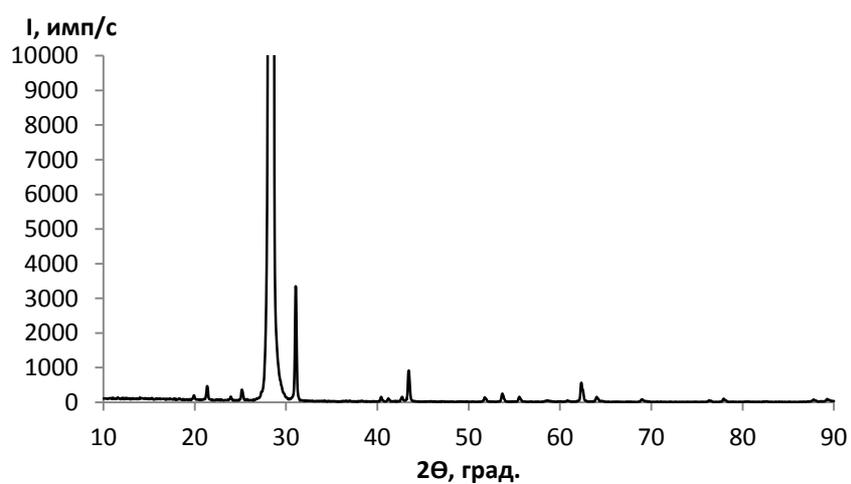
Все линии на спектрах относятся к  $BaSi_2$ . Линии хорошо различимы; полуширина мала, что указывает на высокую степень кристалличности.



*Рис. 1.* Рентгеновский спектр образца № 1



*Рис. 2.* Рентгеновский спектр образца № 2



*Рис. 3.* Рентгеновский спектр образца № 3

Для сформированной фазы силицида бария были рассчитаны периоды кристаллической решетки. Для этого из известных значений межплоскостных расстояний для разных индексов Миллера, представленных в таблицах 1-3, были составлены и решены системы уравнений.

Таблица 1

Значения межплоскостных расстояний в Å

Индексы Миллера			Образец № 1
h	k	l	
2	0	1	4.160
2	1	1	3.537
0	0	4	2.884

$$\begin{cases} 0.057 = \frac{4}{a^2} + \frac{1}{c^2} \\ 0.079 = \frac{4}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} \\ 0.12 = \frac{16}{c^2} \end{cases}$$

Таблица 2

Значения межплоскостных расстояний в Å

Индексы Миллера			Образец № 2
h	k	l	
1	1	2	3.927
2	1	0	3.723
0	1	3	3.342

$$\begin{cases} 0.064 = \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{4}{c^2} \\ 0.072 = \frac{4}{a^2} + \frac{1}{b^2} \\ 0.089 = \frac{1}{b^2} + \frac{9}{c^2} \end{cases}$$

Таблица 3

Значения межплоскостных расстояний в Å

Индексы Миллера			Образец № 3
h	k	l	
1	1	1	4.859
4	1	1	2.084
4	0	1	2.194

$$\begin{cases} 0.042 = \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} \\ 0.230 = \frac{16}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2} \\ 0.207 = \frac{16}{a^2} + \frac{1}{c^2} \end{cases}$$

В табл. 4 приведены рассчитанные из межплоскостных расстояний постоянные решетки орторомбического  $\text{BaSi}_2$  для эталонного поликристаллического образца и пленок образцов № 1, № 2 и № 3.

Таблица 4

Параметры элементарной ячейки сформированных пленок  $\text{BaSi}_2$  и эталона

Образец	$a, \text{Å}$	$b, \text{Å}$	$c, \text{Å}$	$V, \text{Å}^3$
№ 1	8,920	6,719	11,536	691,392
№ 2	9,017	6,600	11,626	691,888
№ 3	8,934	6,665	11,717	697,690
Эталон $\text{BaSi}_2$	8,920	6,800	11,580	702,397

Далее был проведен расчет размеров кристаллитов по формуле Селякова-Шеррера [6-7]: 70 нм - для образцов № 1 и № 3, и 43 нм - для образца № 2.

Полученные данные хорошо коррелируют с данными полученными ранее [8].

Таким образом, методом рентгеновской дифракции было установлено, что для всех трех образцов были сформированы однофазные пленки, состоящие из кристаллитов орторомбического  $\text{BaSi}_2$ .

Используя значения межплоскостных расстояний рассчитаны постоянные решетки сформированных пленок, а также определены размеры кристаллитов. Установлено, что повторный отжиг при  $600^\circ\text{C}$  и при  $800^\circ\text{C}$  приводит к формированию поликристаллической пленки  $\text{BaSi}_2$  со средним размером кристаллитов 70 нм, а при  $700^\circ\text{C}$  - 43 нм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Sze S. M. and Ng K.K. Physics of Semiconductor Devices (Wiley, Third Edition, 2007), 523 p.
2. Borisenko V. E. Semiconducting Silicides (Springer Series in Material Science, 2000), 368 p.
3. Morita K., Inomata Y., Suemasu T. Thin Solid Films 508, 363 (2006).
4. Suemasu T., Usami N., Phys J.. D.: Appl. Phys. 50, 023001 (2017).
5. Deng T., Suemasu T., Shohonov D. A., Samusevich I. S., Filonov A. B., Migas D. B., Thin Solid Films 661, 7 (2018).
6. Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Иванов А. Н., Расторгуев Л. Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия, 1982. 632 С.
7. Вайнштейн Б. К. Структурная электронография. М.: Изд. АН СССР, 1956. 315 С.
8. Влияние ростовых параметров на структуру и температурную стабильность пленок  $\text{BaSi}_2$  на подложках Si(111) как основы для разработки новых солнечных элементов / Н. Г. Галкин, В. Л. Дубов, Д. В. Фомин, К. Н. Галкин, С. А. Пячин // Успехи прикладной физики, 2019. том 7, № 4, С. 345-356.

## ЛЕНГМЮРОВСКИЕ МОНОСЛОИ (CdSe/CdS/ZnS)/SiO<sub>2</sub> ИЗ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

**Е. А. Новиков<sup>1</sup>, А. П. Кузьменко<sup>1</sup>, Д. В. Крыльский<sup>2</sup>, С. В. Дежуров<sup>2</sup>**

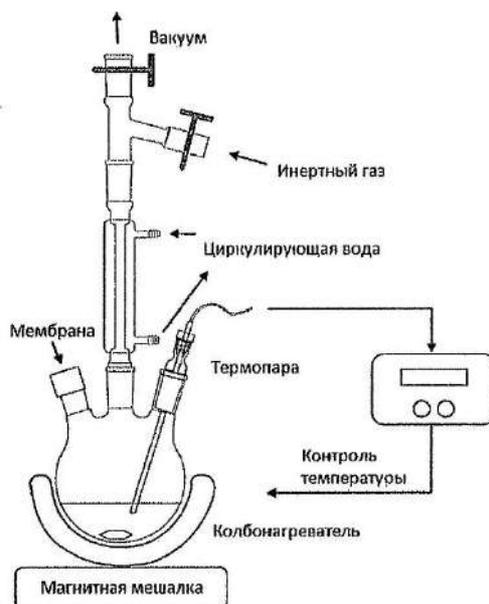
<sup>1</sup>Юго-Западный государственный университет, г. Курск

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт прикладной акустики, г. Дубна

e-mail: [novikov.2403@mail.ru](mailto:novikov.2403@mail.ru)

*Изучено структурирование и формирование ленгмюровских монослоев из стабилизированных триоктилфосфином и его оксидом квантовых точек CdSe/CdS/ZnS, синтезированных методом горячей инъекции (НИИПА, г. Дубна). С использованием поляризационной брестеровской микроскопии установлены рациональные параметры формирования и получены методом Ленгмюра – Блоджетт регулярные плёночные покрытия, изученные методом атомно-силовой микроскопии.*

В работе изучена коллоидная система стабилизированных квантовых точек (КТ) CdSe/CdS/ZnS, полученная методом горячей инъекции в Научно-исследовательском институте прикладной акустики (г. Дубна). Образцы КТ, синтезированные данным методом, обладают высоким уровнем равномерности распределения КТ в дисперсионной среде и отсутствием продуктов окисления, что достигается термостабилизацией в реакторе за счет интенсивного перемешивания в инертной газовой среде (аргон), как это проиллюстрировано на схематичном рис. 1.



**Рис. 1.** Методика коллоидного синтеза КТ

В процедуре синтеза полупроводниковых КТ, согласно [1], выделяются:

1. **Нуклеация.** В нагретую до 200÷300°C и непрерывно перемешиваемую дисперсионную среду, содержащую один из прекурсоров получаемого

полупроводникового соединения, впрыскивается раствор, содержащий другой необходимый прекурсор. Вследствие взаимодействия прекурсоров фиксируется локальное пересыщение раствора с образованием твердофазных зародышей – нуклеация.

**2. Созревание Оствальда.** Дальнейший рост зародышей за счёт присоединения новых провзаимодействовавших прекурсоров приводит к уменьшению концентрации раствора до уровня насыщения. После этого частицы, достигшие определённого критического размера, продолжают свой рост за счёт растворения частиц, не достигших такового. Описанный процесс носит название созревания Оствальда.

Важную роль в технологии синтеза КТ играет стабилизация коллоидной системы, которая должна:

- а) предотвращать агрегацию КТ и при этом не препятствовать их росту;
- б) иметь, с одной стороны, прочную ковалентную связь с поверхностью КТ, а с другой – неподатливость к взаимодействию с растворителем.

Согласно [2], оптимальным вариантом стабилизатора для КТ указанного состава, служат триоктилфосфин (**trioctylphosphine** – ТОР) и его оксид (**trioctylphosphine oxide** – ТОРО), которые, помимо прочего, выступают в качестве пассиваторов [3], блокируя электронные поверхностные состояния и обеспечивая чёткий узкий пик флуоресценции.

**3. Флокуляция.** Полученный раствор стабилизированных КТ нуждается в очищении от побочных продуктов химических реакций и непрореагировавших веществ. Для этого в раствор вводят сильное полярное соединение (как правило, безводный метанол), в среде которого стабилизированные КТ утрачивают устойчивость и выпадают в осадок (флокулируют).

Возможность использования КТ в качестве компонента ленгмюровских плёнок требует наличия:

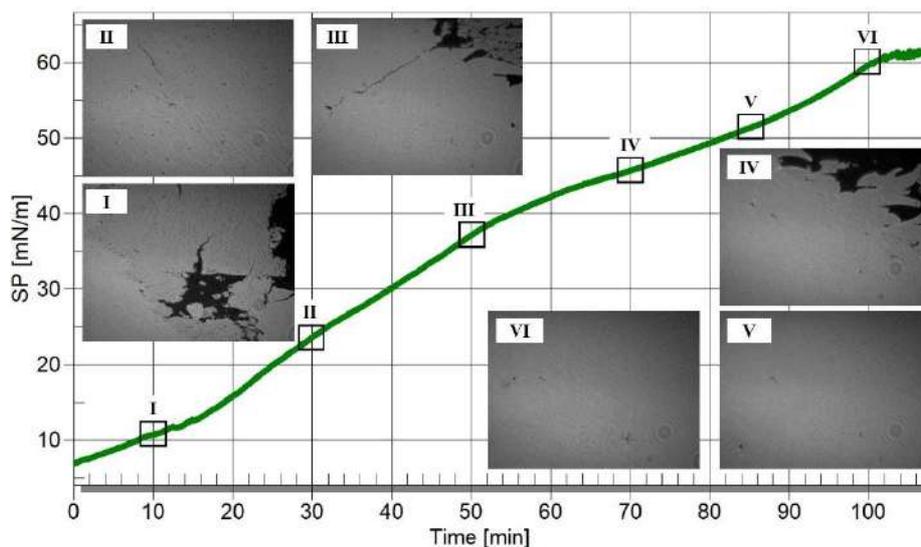
- 1) жидкой дисперсионной среды;
- 2) стабилизирующей оболочки из поверхностно-активных веществ.

Это обеспечивает создание плёночных структур методом Ленгмюра – Блоджетт из стабилизированных ТОР и ТОРО КТ CdSe/CdS/ZnS, как это показано в [4, 5], а также методом спиннингования [6].

Методом факторного анализа были установлены рациональные значения управляющих параметров формирования однородных плёнок Ленгмюра – Блоджетт (в частности, температуры субфазы, скоростей движения барьеров и диппера, а также концентрации КТ в коллоидном растворе). Решающая роль среди этих параметров отводилась температуре субфазы и скорости, а концентрация КТ на поверхности субфазы и скорость движения барьеров определяли лишь время наступления плотноупакованного состояния наночастиц в монослое. При этом чем больше скорость и концентрация, тем быстрее наступит это состояние в пределах данной ленгмюровской ванны.

Совмещение временной развёртки изотермы сжатия монослоя с его брюстеровскими изображениями (рис. 2) позволяет определить указанный момент времени.

На рис. 2 приведена изотерма сжатия монослоя из раствора КТ (объем – 3 мкл, скорость движения барьеров – 1 мм/мин) и его брюстеровские изображения, полученные в определённые моменты времени. Именно эти изображения позволили установить, что плотноупакованное состояние монослоя наступает спустя 85 минут после старта барьеров. Молекулярный конструктор Ленгмюра – Блоджетт (KSV Nima 2002, с габаритами ленгмюровской ванны 315×75 мм и шагом изменения скоростей барьера и диппера 0,1 мм) оснащён системами термостатирования и термоконтроля, имеет программное обеспечение, автоматизирующее процесс создания плёночных структур, фиксирующее и обрабатывающее в оперативном режиме текущие параметры эксперимента (поверхностное давление, координаты барьеров и пр.).

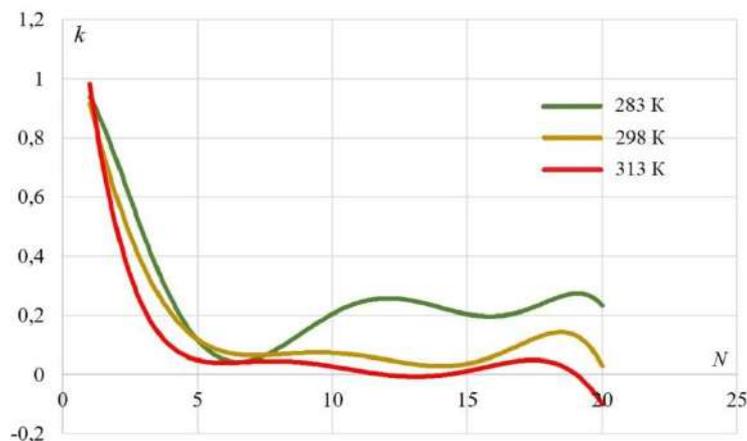


**Рис. 2.** Кинетика ленгмюровского монослоя КТ CdSe/CdS/ZnS

На этой основе были изучены температурные зависимости коэффициента переноса –  $k$  ленгмюровского монослоя в зависимости от числа наносимых слоев –  $N$  (рис. 3):

$$k = \frac{S_1 - S_0}{S_{\text{п}}}$$

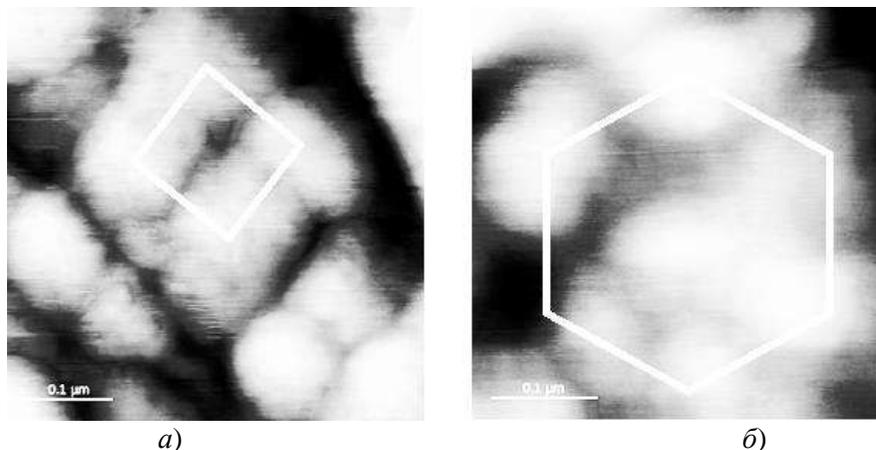
где  $S_0$  и  $S_1$  – площадь ленгмюровского монослоя соответственно до и после однократного прохождения подложки сквозь него,  $S_{\text{п}}$  – погружённая в толщу субфазы площадь подложки.



**Рис. 3.** Динамическая зависимость коэффициента переноса от числа последовательных осаждений ленгмюровской плёнки из КТ CdSe/CdS/ZnS при различных температурах субфазы

Из рис. 3 видно, что лишь первый слой переносится на кремниевую подложку, практически не разрушаясь. Каждый последующий слой осаждается фрагментарно, а в некоторых случаях уже осажённые КТ возвращаются обратно на поверхность субфазы. Данный вывод подтверждается с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ) (Aist NT, Smart SPM, с пространственным разрешением по высоте 30 нм). Так, показано, что многослойные плёночные структуры из КТ, полученные при больших температурах субфазы, отличаются меньшей упорядоченностью. Это объясняется тем, что КТ обретают

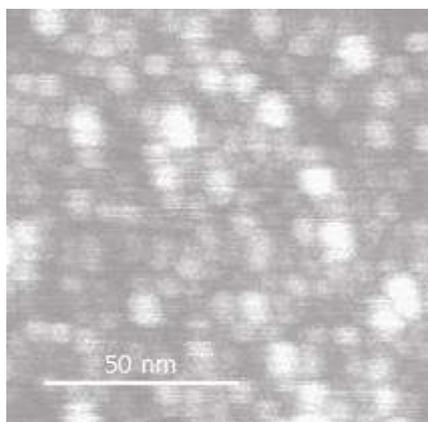
большую подвижность за счёт притока тепловой энергии от молекул воды. Если в осаждённых при 283 К плёнках локально ещё наблюдались линейные, тетрагональные (рисунок 4, а) или гексагональные (рис. 4, б) структуры, то в сформированных при 313 К подобная упорядоченность не обнаруживается.



**Рис. 4.** Тетрагональные (а) и гексагональные (б) структуры из КТ CdSe/CdS/ZnS, образованные при температуре субфазы 283 К

Немаловажную роль в получении сплошного плёночного покрытия играет не только количество слоёв, но и скорость движения диппера: она определяет силу, противодействующую поверхностному натяжению.

Сбалансированность этих сил позволяет получить сплошную регулярную плёночную структуру из КТ (рис. 5). Эмпирически установлено рациональное значение скорости диппера: 20 мм/мин.



**Рис. 5.** АСМ-изображение однослойной ленгмюровской плёнки, сформированной из КТ CdSe/CdS/ZnS на водной субфазе

Таким образом, показано, что методом Ленгмюра – Блоджетт из КТ, к примеру, КТ CdSe/CdS/ZnS могут создаваться регулярные плёночные структуры, которые могут получить практическое применение по назначению, в частности, в светодиодных элементах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Матюшкин Л. Б. Особенности синтеза люминесцирующих полупроводниковых наночастиц в полярных и неполярных средах / Л. Б. Матюшкин [и др.] // Биотехносфера. 2013. № 2. С. 28- 33.
2. Murray C. B. Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E=sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites // C. B. Murray, D. J. Norris, M. G. Bawendi // Journal of the American Chemical Society. 1993. Vol. 115. № 19. P. 8706-8715.
3. Green M. The nature of the quantum dot capping ligands / M. Green // Journal of Materials Chemistry. 2010. Vol. 20. № 28. P. 5797-5809.
4. Горбачёв И. А., Штыков С. Н., Глуховской Е. Г. Получение и флуоресценция многослойных плёнок Ленгмюра – Блоджетт, содержащих квантовые точки CdSe/CdS/ZnS // Известия Саратовского университета. Новая серия: Физика. 2015. Т. 15. № 1. С. 40-45.
5. Al-Alwani A. J. K. Formation and optoelectronic properties of graphene sheets with CdSe/CdS/ZnS quantum dots monolayer formed by Langmuir-Schaefer hybrid method / A. J. K. Al-Alwani [et al.] // Applied Surface Science. 2017. Vol. 424. P. 222-227.
6. Кузьменко А. П. Центрифугированные плёнки из микрокапсулированных квантовых точек CdS / А. П. Кузьменко, Е. А. Новиков, М. А. Пугачевский [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и Технологии. 2019. Т. 9. №3. С. 88-107.

УДК 539

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ $(\text{CuO})_{1-x}/(\text{BaTiO}_3)_x$

**Е. В. Стукова<sup>1</sup>, С. В. Барышников<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Амурский государственный университет, г. Благовещенск

<sup>2</sup>Благовещенский государственный педагогический университет, г. Благовещенск

e-mail: [lenast@bk.ru](mailto:lenast@bk.ru)

*Исследованы температурные зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  и коэффициента третьей гармоники  $\gamma_{3\omega}$  для композитной керамики  $(\text{CuO})_{1-x}/(\text{BaTiO}_3)_x$  в температурном диапазоне 100 – 300 К. Показано, что для CuO зависимости  $\epsilon'(T)$  имеет незначительную аномалию при температуре перехода  $T_{N2} = 230$  К. Максимальные значения третьей гармоник приходятся на середину температурного интервала  $[T_{N1}; T_{N2}]$ . С ростом содержания титаната бария наблюдается рост диэлектрической проницаемости и сдвиг полярной области в сторону низких температур.*

Большой интерес к исследованию свойств композитных соединений вызван тем, что такие структуры могут иметь необычные свойства по сравнению с однородными материалами. Одной из целей таких исследований является выявление изменений свойств микро и наночастиц в смесях. В ряде работ [1-3] было установлено, что и для сегнетоэлектрических композитов возможно взаимное влияние компонентов на свойства друг друга. Для композитов  $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{BaTiO}_3)_x$ ,  $(\text{KNO}_3)_{1-x}/(\text{KNbO}_3)_x$  наблюдается расширение существования сегнетоэлектрической фазы нитрата калия [1, 2]. Для  $(\text{NaNO}_2)_{1-x}/(\text{BaTiO}_3)_x$  эффект взаимодействия приводит к увеличению температурного диапазона существования несогласованной фазы нитрата натрия [3].

В настоящее время существует значительный интерес к изучению свойств материалов, в которых в одной фазе одновременно сосуществуют хотя бы два из трех типов упорядоче-

ния: ферромагнитный, сегнетоэлектрический и сегнетоэластичный. Такие вещества называют мультиферроиками. Их свойствами можно управлять одновременным воздействием нескольких внешних полей, что может расширить возможности нелинейных систем и привести к возникновению новых свойств из-за взаимодействия различных систем упорядочения. Интерес к исследованию мультиферроиков связан с их возможным практическим применением, например, в спинтронике или при разработке запоминающих устройств с множественными состояниями, в которых данные хранятся в виде электрической и магнитной поляризации [4, 5].

Многие работы по мультиферроикам посвящены изучению классического магнитоэлектрического механизма, который обусловлен взаимодействием сегнетоэлектрического и магнитного параметров порядка [6, 7]. Кроме того, имеются публикации по исследованию механизма неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия [8], учет которого является важным при наличии магнитной неоднородности. Эти механизмы приводят к новым физическим эффектам в мультиферроиках, например, появление несобственной поляризации [9-11] и др.

В данной работе приводятся результаты исследования линейных и нелинейных диэлектрических свойств композитной керамики, полученной на основе мультиферроика CuO и сегнетоэлектрика BaTiO<sub>3</sub>, в температурном диапазоне от 80 до 300 К.

Оксид меди является мультиферроиком II типа, где появление сегнетоэлектрического упорядочения является следствием существования магнитного упорядочения. Оксид меди имеет моноклинную кристаллическую структуру (пространственная группа  $C2/c$ ). Каждый атом меди находится в центре симметрии и окружен четырьмя атомами кислорода, в результате чего формируется плоскость CuO<sub>4</sub>. В интервале между  $T_{N1} = 213$  К и  $T_{N2} = 230$  К существует сегнетоэлектрическое состояние со спонтанной поляризацией  $P_s$ , направленной вдоль кристаллографической оси  $b$  [19]. Величина  $P_s$ , оцененная по различным методикам, составляет порядка  $10^{-2}$  мкКл/см<sup>2</sup>, что сопоставимо с наиболее известными индуцированными мультиферроиками. Кроме этого CuO является полупроводником, ширина запрещенной зоны которого составляет  $E_g = 1,45$  эВ (при  $T = 290$  К).

Титанат бария имеет три фазовых перехода, которые относятся к переходам типа смещения. Выше точки Кюри (393 К) BaTiO<sub>3</sub> имеет кубическую кристаллическую структуру типа перовскита. Эта параэлектрическая модификация относится к пространственной группе  $Pm3m$ . При температуре 393 К скачком происходит искажение формы ячейки и возникает спонтанная поляризация, величина которой плавно нарастает от  $P_s = 18$  мкКл/см<sup>2</sup> в точке Кюри до  $\sim 26$  мкКл/см<sup>2</sup> при комнатной температуре. При понижении температуры ниже 278 К BaTiO<sub>3</sub> испытывает второй фазовый переход и кристалл переходит из тетрагональной симметрии класса  $P4mm$  в ромбическую. При дальнейшем охлаждении титанат бария испытывает еще один фазовый переход ( $\sim 176$  К), где симметрия кристаллической решетки меняется с ромбической на ромбоэдрическую [20].

Для получения композитной керамики (CuO)<sub>1-x</sub>/(BaTiO<sub>3</sub>)<sub>x</sub> использовались порошки химически чистых BaTiO<sub>3</sub> и CuO, которые тщательно смешивались в определенных пропорциях и прессовались при давлении 8000 кг/см<sup>2</sup>, после чего спекались при температуре 1250 °С. Для исследований использовались композиты (CuO)<sub>1-x</sub>/(BaTiO<sub>3</sub>)<sub>x</sub> следующих составов:  $x = 0,1; 0,3; 0,4$  (под  $x$  для композитов понимаются объемные доли компонентов). Образцы имели форму дисков диаметром 10 мм и толщиной 1 – 2 мм. В качестве электродов использовалась индий-галлиевая эвтектика.

Для измерения диэлектрических свойств использовался цифровой измеритель иммитанса E7-25 с частотным диапазоном от 25 Гц до 1 МГц. Измерения проводились в режиме непрерывного охлаждения и нагрева в диапазоне от 80 до 300 К со скоростью 1 К/мин. Амплитуда измерительного напряжения составляла 0,7 В. Для измерения температуры использовался медный термометр-сопротивление, при этом точность определения температуры составляла около 0,1 К. Данные с измерителя иммитанса и термометра по-

давались на компьютер и обрабатывались в автоматическом режиме.

Нелинейные диэлектрические свойства исследовались с помощью установки, включающей генератор гармонических колебаний с рабочей частотой 2 кГц. Максимальная напряженность на образце составляла около 80 В/мм. Сигнал снимался с резистора, включенного последовательно с образцом, и подавался на цифровой анализатор спектра, в качестве которого служил компьютер с 24-разрядным аналого-цифровым преобразователем ZET 230 и программным обеспечением ZetLab.

В сегнетоэлектриках при приложении электрического поля  $E$ , меньше коэрцитивно-го, переключение поляризации не имеет места, и электрическое смещение  $D$  разлагается как степенной ряд по  $E$  [21, 22]

$$D = P_s + \varepsilon \frac{\partial P}{\partial E} E + \frac{1}{2} \varepsilon^2 \frac{\partial^2 P}{\partial E^2} E^2 + \frac{1}{6} \varepsilon^3 \frac{\partial^3 P}{\partial E^3} E^3 + \dots + \frac{1}{n!} \varepsilon^n \frac{\partial^n P}{\partial E^n} E^n =$$

$$= P_s + \varepsilon_1 E + \varepsilon_2 E^2 + \varepsilon_3 E^3 \dots, \quad (1)$$

где  $P_s$  – спонтанная поляризация, величина  $\varepsilon_1$  обозначает линейную диэлектрическую проницаемость, а  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$  обозначают диэлектрические проницаемости второго и третьего порядков соответственно. Нелинейная зависимость  $D$  от  $E$  приводит к тому, что при приложении к образцу электрического поля, изменяющегося по закону  $E = E_0 \sin(\omega t)$ , в токе, проходящем через резистор, будут присутствовать высшие гармоники на частотах  $2\omega$ ,  $3\omega$ , ..., амплитуды которых будут пропорциональны  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_3$ , ... соответственно. В работе исследовался температурный ход коэффициента третьей гармоники  $\gamma_{3\omega} = (u_{3\omega}/u_\omega)$  – отношение амплитуды гармоники на частоте  $3\omega$  к амплитуде основного сигнала.

Как было показано в [22], для сегнетоэлектриков с фазовым переходом первого рода ток третьей гармоники будет определяться соотношением:

$$I_{3\omega} = 3 \left( \omega S \chi^4 \frac{U_0^3}{h^3} \right) \left[ (\beta + 10\gamma P_s^2) + \frac{5}{2} \omega S \frac{U_0^2}{h^2} \gamma \chi^2 \right] \cos(3\omega t). \quad (2)$$

Учитывая выражение для  $I_\omega$

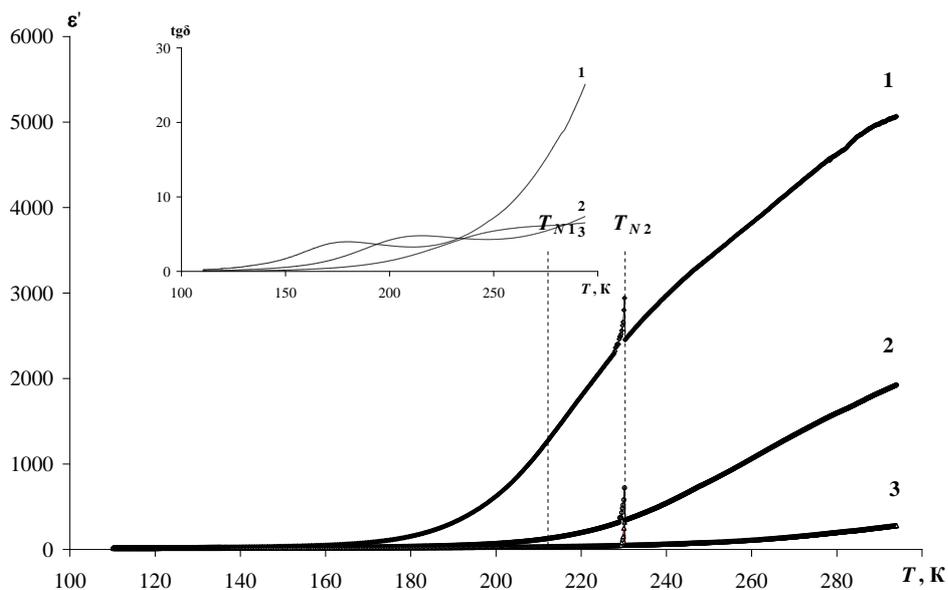
$$I_\omega = \left( \omega \chi \frac{U_0}{h} \right) \sin(\omega t),$$

получим коэффициент третьей гармоники  $\gamma_{3\omega} = I_{3\omega}/I_\omega$

$$\gamma_{3\omega} = 3 \left( \chi^3 \frac{U_0^2}{h^2} \right) \left[ (\beta + 10\gamma P_s^2) + \frac{5}{2} \omega S \frac{U_0^2}{h^2} \gamma \chi^2 \right], \quad (3)$$

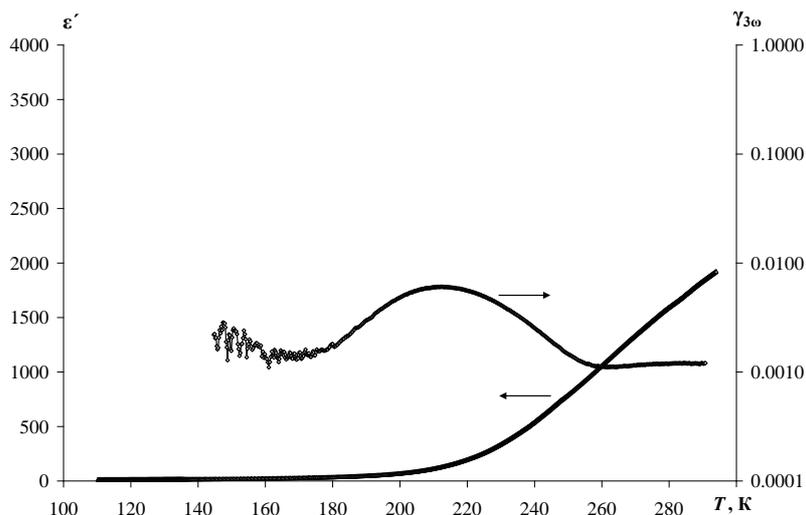
где  $\chi_1$  – диэлектрическая восприимчивость,  $P_s$  – спонтанная поляризация,  $\beta$  и  $\gamma$  – коэффициенты разложения Ландау,  $S$  и  $h$  – размеры образца. Из (3) следует, что коэффициент третьей гармоники  $\gamma_{3\omega}$  значительно возрастает в полярной фазе за счет возникновения спонтанной поляризации и имеет минимум в точке фазового перехода за счет обращения  $P_s$  в ноль. Таким образом, исследование температурной зависимости генерации третьей гармоники является удобным методом регистрации сегнетоэлектрического состояния.

На рис. 1 приведены температурные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'(T)$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta(T)$  для CuO. Как показали исследования, для этого образца характерны возрастание  $\varepsilon'$  и  $\text{tg}\delta$  с увеличением температуры и незначительные аномалии при температуре перехода  $T_{N2} = 230$  К, соответствующей температуре  $T_{N2}$ . При температуре  $T_{N1} = 212$  К аномалия  $\varepsilon'(T)$  еще меньше и наблюдается только при низких частотах  $f \sim 100$  Гц. С ростом частоты  $\varepsilon'$  убывает, что, по-видимому, связано с межслоевой поляризацией за счет зернистости образцов, хотя значительная дисперсия  $\varepsilon'(\omega)$  была обнаружена и для монокристаллов CuO [1].



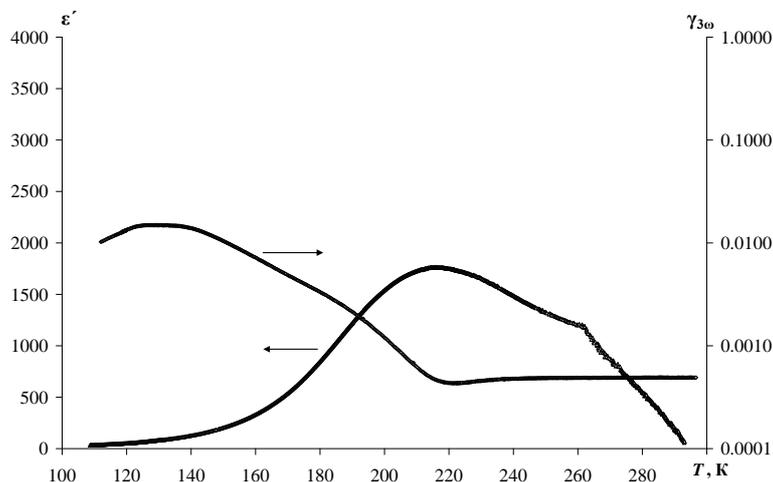
**Рис. 1.** Температурные зависимости  $\epsilon'$  и  $\text{tg}\delta$  (вставка) для  $\text{CuO}$  на частотах 1 кГц (1), 10 кГц (2) и 100 кГц (3)

На рис. 2 и 3 представлены температурные зависимости  $\epsilon'(T)$  и коэффициента третьей гармоники  $\gamma_{3\omega}(T)$  для  $\text{CuO}$  и  $(\text{CuO})_{1-x}/(\text{BaTiO}_3)_x$  с различным содержанием титаната бария. Как следует из рис. 2, в области  $T_{N2} - T_{N1}$  коэффициент третьей гармоники  $\gamma_{3\omega}$  для  $\text{CuO}$  имеет тот же порядок, что и для классических сегнетоэлектриков, несмотря на то, что  $\text{CuO}$  имеет малые значения спонтанной поляризации. Этот результат свидетельствует о том, что характерный для сегнетоэлектриков стандартный механизм нелинейности не пригоден для описания мультиферроиков второго рода, где сегнетоэлектрическое состояние индуцируется магнитным упорядочением. Таким образом, для объяснения полученных экспериментальных результатов необходимо учитывать и магнитную нелинейность.



**Рис. 2.** Температурные зависимости  $\epsilon'$  (на частоте 10 кГц) и коэффициента третьей гармоники тока для  $\text{CuO}$ . Напряженность поля основного сигнала составляла 5 В/см

Увеличение содержания  $\text{BaTiO}_3$  до десяти  $x = 0,1$  приводит к увеличению диэлектрической проницаемости и  $\text{tg}\delta$   $(\text{CuO})_{1-x}/(\text{BaTiO}_3)_x$ . При 230 К на частоте 10 кГц  $\text{tg}\delta$  увеличивается с 4 для чистого  $\text{CuO}$  до 25 для  $(\text{CuO})_{0,9}/(\text{BaTiO}_3)_{0,1}$ . Кроме этого в районе  $T = 270$  К появляется некоторая аномалия  $\varepsilon'(T)$  обусловленная фазовым переходом (ромбическая / тетрагональная фаза) титаната бария. Из зависимости  $\gamma_{3\omega}(T)$  можно сделать заключение о том, что полярная область расширяется в сторону более низких температур.



**Рис. 3.** Температурные зависимости  $\varepsilon'$  (на частоте 10 кГц) и коэффициента третьей гармоники для  $(\text{CuO})_{0,9}/(\text{BaTiO}_3)_{0,1}$

Дальнейшее повышение содержания титаната бария в композите приводит к еще большему увеличению диэлектрической проницаемости (до  $x = 0,40$ ) и в частности аномалии  $\varepsilon'(T)$  в районе  $T \sim 270$  К. На графике  $\gamma_{3\omega}(T)$  появляется дополнительная аномалия при  $T \sim 170$  К, связанная с фазовым переходом (ромбоэдрическая / ромбическая фаза) титаната бария. Аномалий коэффициента третьей гармоники в районе  $T \sim 270$  К связанного с переходом (ромбическая / тетрагональная фаза) не наблюдается, по видимому, в связи с высокой проводимостью в этой области температур.

Таким образом, проведенные исследования показали, что коэффициент третьей гармоники  $\gamma_{3\omega}$  для мультиферроика  $\text{CuO}$  в сегнетоэлектрической фазе имеет тот же порядок, что для классических сегнетоэлектриков.

Это свидетельствует о том, что в нелинейность  $\text{CuO}$  дает вклад не только электрическая нелинейность, но и магнитная. С ростом содержания титаната бария в композитах  $(\text{CuO})_{1-x}/(\text{BaTiO}_3)_x$  наблюдается рост диэлектрической проницаемости и сдвиг полярной области в сторону низких температур.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Stukova E. V., Baryshnikov S. V. Stabilization of the ferroelectric phase in  $(\text{KNO}_3)_{1-x}-(\text{BaTiO}_3)_x$  composites // Inorganic materials: applied research. 2011. V.2. № 5. P.434-438.
2. Стукова Е. В., Барышников С. В. Диэлектрические исследования сегнетоэлектрических композитов на основе  $(\text{KNO}_3)_{1-x}-(\text{KNbO}_3)_x$  // Перспективные материалы. М., 2011. № 13. С.801-805.
3. Baryshnikov S.V., Stukova E.V., Koroleva E.Yu. Dielectric properties of the ferroelectric composite  $(\text{NaNbO}_3)_{0,9}/(\text{BaTiO}_3)_{0,1}$ . // Composites: Part B. 2014. V. 66. P.190-193.
4. Wang K. F., Liu J. M., Ren Z. F. Multiferroicity: the coupling between magnetic and polarization orders // Advances in Physics. 2009. V. 58. P. 321-448.
5. Ma J., Hu J., Li Z., and Nan C.-W. Recent progress in multiferroic magnetoelectric composites: from bulk to thin films // Adv. Mater. 2011. V. 23. №. 9. P. 1062-1087.

6. Смоленский Г. А., Чупис И. Е. Сегнетомагнетики // УФН. 1982. Т. 137. № 3. С. 415-448.
7. Веневцев Ю. Н., Гагулин В. В., Любимов В. Н. Сегнетомагнетики. М: Наука, 1982. с.224.
8. Звездин А. К., Пятаков А. П. Неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие в мультиферроиках и вызванные им новые физические эффекты // УФН. 2009. Т. 179. С. 897-904.
9. Kimura T., Goto T., Shintani H., Ishizaka K., Arima T., Tokura Y. Magnetic control of ferroelectric polarization // Nature. 2003. V. 426. P. 55-59.
10. Кадомцева А. М., Попов Ю. Ф., Воробьев Г. П., Камиллов К. И., Пятаков А. П., Иванов В. Ю., Мухин А. А., Балбашов А. М. Специфика магнитоэлектрических эффектов в новом сегнетомагнетике  $GdMnO_3$  // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 81. С. 22-26.
11. Ishiwata Sh., Taguchi Y., Murakawa H., Onose Y., Tokura Y. Low-Magnetic-Field Control of Electric Polarization Vector in a Helimagnet // Science. 2008. V. 319. P. 1643-1651.

УДК 539.2

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОТЖИГА НА СВОЙСТВА ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ГАФНИЯ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

**Тант Син Вин, А. П. Кузьменко, Мьо Мин Тан**

Юго-Западный государственный университет, г. Курск  
e-mail: [thantsinwin2014@gmail.com](mailto:thantsinwin2014@gmail.com)

*В данной работе исследовано влияние температуры отжига на нанопленки из гафния, полученные методом магнетронного распыления на постоянном токе на подложки Si. В высокотемпературной ячейке (НТК-16) на рентгеновском дифрактометре был проведен отжиг нанопленок через  $100^\circ\text{C}$  до  $700^\circ\text{C}$ .*

*Вплоть до  $100^\circ\text{C}$  по данным XRD структура пленок была аморфной. При дальнейшем повышении температуры отжига отмечена их кристаллизация. При  $500^\circ\text{C}$  в нанопленках из гафния формировалась моноклинная структура, соответствующая диоксиду гафния –  $HfO_2$ . изучена Морфологические структурные изменения нанопленок при каждой температуре отжига были изучены с помощью AFM.*

*По профилям шероховатости поверхности (с пространственным разрешением 30 нм) определены значения асимметрии и эксцесса, характеризующие изменения в структуре нанопленок.*

В последние годы наноструктурированные материалы стали широко использоваться в различных областях электронике, оптике, для записи и хранения данных на магнитных носителях, в качестве катализаторов, в керамических материалах и нанокompозитах [1-5].

Так пленки из  $HfO_2$  в оптоэлектронных устройствах, оптических фильтрах, зеркалах обладают высокой отражательной способностью, что применимо в мощных лазерах из-за характерного для них высокого показателя преломления, порога повреждения лазера или прозрачности [2].

Спрос на недорогие, быстрые и надежные электронные устройства с высокой эффективностью сформировавшийся в течение последнего десятилетия строился на кремниевой электронике с диэлектрическим затвором  $SiO_2$  пока не были достигнуты как технологические, так и физические пределы [3,4].

Дальнейшее уменьшение толщины диэлектрика затвора  $SiO_2$  сдерживается диэлектрической проницаемостью и эффектом электронного туннелирования [5]. В связи с вышеупомянутыми трудностями большой интерес вызвала альтернативная замена материала затвора  $SiO_2$ .

Среди различных диэлектрических материалов, таких как  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  и  $\text{HfO}_2$ , оксид гафния привлек приемлемой ширине запрещенной зоны, отличным электрическим свойствам и высокой диэлектрической проницаемостью [6].

Электрические свойства оксида гафния ( $\text{HfO}_2$ ) и других оксидов металлов с высокими диэлектрическими константами в настоящее время исследуются с большим интересом, особенно в связи с перспективными возможностями, которые эти материалы нашли для замены оксида кремния в основе металл-оксид-полупроводниковых (МОП) транзисторов [7].

Изменение электрических и структурных свойств МОП – емкости на основе  $\text{HfO}_2$  с низкой шероховатостью поверхности исследованы в [8].

Тонкие пленки гафния наносились на кремниевые подложки методом магнетронного распыления постоянного тока на установке МВУ ТМ Magna.

Перед осаждением подложки разогревались до  $130^\circ\text{C}$  в течение 60 секунд, затем проводилась их ионная очистка (60 мА, 120 с).

Использованы гафниевые мишени (ООО ГИРМЕТ, 99,99%). Распыление осуществлялось на мощности 300 Вт, в течение 300 с с расходом аргона 0.7 Па. Напыленные пленки выдерживались при н.у. 64 дня.

После чего они были изучены с помощью методов рентгеноструктурного анализа – XRD (GBC EMMА, 60 кВ/80 мА, 0.005 %, мощность излучения 2.2 кВт, шаг гониометра 0.002, воспроизводимость 0.0001) и атомно-силовой микроскопии – AFM (Smart SPM AistNT, площадь сканирования  $100\text{ мкм}^2$ , пространственное разрешение по Z координате – 30 пм).

Отметим, что металлический гафний имеет высокую температуру плавления – 2233, и характеризуется многовалентностью – 0, 2, 3, 4, с моноклинной – ниже  $1650^\circ\text{C}$ , тетрагональной – от  $1650$  до  $2500^\circ\text{C}$  и кубической – выше  $2500^\circ\text{C}$  сингониями.

По аналогии с ранее выполненными исследованиями процессов деградации в металлических магнетронных нанопленках из переходных металлов [9-10], изучено окисление и морфологические изменения поверхности нанопленок из металлического гафния с одинаковой толщиной (порядка 200 нм), каждая из которых отжигалась при соответствующей температуре, изменяемой с шагом  $100^\circ\text{C}$  от комнатной до  $700^\circ\text{C}$ .

Рентгенограммы нанопленок в исходном состоянии и после отжига показаны на рис. 1. В спектрах вплоть до  $100^\circ\text{C}$  нанопленки характеризовались аморфной структурой. Структурный переход от аморфного к кристаллическому состояниям возникал в нанопленках при отжиге, начиная с температуры  $200^\circ\text{C}$ .

Очевидно, он обусловлен тремоактивацией достаточной для кристаллизации нанопленок. Начиная с  $500^\circ\text{C}$  и до использованной  $700^\circ\text{C}$ , отмечается формирование моноклинной структуры, характерной диоксиду гафния:  $\text{Hf} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HfO}_2$  – плоскость  $(\bar{1}11)$ , что коррелирует с данными [11].

Заметные изменения в рентгенограммах наблюдались на рефлексах от плоскостей  $\text{HfO}_2$  – (002) и  $\text{Hf}$  – (111) соответственно (рис. 1).

В процессе отжига при изменениях температуры от  $25^\circ\text{C}$  до  $700^\circ\text{C}$  наблюдалось исчезновение линии от плоскости (111) при  $700^\circ\text{C}$ , что указывает на полное окисление гафния, по крайней мере, в поверхностном слое нанопленки – 5 нм, что подтверждается данными просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения по толщине  $\text{HfO}_2$  [11].

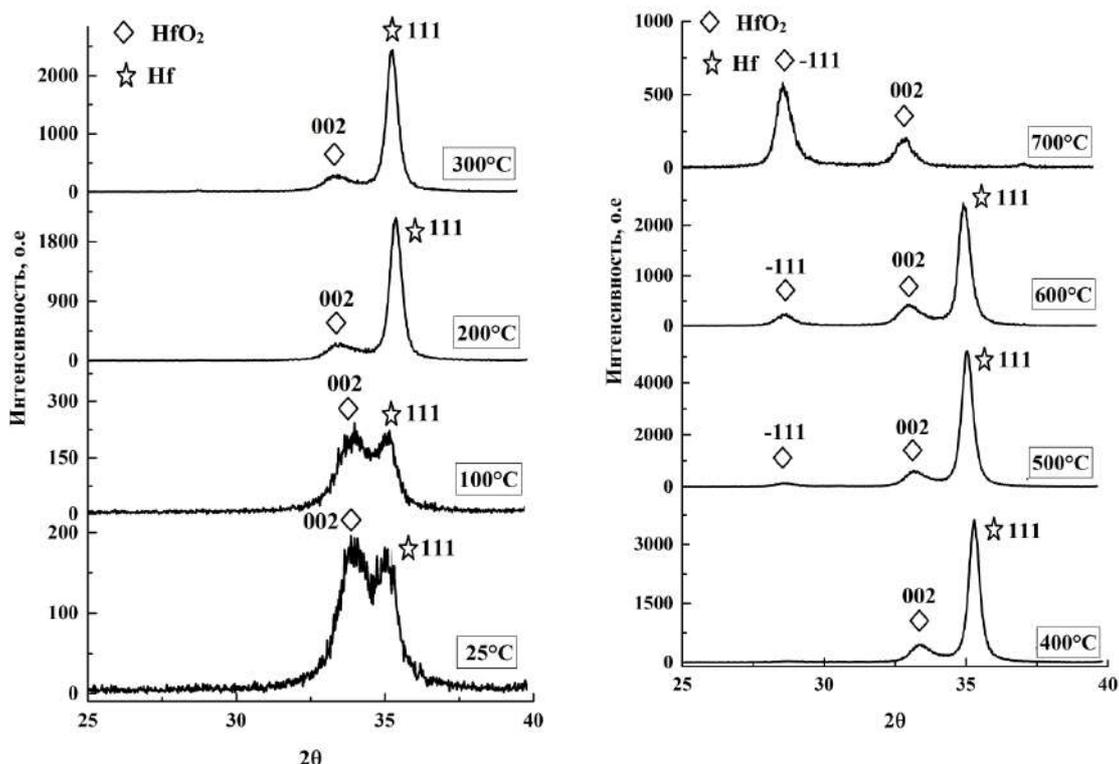


Рис. 1. Изменения кристаллической структуры магнетронных нанопленок Hf при соответствующих температурах отжига

Были проведены оценки размеров области когерентности  $L$  с учетом ширины главной линии для гафния (111) на ее полувысоте –  $\beta$ , а также  $\lambda = 0.154$  нм и типового коэффициентам 0.9 на основании уравнения Дебая-Шерера:  $L = 0.9\lambda/(\beta\cos\theta)$ . Расчетные значения  $L$  для нанопленок из Hf представлены в таблице 1. При 700 °C в качестве основной линии взята характерная для HfO<sub>2</sub> плоскость ( $\bar{1}11$ ).

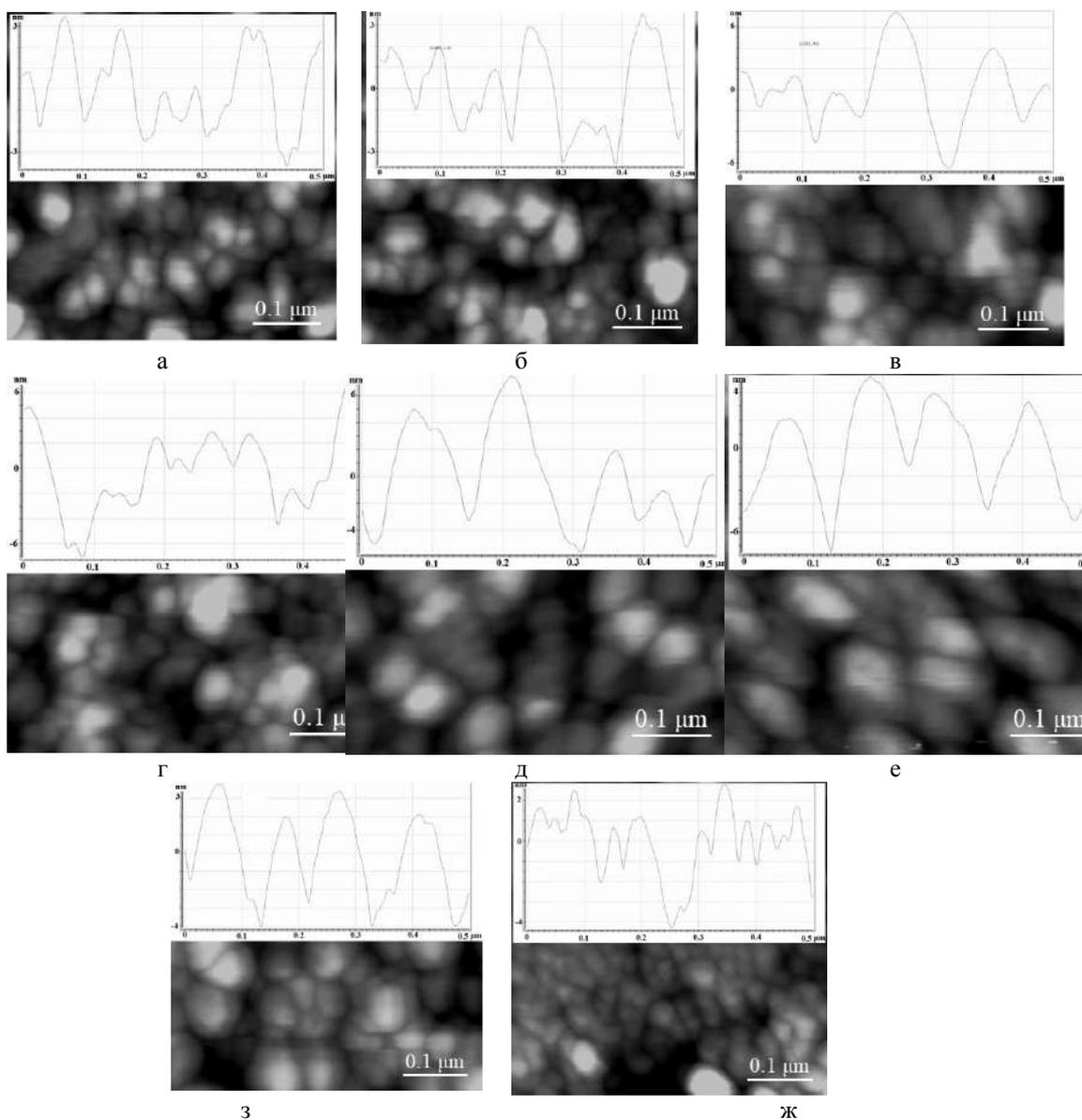
Таблица 1

Размеры областей когерентности и размеры частиц в магнетронных нанопленках Hf и HfO<sub>2</sub> без и после отжига

Значения	Изменения температуры, °C							
	25	100	200	300	400	500	600	700 ( $\bar{1}11$ )
$L$ , нм	10	11	17	17	16	15	15	11
$D$ , нм	6	6	12	12	10	10	7	6

Качественно AFM изображения нанопленок (рис. 2) обладают высокой сплошностью, не имеют трещин, что делает их пригодными для применения в оптоэлектронике. Проведенные оценки  $L$  подтверждаются измерениями шероховатости ( $R_a$ ) по профилям в каждой нанопленке (рис. 2), полученным с помощью с атомарным разрешением, согласно которым для гафниевой поверхности величина  $R_a$  составляет также порядка 10 нм. В то же время при отжиге с температурой 700 °C, когда поверхность нанопленки уже полностью окислена и представлена только диоксидом гафния, шероховатость характеризуется несколькими размерами. При этом минимальный ее размер оказывается сопоставимым с  $L$  для HfO<sub>2</sub>. Однако наряду с ним за счет самоорганизации из первичных наночастиц с размерами порядка 6 нм формируются еще два размера за счет агрегирования до 50 нм и

агломерирования – до 500 нм на этой же основе. При температурах отжига не выше 100 °С и в исходном состоянии нанопленки были сформированы из металлических наночастиц гафния с размеры около 6 нм. Начиная с 200 °С и до 500 °С нанопленки представлены наночастицами с размерами до 12 нм, которые начиная с 600 °С уменьшались вплоть до первичного размера наночастиц.



**Рис. 2.** Атомно-силовые изображения поверхности магнетронной нанопленки Hf и HfO<sub>2</sub>:  
а – в исходном состоянии и после отжига;  
б – 100, в – 200, г – 300, д – 400, е – 500, з – 600, ж – 700°С

Для характеристики нанопленок воспользуемся принятыми параметрами: распределениями поверхностной симметрии и эксцессов. Чтобы лучше понять пик статистического распределения, были изучены два параметра, такие как асимметрия тонких пленок. Асимметрия и эксцесс относятся к третьему и четвертому моментам функции распределения шероховатостей, и оба параметра являются безразмерными величинами.

Значение поверхностной асимметрии –  $S$  и эксцесса –  $K$  определяются соотношениями [12]:

$$S = \frac{1}{NR_q^3} \sum_{j=1}^N Z_j^3, \quad (1)$$

$$K = \frac{1}{NR_q^4} \sum_{j=1}^N Z_j^4, \quad (2)$$

где  $Z_j$  – распределение по высоте,  $N$  – количество наблюдаемых изменений по высоте, а  $R_q$  –среднеквадратичная шероховатость. Измеренные по рис. 2 значения  $S$  и  $K$  приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения эксцесса и асимметрии в исходном состоянии и отожженных нанопленок Hf

Значения	Изменения температуры, °C							
	25	100	200	300	400	500	600	700
Асимметрии, $S$	0.02	0.03	-0.05	-0.13	-0.09	0.26	-0.21	0.06
Эксцесса, $K$	3.41	3.33	3.13	3.88	3.35	5.49	3.26	3.39

Локальные максимумы на профилограммах укладываются в гауссово распределение. Локальные максимумы и минимумы относительно средней линией (табл. 2) имеют явно выраженную отрицательная асимметрию. В то же время локальные максимумы оказываются значительно выше среднего по сравнению с гауссовой кривой. То есть, согласно [13], имеет место нулевая асимметрия  $S = 0$ . Сравнение с распределением Гаусса по поверхности имеются огромные локальные минимумы выше среднего, что определяет высокое значение эксцесса  $K = 3$ . Расчетные значения  $S$  и  $K$  приведены в таблице 2. Характерно, что отрицательные значения асимметрии соответствуют гладкой топологией поверхности, а их положительные значения – наличию неровной.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ananthakumar R., Karthikeyan K., Sang J. K. Novel synthesis of hafnium oxide nanoparticles by precipitation method and its characterization // *Materials Research Bulletin*. 2012. Vol 47. P. 2680-2684.
2. Khan S. B., Hui W., Ma L., Hou M., Zhang Z. HfO<sub>2</sub> nanorod array as high-performance and high-temperature antireflective coating // *Adv. Mater. Interfaces* 4. 2017. P. 1-9.
3. Iwai H., Ohmi S. / Silicon integrated circuit technology from past to future // *Microelectron. Reliab.* 2002. Vol. 42. P. 465-491.
4. Wong H., Gritsenko V. Defects in silicon oxynitride gate dielectric films // *Microelectron. Reliab.* 2002. Vol. 42. P. 597-605.
5. Vargas M., Murphy N. R., Ramana C. V. Structure and optical properties of nanocrystalline hafnium oxide thin films // *Opt. Mater.* 37. 2014. Vol. 37. P. 621-628.
6. Rudenja S., Minko A., Buchanan D.A. Low-temperature deposition of stoichiometric HfO<sub>2</sub> on silicon: analysis and quantification of the HfO<sub>2</sub>/Si interface from electrical and XPS measurements. *Appl. Surf. Sci.* 2010. Vol. 257. P. 17-21.
7. Marti'nez F. L., Toledano M. L., Gandi'J. J., Ca'ra'be J., Bohne W., Ro'hrich J, Strub E., Ma'rti'l I. Optical properties and structure of HfO<sub>2</sub> thin films grown by high pressure reactive sputtering // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007. Vol. 40. P. 5256-5265.
8. Khairnar A.G., Mahajan A.M. Effect of post-deposition annealing temperature on RF-Sputtered HfO<sub>2</sub> thin film for advanced CMOS technology. // *Solid State Sci.* 2012. Vol. 15. P. 24-28.
9. Кузьменко А. П., Тант Син Вин, Мьо Мин Тан, Нау Динг Магнетронные одно- и многослойные нанопленки из Nb, С и Si // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия техника и технологии.* 2019. Т. 9. Вып. 4. С.20-52.
10. Процессы деградации при нагревании на воздухе в магнетронных нанопленках Ni и Cr / А. П. Кузьменко, А. Е Кузько, Нау Динг, Мьо Мин Тан, Р. Т. Кануков // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия техника и технологии.* 2016. Т. 2. Вып. 19. С. 153-165.

11. Sadaf B. K., Zhengjun Z., Shern L. L. Annealing influence on optical performance of HfO<sub>2</sub> thin films // Journal of Alloys and Compounds. 2020. Vol. 816. P. 1-11.
12. Joy K., Maneeshya L. V., Thomas J. K., Thomas P. V. Effect of sol concentration on the structural, morphological, optical and photoluminescence properties of zirconia thin films // Thin Solid Films 520. 2012. P. 2683-2688.

УДК 539

## КОРРЕЛЯЦИЯ МОРФОЛОГИИ И МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕНТ ТИПА ФАЙНМЕТ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА

**А. М. Фролов, Г. С. Крайнова, А. В. Ансович, В. В. Ткачев, Н. В. Ильин,  
С. В. Должиков, В. С. Плотников**

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток  
e-mail: [froloff5@yandex.ru](mailto:froloff5@yandex.ru)

*В работе исследуются сплавы типа файнмет различного состава, полученные быстрой закалкой из жидкого состояния (метод спиннингования). Анализ спектральных характеристик электронно-микроскопических изображений с привлечением формализма линеаризованной дивергенции Кульбака позволил определить степень схождения / различия морфологической структуры поверхностей раздела спиннингованных лент Fe-(Cu, Nb)-(Si, B). Показано влияние технологии спиннингования на степень корреляции спектральных характеристик свободной и контактной поверхностей сплавов и их магнитные характеристики в зависимости от состава. Сформулированы условия получения быстрозакаленных сплавов с заданными служебными свойствами (низкой коэрцитивной силой, развитой морфологией).*

Ленты, полученные быстрой закалкой из расплава (методом спиннингования) типа файнмет (finemet), как магнитомягкие материалы, достаточно давно применяются в электронном приборостроении. Влияние концентрации ниобия (Nb), меди (Cu) и металлоидов (Si, B) на характеристики лент этого типа широко обсуждаются в литературе [1]: исследуется воздействие на коэрцитивную силу, размер зерна при отжиге и другие параметры сплавов. Но все исследования в данной области не касаются технологии процесса спиннингования лент. В частности, не рассматривается влияние концентрации химических элементов в сплаве на изменение морфологии поверхностей раздела свежеприготовленных лент.

Цель данной работы – провести оценку степени схождения / различия морфологии поверхностей раздела быстро закаленных сплавов на основе железа в зависимости от состава и корреляции с магнитными свойствами.

В работе исследуются ленты типа файнмет (ленты состава Fe-(Cu, Nb)-(Si, B)), где параметром выступают концентрации химических элементов, входящих в сплав. Исследуются три серии быстро закаленных лент. Первая серия представлена образцами с различной концентрацией ниобия (Nb, ат.%) при фиксированном содержании железа, меди и металлоидов; вторая - включает сплавы с различной концентрацией меди (Cu, ат.%); третья – сформирована быстро закаленными сплавами в зависимости от суммарной концентрации металлоидов (( Si+B ), ат.%). Разбиение по сериям с указанием элементного состава и толщины лент приведены в табл. 1. Ширина всех образцов была одинаковой и составляла 10 мм. Технологические условия получения оставались идентичными для

лент каждой серии. В качестве структурно-чувствительной характеристики образцов в таблице приведена коэрцитивная сила  $H_c$ .

Анализ морфологии производился на основе электронно-микроскопических изображений лент данных образцов, полученных на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss Cross Beam 1540XB. Как известно, ленты, полученные методом спиннингования расплава, обладают двумя поверхностями раздела: контактной к вращающемуся барабану и свободной от его влияния. Морфологии этих поверхностей существенно отличаются. Отследить изменение статистик микрорельефа возможно, опираясь на спектральные характеристики электронно-микроскопических изображений. Данная процедура подробно описана в [2] и состоит в следующем: получение электронно-микроскопических изображений микрорельефа; расчет спектральных характеристик от изображений в виде интегральных частотных характеристик; построение мер Лебега  $\rightarrow$  определение меры сходства (различия) с использованием линеаризованной дивергенции Кульбака ( $LivI$ ).

Выбранная для анализа интегральная функция меры Лебега  $LivI$  может быть представлена в виде вектора в пространстве, на котором определяется расстояние – близость / сходство распределений. В нашем случае представленная методика позволяет корректно описать и сравнить микрорельеф свободной (СП) и контактной (КП) поверхностей спиннингованных лент. Результаты расчета взаимной L-дивергенции для всех серий образцов представлены на рис. 1.

Для первой серии образцов, рис. 1а, видно, что зависимость взаимной дивергенции  $LivI$  для образца 2 ( $Nb = 3$  ат.%) имеет явно выраженный максимум – статистики микрорельефа обеих поверхностей максимально удалены, то есть наблюдается максимальное отличие микрорельефа контактной и свободной поверхностей [3]. Таким образом, увеличение концентрации ниобия неоднозначно влияет на различие микрорельефа поверхностей раздела. Результат рис. 1б (вторая серия образцов) выявляет «оптимальность» образца 3 ( $Cu = 1$  ат.%). Изменение в концентрации меди, как и ниобия, влияет на морфологию поверхностей и их взаимное отличие не прямолинейно, а имеет хорошо выраженный максимум (табл.).

Разбиение по сериям и характеристики лент Fe-(Cu, Nb)-(Si, B)

№ пп	Образец	Толщина, мм	$H_c$ , Э
Первая серия			
1	$Fe_{77}Cu_1Si_{16}B_6$	$0,021 \pm 0,002$	1,2
2	$Fe_{74}Cu_1Nb_3Si_{16}B_6$	$0,028 \pm 0,002$	0,25
3	$Fe_{71,5}Cu_1Nb_5Si_{16,5}B_6$	$0,027 \pm 0,001$	0,34
Вторая серия			
1	$Fe_{74,3}Cu_{0,2}Nb_3Si_{16,5}B_6$	$0,025 \pm 0,001$	0,3
2	$FeCu_{0,5}Nb_3Si_{8,5}B_{10,5}$	$0,027 \pm 0,001$	0,32
3	$Fe_{74}Cu_1Nb_3Si_{16}B_6$	$0,028 \pm 0,002$	0,25
4	$Fe_{73}Cu_{1,5}Nb_3Si_{16,5}B_6$	$0,019 \pm 0,001$	0,35
Третья серия			
1	$Fe_{70}Cu_1Nb_3Si_{13}B_{13}$	$0,020 \pm 0,002$	0,17
2	$Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$	$0,022 \pm 0,004$	0,20
3	$Fe_{75}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_{7,5}$	$0,029 \pm 0,001$	0,23
4	$Fe_{77}Cu_1Nb_3Si_{13}B_6$	$0,023 \pm 0,002$	0,33
5	$Fe_{77}Cu_1Nb_3Si_{14}B_5$	$0,022 \pm 0,001$	0,98

Оптимальным с точки зрения магнитных свойств, получаемых в процессе дальнейшей термообработки, является быстро закаленный сплав  $Fe_{74}Cu_1Nb_3Si_{16}B_6$  [1], который в исходном состоянии демонстрирует максимальное различие статистик микрорельефов КП и СП. При этом технология спиннингования синхронно воздействует на структуру обеих поверхностей раздела сплава  $Fe_{77}Cu_1Si_{16}B_6$  и оказывает значительное влияние на его морфологию. Причем это характерно как для образцов из первой серии (изменение Nb), так и образцов из второй серии (изменение Cu).

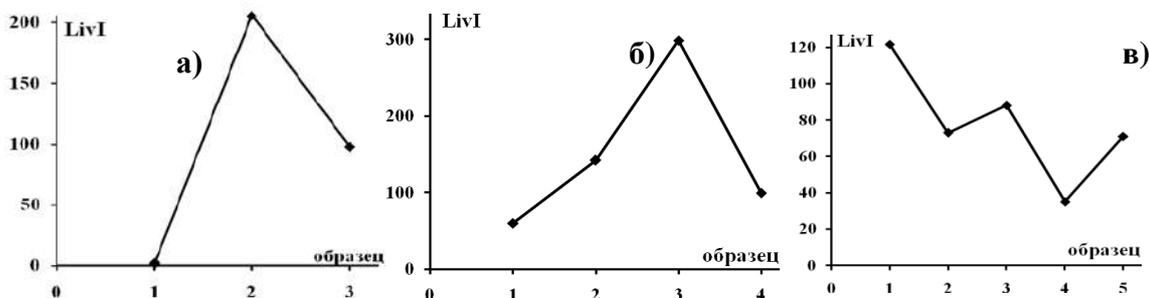


Рис. 1. Взаимная L-дивергенция: а) образцы первой серии; б) образцы второй серии; в) образцы третьей серии

Рассмотрим результаты сравнения статистик микрорельефа СП и КП спиннингованных лент для третьей серии образцов (изменение  $(Si + B)$ , ат.%), рис.1в. Максимальное отличие в микрорельефе контактной и свободной поверхностей наблюдается для образца 1, рис.1в. Уменьшение суммарного содержания  $(Si+B)$ , образец 2, сопровождается увеличением корреляции морфологии поверхностей раздела. Для образцов 3, 4 и 5 LivI демонстрирует немонотонный характер, рис.1в. Сплав  $Fe_{75}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_{7,5}$  (образец 3, третья серия), отличается по толщине от всех других, Таблица 1, хоть и получен при таких же технологических условиях. Поэтому локальный максимум LivI на рис. 1в требует отдельного исследования и проверки. Тем не менее, минимум для образца 4,  $Fe_{77}Cu_1Nb_3Si_{13}B_6$ , сохраняется. Следовательно, монотонности во влиянии суммарной концентрации металлоида на статистику микрорельефа не наблюдается и в этом случае [4].

Интересно сравнить образцы 4 ( $Fe_{77}Cu_1Nb_3Si_{13}B_6$ ) и 5 ( $Fe_{77}Cu_1Nb_3Si_{14}B_5$ ), где суммарная концентрация металлоидов  $(Si + B)$  одинакова (19 ат.%), но значение LivI для них существенно отличается. Это может быть связано с тем, что значительно меняется соотношение концентраций кремния и бора ( $Si$  ат.% /  $B$  ат.%): от 2,2 для образца 4 до 2,8 для образца 5. Из литературы [1] следует, что при низком соотношении  $Si$  ат.% /  $B$  ат.%, то есть в нанокристаллических сплавах с повышенным содержанием бора, кристаллизация в условиях отжига протекает более вяло, меньше образуется кристаллической фазы, меньше и величина образующихся зерен. По-видимому, соотношение кремния к бору влияет не только на физические свойства сплавов типа фанмет [1, 5], но и на статистику поверхностей раздела в процессе спиннингования.

Обобщим результаты рис.1а,б,в. Также необходимо отметить, что образец 2 первой серии (разное содержание Nb в сплавах) и образец 3 второй серии (разная концентрация Cu) один и тот же ( $Fe_{74}Cu_1Nb_3Si_{16}B_6$ ), но значения LivI для него разные. Это обусловлено несколько отличным увеличением исходных изображений, которое бралось одинаковым лишь в пределах каждой серии. Для обобщения результатов на качественном уровне данный факт можно считать несущественным. Поэтому объединенное представление об изменении отличий микрорельефов СП и КП лент типа фанмет в зависимости от элементного состава можно представить в виде схемы на рис. 2.

На рис. 1 наблюдается явный максимум по LivI в исследуемом диапазоне изменения концентраций элементов. Если концентрации Cu и Nb отложены по осям, то содержание металлоидов (Si+B) будет определять высоту экстремума. На рис. 2 – это семейство поверхностей с вершинами А, Б, В. Положение максимума поверхности не определяется даже на уровне «выше–ниже», так как зависит не только от суммарной концентрации металлоида, но и от отношения Si/B.

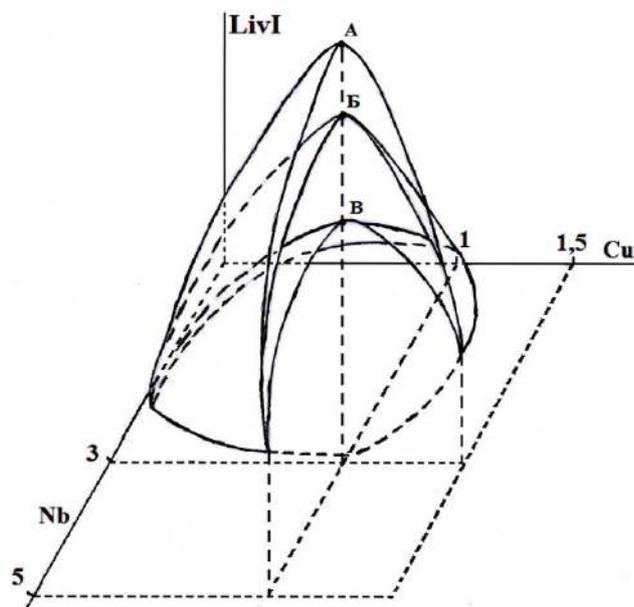


Рис. 2. Изменение LivI в зависимости от концентрации элементов в сплаве

Если рассматривать исследуемые сплавы как низкокоэрцитивные, магнитомягкие материалы, то, согласно приведенным данным (табл.1) наименьшее значение  $H_c$  наблюдается при максимальном отличии микрорельефов СП и КП. Таким образом, для получения низкокоэрцитивных сплавов, на рис.2 нужно попасть в область близкую к вершине поверхности (Cu = 1 ат.%, Nb = 3 ат.%) и добиваться увеличения высоты максимума (и, следовательно,  $\min H_c$ ), варьируя как суммарное содержание металлоидов (Si + B), так и отношение Si / B. Если же  $H_c$  не является определяющим параметром, а важнее морфохарактеристики, как в некоторых экранирующих материалах, то можно выбирать соответствующие составы, перемещаясь по поверхности на рис.2.

Таким образом, в результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1) обнаружена противоположность спектральных характеристик поверхностей быстрокаленных сплавов, содержащих 1 ат.% Cu и 3 ат.% Nb, а также максимальное количество металлоидов (Si + B), 26 ат.%;

2) уменьшение (1 ат.%) / увеличение (5 ат.%) содержания Nb, а также допустимое изменение концентрации Cu в сплавах приводит к синхронному воздействию технологии спиннингования на спектральные характеристики морфоструктуры поверхностей раздела;

3) показано: низкокоэрцитивные, магнитомягкие материалы, полученные методом спиннингования, характеризуются максимальным различием микрорельефов контактной к барабану-холодильнику и свободной от его влияния поверхностей;

4) на основе дивергентной оценки статистик микрорельефа предложена модель спиннингования, позволяющая прогнозировать служебные характеристики (магнитные, морфоструктуру) быстрокаленных сплавов в зависимости от содержания модификаторов (Cu, Nb) и металлоидов (Si+B).

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №0657-2020-0005.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кекало И. Б. Нанокристаллические магнитомягкие материалы. М.: МИСиС. 2000. 227 с.
2. Фролов А. М., Крайнова Г. С., Должиков С. В. Анизотропия структурных неоднородностей быстрозакаленных сплавов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. М., 2018. № 4. С. 84-90.
3. Фролов А. М., Ансович А. В., Крайнова Г. С., Ткачев В. В., Должиков С. В. Морфология поверхностей спиннингованных лент Fe-Si-B(Cu,Nb) с разным содержанием ниобия // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. М., 2018. Т. 18. № 1. С. 183-186.
4. Frolov A. M., Ansovich A. V., Tkachev V. V., Kraynova G. S., Dolzhikov S. V. Surface Morphology of Spinning Tapes Fe- (Cu, Nb) - (Si, B) with Different Content of Metalloid // Key Engineering Materials. 2019. V.806. P.124-129.
5. Ильин Н. В., Ткачев В. В., Федорев А. Н., Цесарская А. К., Иванов В. А., Кучма А. С., Фролов А. М., Должиков С. В., Крайнова Г. С., Плотников В. С. Магнитные свойства аморфно-нанокристаллических сплавов на основе железа с различным содержанием ниобия в процессах структурной релаксации // Изв. РАН. / Сер. физ. 2018. Т.82. №7. С.112-115.

УДК 541

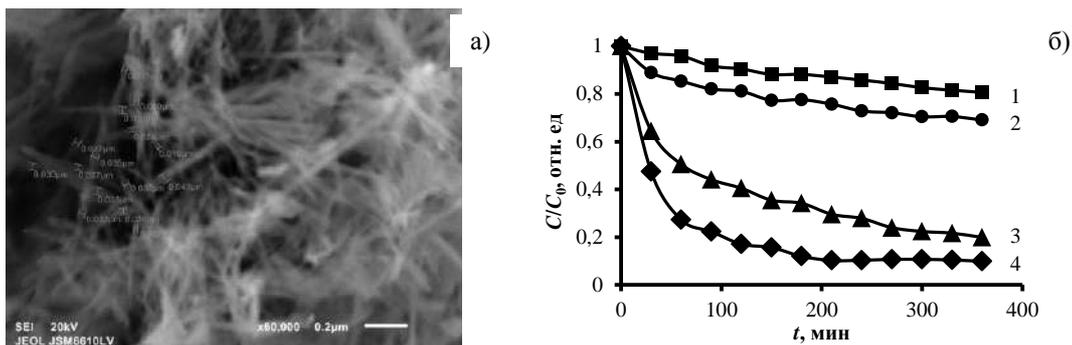
## ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОТРУБОК ОКСИДА МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

**Чжо Аунг Хеин, В. А. Мамонтов, М. А. Пугачевский**

Юго-Западный государственный университет, г. Курск  
e-mail: [kyawaunghein53@gmail.com](mailto:kyawaunghein53@gmail.com)

*В работе приведены исследования химических свойств трубчатых наноструктур CuO на примере изучения их фотокаталитической активности в реакции разложения органического красителя метиленового синего под действием ультрафиолетового света. Предложена методика проведения эксперимента и проанализированы полученные результаты.*

В настоящее время проявляется большой интерес исследователей к получению трубчатых наноструктур из оксидов переходных металлов, таких как CuO, NiO и др. [1]. Такие объекты характеризуются уникальными физико-химическими свойствами, в частности могут обладать отличительной фотокаталитической активностью [2]. В данной работе для получения одномерных структур CuO (II) использовали электрохимический метод синтеза оксидов меди на многостенных углеродных нанотрубках (МУНТ, MWCNT). Исследования показали, что в процессе электрохимического синтеза на поверхности функционализированных углеродных трубок осаждается неравномерный слой оксидной фазы, толщина которого может достигать 5÷10 нм (рис. 1,а). Синтезированные образцы подвергались термическому отжигу в высокотемпературной приставке-нагревателе рентгеновского дифрактометра при температуре 500 °С для CuO в течение 2 ч, 4 ч, 6 ч и 8 ч. Исследования показали, что термический отжиг приводит к полному сгоранию углеродных нанотрубок и формированию трубчатых структур из оксидов меди.



**Рис. 1.** СЭМ изображения трубчатых структур CuO/f-МУНТ (а) и кинетические кривые (б) зависимости степени разложения под УФ-облучением раствора красителя Meth Blue с фотокатализатором: (1) без катализатора; (2) эталонный нанопорошок CuO; (3) отожженные трубчатые наноструктуры CuO; (4) синтезированный нанокompозит CuO/f-МУНТ

В экспериментах по определению фотокаталитической активности трубчатых наноструктур CuO использовался водный раствор красителя метиленового синего марки ч.д.а. ТУ 6-09-29-76 с исходной концентрацией  $15 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ . Спектр оптического поглощения в диапазоне 500–700 нм исходного раствора красителя определяли с помощью оптического спектрофотометра СФ-2000. Раствор с фотокатализатором и без подвергался поэтапно ультрафиолетовому облучению с помощью ртутной лампы марки ДРЛ-250 с общим временем светового воздействия на этапах: 0,5, 1, 2, 3, 4, 5 и 6 часов. На каждом этапе определяли оптическую плотность раствора, и по калибровочным графикам оптическая плотность/концентрация метиленового синего на длине волны с максимумом поглощения определяли остаточную концентрацию красителя. Для сравнения результатов в эксперимент для исследований были включены образцы промышленных нанопорошков CuO (размер 30–50 нм, ХЧ, Jiangsu, China) в качестве эталона. Эксперименты по определению фотокаталитической активности проводили в соответствии с международным стандартом ISO 10678:2010.

Результаты исследований показали, что синтезированные нанокompозиты CuO/f-МУНТ, а также отожженные трубчатые наноструктуры CuO обладают хорошими фотокаталитическими свойствами. На рис. 1,б представлены кинетические кривые зависимости степени разложения под УФ-облучением раствора красителя Meth Blue с фотокатализатором: (1) без катализатора; (2) эталонный промышленный нанопорошок CuO; (3) отожженные трубчатые наноструктуры CuO; (4) синтезированный нанокompозит CuO/f-МУНТ. Из рисунка видно, что фотокаталитическая активность синтезированных нанокompозитов CuO/f-МУНТ выше эталонного промышленного нанопорошка CuO, при этом наилучшие каталитические свойства наблюдаются у нанокompозитов CuO/f-МУНТ не подвергнутых термической обработки. После отжига в печи каталитическая активность трубчатых наноструктур CuO снижается. Дegrадация красителя метиленового синего под действием УФ света в отсутствие фотокатализатора происходит незначительно (кривая 1).

Полученные результаты были объяснены следующим образом: Как известно, фотокаталитическая активность вещества определяется его способностью генерировать электрон-дырочные пары, достигающих без рекомбинации поверхности катализатора. В этом случае, локализуясь в поверхностных слоях, носители заряда могут образовывать цепь окислительно-восстановительных реакций, с формированием активных радикалов из молекул воды и растворенного кислорода [3]. Так, например, электрон может участвовать в восстановительной реакции молекул  $\text{O}_2$ , адсорбированных на поверхности:  $\text{O}_2 + e^- \rightarrow \text{O}_2^-$ , а положительный дырочный заряд в окислительной реакции на локализованных гидроксильных группах:  $\text{OH} + h^+ \rightarrow \text{OH}^+$ . Число электрон-дырочных пар, выходящих на поверх-

ность фотокатализатора, в свою очередь определяется двумя конкурирующими процессами: генерацией пар носителей заряда и их одновременной рекомбинацией. Генерация носителей заряда зависит от числа поглощенных оптических фотонов, то есть будет определяться как спектром внешнего источника излучения, так и спектром поглощения вещества. То есть, при неизменном спектре облучателя, уменьшение ширины запрещенной зоны за счет батохромного сдвига края оптического поглощения приведет к росту вероятности генерации электрон-дырочных пар.

Вероятность процесса рекомбинации носителей заряда, в свою очередь зависит, как от ширины запрещенной зоны, так и от числа зарядовых ловушек в веществе, увеличивающих время жизни носителей заряда. Так, с увеличением ширины запрещенной зоны и ростом зарядовых ловушек, число которых напрямую связано с дефектами структуры вещества, вероятность рекомбинации электрон-дырочных пар уменьшается.

Согласно данным оптической спектроскопии в нанокompозитах CuO/f-МУНТ наблюдается области оптического поглощения: на 1.55-1.65 эВ – связанные, по всей видимости, с углеродной фазой и дефектами оксидной структуры, и 1,6 эВ (4.0 эВ) – край оптического поглощения оксидов CuO.

То есть, процесс генерации электрон-дырочных пар в нанокompозитах CuO/f-МУНТ за счет присутствия УНТ может протекать более эффективно, чем в трубчатых наноструктурах CuO.

С другой стороны интерфейс двух фаз CuO-f-МУНТ всегда порождает большое число структурных дефектов, формирующих зарядовые ловушки, что увеличивает продолжительность жизни генерированных носителей зарядов. Эти факторы могут обуславливать высокую фотокаталитическую активность нанокompозитов CuO/f-МУНТ. Термический отжиг в печи приводит к сгоранию УНТ, и увеличению толщины образуемых трубчатых структур CuO, что приводит к снижению их удельной поверхности.

Также в процессе отжига увеличивается происходит сдвиг оптического края поглощения и снижение ширины запрещенной зоны до 1.65 эВ.

Кроме того, за счет увеличения кристалличности оксидных фаз снижается число структурных дефектов и локализованных на них зарядовых ловушек.

Данные факторы могут приводить к снижению фотокаталитической активности трубчатых наноструктур CuO, по сравнению с активностью нанокompозитов CuO/f-МУНТ.

Наконец, согласно экспериментальным данным, фотокаталитическая активность полученных трубчатых наноструктур CuO остается выше, использованных для сравнения эталонных промышленных нанопорошков, что свидетельствует о высокой эффективности синтезированных наноструктур CuO, как фотокатализаторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Paul D. Synthesis Characterization and a comparative antibacterial study of CuO, NiO and CuO-NiO mixed metal oxide / D. Paul, S. Neogi // *Materials Research Express* . 2019. Vol. 6, №. 5. P. 055004-1 – 055004-16.
2. Scuderi V. et al. Photocatalytic activity of CuO and Cu<sub>2</sub>O nanowires // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2016. Т. 42. С. 89-93.
3. Пугачевский М. А. Фотокаталитические свойства наночастиц диоксида титана, полученных методом лазерной абляции // *Российские нанотехнологии*. М.: «Парк-Медиа». 2013. Т.8. № 7-8. С. 18-21.

## ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

**В. Ю. Юрина, В. В. Нецименко**

Амурский государственный университет, г. Благовещенск  
e-mail: [viktoriay-09@mail.ru](mailto:viktoriay-09@mail.ru)

*В работе приведены анализ спектров диффузного отражения полых сфер и микрочастиц диоксида кремния, а также покрытий на их основе в области от 200 до 2500 нм. Установлено, что отражательная способность покрытий на основе полых микросфер диоксида кремния выше по сравнению с покрытиями на основе микрочастиц.*

В качестве связующего соединения в терморегулирующих покрытиях класса «солнечный отражатель» космических аппаратов применяют кремнийорганический лак КО-921. Интерес представляет исследование отражательной способности покрытий на основе полых частиц диоксида кремния и сравнение полученных результатов с результатами для покрытий на основе микрочастиц.

Объектом исследования служили микропорошок  $\text{SiO}_2$  высокой частоты 99,99 %, кремнийорганический лак купленные в компании Aladdin Chemistry и синтезированные полые микросферы  $\text{SiO}_2$ . Средний размер микрочастиц диоксида кремния составил 3000-10000 нм, с удельной поверхностью  $7,3 \pm 1,8 \text{ м}^2/\text{г}$ . Полые микросферы со средним размером 1000-3000 нм с удельной поверхностью  $36,3 \pm 5,9 \text{ м}^2/\text{г}$ , были получены шаблонным методом. В качестве шаблона использовали полистирольный шарики (ПС) [1]. Для получения полых частиц диоксида кремния готовили раствор с добавлением ПС, этанола, дистиллированной воды, раствора аммиака и тетраэксисилана (TEOS) в соотношении к объему 5:40:10:5:1. Далее полученный раствор трижды промывали этанолом и водой и центрифугировали при 3000 об/мин. На последнем этапе раствор высушивали и подвергали термообработке при температурах 200, 300 и 500 °С.

Покрытия были приготовлены смешиванием порошка-пигмента с кремнийорганическим лаком в пропорции 50 % на 50 % по объему, которые наносились на алюминиевые подложки АМГ-6 и высушивали при комнатной температуре на воздухе. Толщина слоя покрытий составила примерно 200-250 мкм и измерялась толщиномером лакокрасочных покрытий Nicetu CM8801FN, Etari ET-15. Спектры диффузного отражения ( $\rho_\lambda$ ) регистрировались в области от 200 до 2500 нм спектрофотометром Perkin Elmer Lambda 950, диаметр интегрирующей сферой 150 мм, шаг 5 нм/с. Значение интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения ( $a_s$ ) рассчитывается в соответствии со стандартами ASTM (E490-00a и E903-96) [2,3]. Поскольку исследуемые порошки являются непрозрачными материалами, то  $a_s$  рассчитывается по уравнению 1:

$$a_s = 1 - \rho_s = 1 - \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_\lambda S_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda d\lambda}, \quad (1)$$

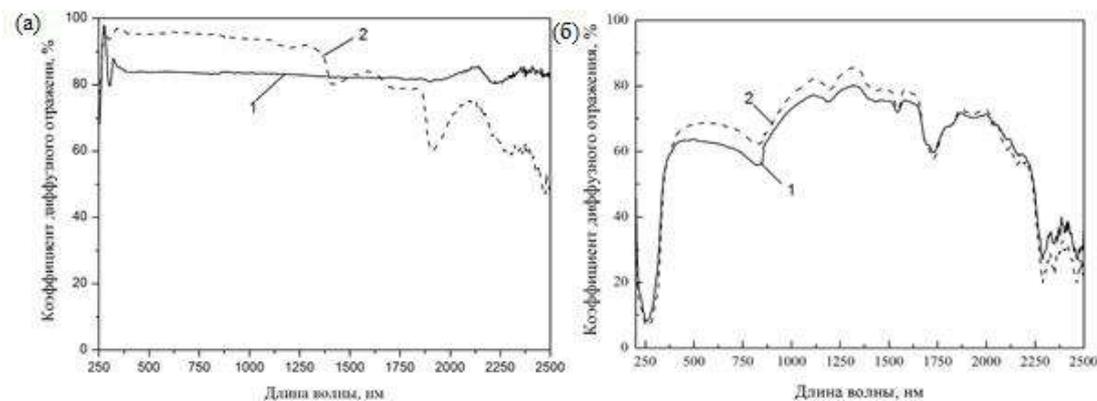
где  $\rho_\lambda$  – спектральная отражательная способность;

$S_\lambda$  – спектр солнечного излучения.

В спектрах диффузного отражения микрочастиц и полых микросфер  $\text{SiO}_2$  (рис.,а) в области до 500 нм регистрируется «провал» – уменьшение коэффициента отражения до 80 % для микрочастиц. Это может быть обусловлено поглощением  $E'_\gamma$  – центра или дефектами на немостиковых атомах кислорода ( $\equiv\text{Si}-\text{O}\cdot$ ) В области до 1300 нм коэффициент

отражения для микросфер выше по сравнению с микрочастицами приблизительно на 15 %. В области свыше 1300 нм коэффициент отражения для полых микросфер постепенно убывает и в ближней ИК-области спектра составляет 45 %. Для микро частиц он во всем интервале равен 80-83 %. В данной области спектра также регистрируются полосы поглощения, характерные для хемосорбированных газов на поверхности частиц (CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> и OH-групп)

Из спектров диффузного отражения покрытий на основе микрочастиц и микросфер видно (рис.,б), что наименьший коэффициент отражения в видимой области спектра обладают покрытия на основе микрочастиц, меньше на 5-10 % по сравнению с покрытиями на основе полых микросфер. В спектрах покрытий наблюдается множество пиков поглощения, как в ближней УФ- и видимой областях, так и в ближней ИК-области спектра. Изменения в ближней УФ-области спектра обусловлено оптическими свойствами порошка-пигмента (поглощением E'<sub>s</sub>, E'<sub>γ</sub>-центра, дефектами на нестиковых атомах кислорода), в ближней ИК-области обусловлено особенностями связующего (поглощением различных обертонов C–H молекул CH<sub>2</sub> и CH<sub>3</sub>, а также O–H групп в полидиметилсилоксане – основным составляющим кремнийорганического лака).



Спектры диффузного отражения микрочастиц (1) и микросфер (2) SiO<sub>2</sub> (а); покрытий на основе микрочастиц (1) и микросфер (2) SiO<sub>2</sub> (б)

Расчет интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения показал, что микрочастицы SiO<sub>2</sub> имеют значение  $\alpha_s$  равное 0,164. Для полых микросфер SiO<sub>2</sub> значение  $\alpha_s$  составляет 0,077, что ниже на 53 % по сравнению с микрочастицами. Покрытия на основе полых микросфер имеют значение  $\alpha_s$  равное 0,320, значение для покрытий на основе микрочастиц выше 11 %. Из полученных данных, можно говорить о высокой отражательной способности полых микросфер и покрытий на их основе по сравнению с микрочастицей SiO<sub>2</sub>. Таким образом, установлено, что отражательная способность покрытий на основе полых микросфер SiO<sub>2</sub> выше, чем у покрытий на основе микрочастиц. Этот связано с релаксационными дефектами на большой удельной поверхности полых частиц.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Iurina V. Yu., Neshchimenko V.V., Li Chundong. Optical Properties and Radiation Stability of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Microparticles, Nanoparticles and Microspheres // Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques. March 2020. 14 (2). P. 253-259.
2. ASTM E490 - 00a Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables, 2005.
3. ASTM E903 – 96 Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. 2005.

## Секция «Физическое материаловедение»

УДК 535.016 + 535.21.12

### СВЯЗЬ СПЕКТРОВ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ИК-СПЕКТРОСКОПИИ ОБРАЗЦОВ МЕЗОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ХРАНЕНИИ: ЭФФЕКТ ПОГРУЖЕНИЯ В РАСТВОРЫ LiBr И Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>

Н. Г. Галкин<sup>1</sup>, Д. Т. Ян<sup>2</sup>, К. Н. Галкин<sup>1</sup>, С. В. Чусовитина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

<sup>2</sup>Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск  
e-mail: [dmitry\\_yan@mail.ru](mailto:dmitry_yan@mail.ru)

*Представлены результаты исследования структуры поверхностных связей мезопористого кремния, обработанного в сухом азоте, при хранении в течение 200 суток в атмосферных условиях при комнатной температуре. Установлено, что рост интенсивности фотолюминесценции мезопористого кремния сопровождается замещением связей кремний-водород на связи O<sub>3</sub>-SiH и Si-OH. Процесс замещения связей стабилизируется после 135 дней хранения, а заканчивается к 200 дням хранения. Показано, что в мезопористом кремнии отсутствует заметный «голубой» сдвиг пика ФЛ за счет эффекта квантово-размерного ограничения. Предложен основной механизм фотолюминесценции в мезопористом кремнии при длительном хранении, состоящий в излучательной рекомбинации в формируемом оксиде кремния с кислородными дефектами и снижении плотности безызлучательных состояний за счет формирования связей O<sub>3</sub>-SiH и Si-OH.*

*В работе исследовано влияние длительности хранения слоев мезопористого кремния, обработанных погружением с различной длительностью в водные растворы LiBr и Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> без дополнительного отжига, на интенсивность ФЛ и структуру поверхностных связей ПК. Установлено, что роль погружения заключается в формировании пассивного металлического диффузионного барьера, с увеличением толщины которого интенсивность ФЛ уменьшается.*

Пористый кремний (ПК) продолжает привлекать внимание исследователей в последние годы [1,2], вместе с тем следует отметить, что направленность работ сменилась. Проблема электролюминесценции в диодах на основе ПК привлекает крайне малое внимание [3], поскольку не удалось до сих пор решить проблему малого сопротивления и устойчивости контактов к ПК. В настоящее время исследования сосредоточены на возможности использования ПК в качестве антиотражающего покрытия для солнечных батарей [4].

Второй проблемой является изменение свойств ПК при длительном хранении в атмосферных условиях за счет окисления, что влияет на устойчивость будущих сенсорных устройств. Одной из возможностей консервации слоев ПК является их обработка в растворах солей, например бромида лития (LiBr) и нитрата железа (III) (Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>) [5,6].

Исследования показали, что для мезопористого кремния (мезо-ПК), в отличие от нанопористого кремния [7], со временем хранения происходит увеличение интенсивности фотолюминесценции (ФЛ), однако, влияние воздействия погружения мезо-ПК в растворы LiBr и Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> на интенсивность его ФЛ не было исследовано.

В данной работе исследовано влияние длительности хранения слоев мезо-ПК (200 дней), обработанных погружением с различной длительностью (5, 10 и 20 минут) в водные растворы LiBr и Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> с установленной ранее оптимальной концентрацией [6] и образцов сравнения, на интенсивность ФЛ и изменения в интенсивности поглощения поверхностных соединений ПК в ИК-спектра.

Выбор реагентов LiBr и Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> для взаимодействия с пористым кремнием был обусловлен их высокой химической активностью и низкой себестоимостью: сочетание этих качеств определяет их возможное применение в создании приборных структур.

Объектами исследования являлись слои мезо-ПК, обработанные погружением с различной продолжительностью (5, 10 и 20 минут) в водные растворы LiBr и Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> с предварительно установленной оптимальной концентрацией [8] и эталонные образцы мезо-ПК без погружения в растворы.

Образцы мезо-ПК получали при следующих режимах: плотность тока 10 мА/см<sup>2</sup> и длительность 5 минут в растворе HF:C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH = 2:1. Это обеспечивало формирование слоя мезо-ПК с пористостью около 55% и толщиной 4 мкм [6]. Каждый образец после анодирования делился на 4 части, одна из которых была образцом сравнения, а три другие – рабочими образцами. После погружения в раствор LiBr рабочие образцы высушивались в потоке сухого азота при комнатной температуре. Оборудование и методики измерений ФЛ и ИК-спектров приведены в работе [6]. Регистрацию ФЛ и ИК-спектров проводили при T=20 °C в течение 200 дней. Промежутки между измерениями до 53 дней были небольшими: 2-7 дней, затем увеличились до 15-30 дней, так как изменения в спектрах демонстрировали тенденцию к насыщению.

Установлено, что в образце сравнения и образцах мезо-ПК, обработанных погружением на 5, 10 и 20 минут в водный раствор LiBr с концентрацией S/3 (S – предельная растворимость LiBr в воде при 20°C) наблюдался различный ход зависимости максимума интенсивности ФЛ от продолжительности хранения. Основное отличие обнаружено в период до 74 дней, что выражается в большей интенсивности ФЛ для образцов, обработанных в LiBr. После 120 дней хранения кривые для образца сравнения и образца с 5 минутным погружением в раствор LiBr совпадают и выходят на насыщение (рис. 1а).

В образцах мезо-ПК, обработанных погружением на 5, 10 и 20 минут в водный раствор Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> с концентрацией 0,5M наблюдалась однотипная зависимость максимума интенсивности ФЛ от времени хранения. После 150 дней хранения кривые ФЛ контрольного и рабочего образцов показали насыщение с различными значениями интенсивности. Максимальная интенсивность ФЛ была достигнута для образца ПК при 10-минутном погружении в раствор Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, а минимальная – для образца ПК после 5-минутного погружения (рис. 1б).

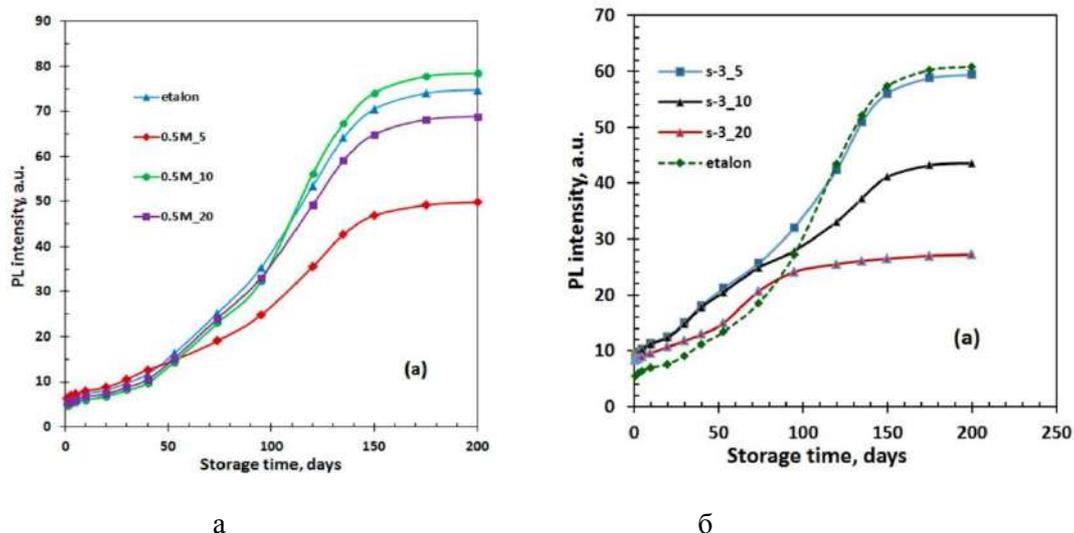


Рис. 1. Зависимости интенсивности ФЛ образцов мезопористого кремния от продолжительности хранения: (а) – в растворе LiBr; (б) – в растворе Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>

**ИК-спектроскопия.** Регистрация спектров пропускания и анализ зависимости основных пиков Si-H, Si-H<sub>2</sub>, Si-O-Si, Si-OH, O<sub>3</sub>-Si-H от длительности хранения для эталона и образца мезо-ПК после погружения в раствор LiBr (с концентрацией S/3 в течение 20 минут) показали сходный характер (рис.2). В начальный период хранения (0 дней) пик качающейся связи Si-O-Si (470 см<sup>-1</sup>) отсутствует в образце сравнения, но появляется в рабочем образце со временем погружения 20 минут, что свидетельствует о формировании связей Si-O-Li, как в работе [6].

При увеличении срока хранения от 5 до 171 дня пик Si-O-Si (470 см<sup>-1</sup>) появляется и растет в образце сравнения и более интенсивно в рабочих образцах мезо-ПК, что доказывает сохранение вклада связей Si-O-Li на всех сроках хранения.

Интенсивности пиков Si-H и Si-H<sub>2</sub> почти экспоненциально убывают за счет десорбции водорода.

При этом интенсивность связи Si-OH (3400 см<sup>-1</sup>) растет линейно, а интенсивности связей S-O-Si (1105 см<sup>-1</sup>) и O<sub>3</sub>-SiH (880 и 2250 см<sup>-1</sup>) растут полиномиально, насыщая оборванные связи с водородом. Это говорит о хемосорбции OH группы, встраивании кислорода в кремний и изменении конфигурации связей.

Характер роста интенсивностей ФЛ и связей S-O-Si и O<sub>3</sub>-SiH в ИК-спектрах при длительном хранении для эталонного и рабочих образцов мезо-ПК свидетельствует об основном вкладе нестехиометрических оксидов Si с междоузельным кислородом в излучательную рекомбинацию и сигнал ФЛ. Роль адсорбированного Li заключается в формировании пассивного диффузионного барьера, при увеличении толщины которого снижается интенсивность ФЛ.

Установлено, что связи Si-O-Li не влияют на интенсивность ФЛ мезопористого кремния, подвергнутого погружению в водный раствор бромида лития.

Анализ ИК-спектров поглощения образцов мезо-ПК с погружением в 0,5М раствор Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> в течение 5 и 10 минут (образцы 0,5М\_5 и 0,5М\_10, соответственно) и эталона показал, что интенсивность пиков, соответствующих колебаниям Si-H и Si-H<sub>2</sub>, очень быстро уменьшается, а интенсивность пиков, соответствующих колебаниям Si-O-Si, Si-OH, O<sub>3</sub>-SiH растет с увеличением продолжительности хранения (не показано ввиду близкой аналогии с рис. 2).

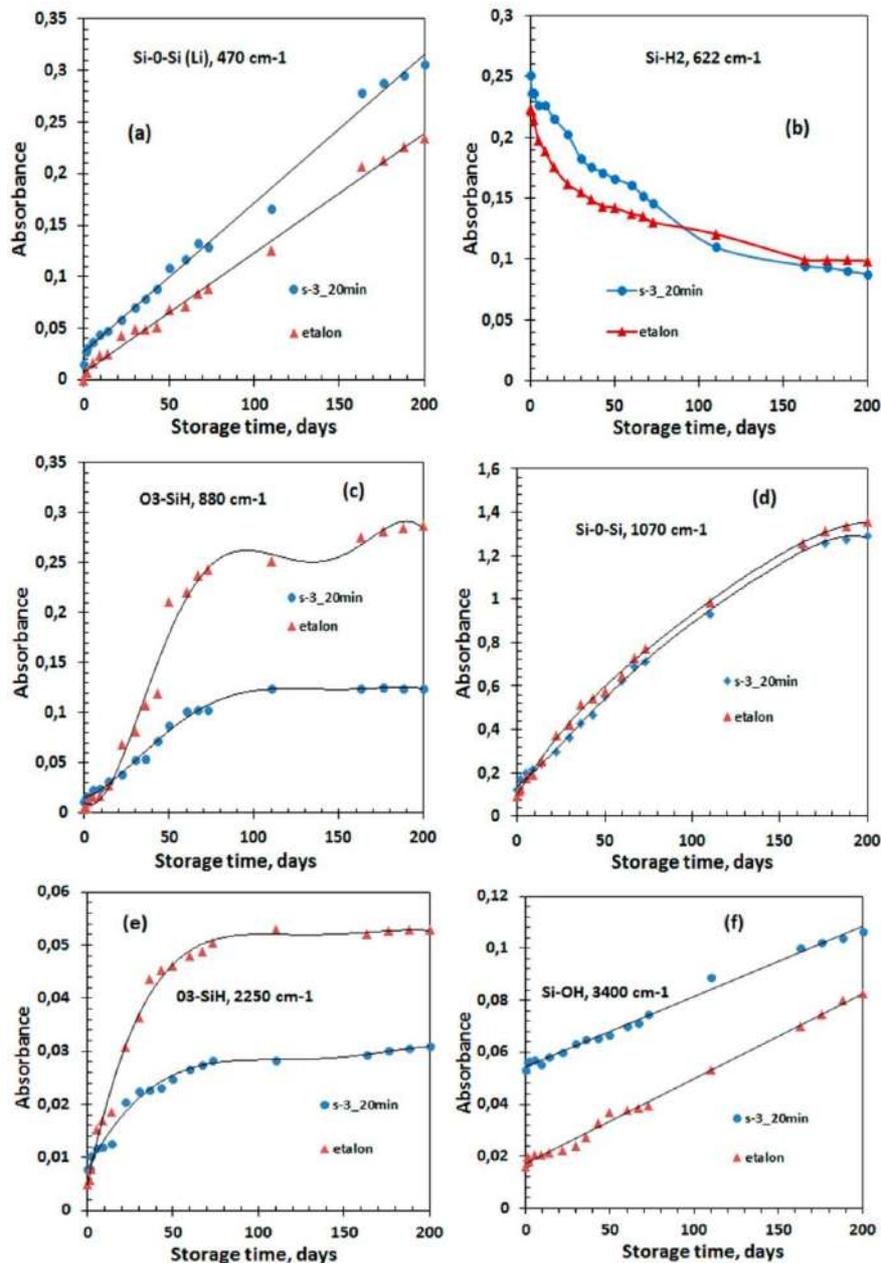
В начальный период хранения полоса, соответствующая колебанию Si-O-Si (470 см<sup>-1</sup>) отсутствует во всех образцах.

Эта полоса появляется только после 14 суток хранения всех образцов, что соответствует началу процесса окисления слоя мезо-ПК, который наиболее отчетливо проявляется после 53 суток хранения и сопровождается сдвигом пика ФЛ.

Обработка слоев мезо-ПК в водном растворе Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> несколько замедляет окисление поглощение Si-O-Si (1170 см<sup>-1</sup>).

Интенсивность полос поглощения, соответствующих колебаниям Si-H и Si-H<sub>2</sub> почти экспоненциально уменьшается из-за десорбции H<sub>2</sub>.

Оборванные связи насыщаются ионами гидроксила и кислорода: интенсивность полосы поглощения, соответствующая колебанию Si-OH (3400 см<sup>-1</sup>) линейно увеличивается, а интенсивности полос поглощения Si-O-Si (1105 см<sup>-1</sup>), O<sub>3</sub>-SiH (880 см<sup>-1</sup> и 2250 см<sup>-1</sup>) полиномиально растут, что подтверждает изменение конфигурации поверхностных связей.



**Рис. 2.** Интенсивность поглощения химических связей на поверхности образца мезо-ПК с погружением в раствор LiBr и эталона при хранении: (а) Si–O–Si ( $470\text{ см}^{-1}$ ;  $1070\text{ см}^{-1}$ ); (б) Si–H ( $664\text{ см}^{-1}$ ;  $2087\text{ см}^{-1}$ ); (в) Si–H<sub>2</sub> ( $622\text{ см}^{-1}$ ;  $2115\text{ см}^{-1}$ ); (г) O<sub>3</sub>–SiH ( $880\text{ см}^{-1}$ ;  $2250\text{ см}^{-1}$ ); (д) Si–OH ( $3400\text{ см}^{-1}$ )

**Заключение.** Мезопористый кремний формировали на пластинах кремния Si(100) с удельным сопротивлением 1–10 Ом×см методом анодирования в растворе HF:C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH = 1:1 при плотности тока 10 мА/см<sup>2</sup> в течение 10 мин с последующей промывкой в деионизованной воде и обработкой в потоке сухого азота при комнатной температуре. Методами спектроскопии фотолюминесценции и просвечивающей ИК спектроскопии был исследован процесс длительного хранения мезо-ПК в атмосферных условиях. В процессе длительного хранения происходит замещение водорода в гидратах водорода на связи O<sub>3</sub>–SiH и Si–OH, которые снижают плотность оборванных связей и плотность центров безызлучательной рекомбинации сгенерированных светом носителей в нанокристаллах мезо-ПК.

Процесс замещения связей стабилизируется после 135 дней хранения, а при 200 днях хранения на воздухе мезо-ПК приобретает максимальную интенсивность и стабильность сигнала фотолюминесценции. Установлено, что мезо-ПК в процессе хранения не подвержен заметному сдвигу пика ФЛ за счет эффекта квантово-размерного ограничения. Среди факторов, определяющих видимую фотолюминесценцию в мезо-ПК после длительного хранения, основное значение имеет нестехиометрический оксид кремния, поскольку со временем хранения в атмосферных условиях толщина данного оксида растет и насыщается, что совпадает с ростом и насыщением амплитуды ФЛ. Основным механизмом фотолюминесценции в мезо-ПК после длительного хранения является излучательная рекомбинация в формируемом оксиде кремния, имеющего ряд кислородных дефектов. Ионы лития и железа, образующиеся в результате диссоциации в растворах LiBr и  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ , соответственно, не вступают в химическую реакцию с кремнием и кислородом, следовательно, их роль заключается в формировании пассивного диффузионного барьера, с увеличением толщины которого интенсивность ФЛ уменьшается.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cooke D. W., Muenchausen R. E., Bennett B. L., Jacobsohn L. G. and Nastasi M. Quantum confinement contribution to porous silicon photoluminescence spectra // Journal of Applied Physics, 96(1), 197 (2004).
2. Aziz W.J., Ramizy A., Ibragim K., Hassan Z., Omar K. The effect of antireflection coating of porous silicon on solar cells efficiency // Optik 122, 1462 (2011).
3. Linnros J., Lalic N., Knápek P., Luterová K., Kočka J., Fejfar A. and Pelant I. Instabilities in electroluminescent porous silicon // Applied Physics Letters 69, 833 (1996).
4. Dubey R.S., Gautam D.K. Porous silicon layers prepared by electrochemical etching for application in silicon thin film solar cells // Superlattices and Microstr. 50, 269 (2011).
5. Dimassi W., Haddadi I., Bousbih R., Slama S., Kanzari M.A., Bouaicha M., Ezzaouia H. Influence of LiBr on photoluminescence properties of porous silicon // J. Luminescence 131, 829 (2011).
6. Galkin N. G., Yan D. T., Galkin K. N., Chusovitin E. A., Bozhenko M. V. Comparative Analysis of the Effect of Immersion of Porous Silicon in Aqueous Solutions of Li and Fe Salts on the Stability, Peak Position and Intensity of its Photoluminescence // Defect and Diffusion Forum 386, 75 (2018).

УДК 535

## ОПТИЧЕСКАЯ ОДНОРОДНОСТЬ КРИСТАЛЛОВ $\text{LiNbO}_3$ С ДВОЙНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ КАТИОНАМИ CU И GD

**О. Ю. Пикуль<sup>1</sup>, Н. В. Сидоров<sup>2</sup>, М. Н. Палатников<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск

<sup>2</sup>Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева  
ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИХТРЭМС КНЦ РАН), г. Апатиты  
e-mail: [pikoul2008@gmail.com](mailto:pikoul2008@gmail.com)

*Методом лазерной коноскопии исследована оптическая однородность монокристаллов  $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Gd}$ . При увеличении концентрации легирующих примесей на коноскопических картинах кристалла появляются визуальные изменения, связанные с локальными изменениями его упругих характеристик и появлением механических напряжений, которые позволяют оценить аномальную оптическую двуосность кристаллического образца.*

Кристаллы ниобата лития относятся к важнейшим сегнетоэлектрическим материалам и находят широкое применение в различных областях науки и техники.

Использование этих материалов в нелинейной, поляризационной и интегральной оптике, лазерной технике, оптоэлектронике во многом определяется оптическим качеством кристаллов [1].

Получение однородных номинально чистых и легированных монокристаллов  $\text{LiNbO}_3$  высокого и сверхвысокого оптического качества до сих пор является актуальной. Это связано с повышенными требованиями к качеству кристаллов ниобата лития для новых приложений в оптике.

Ниобат лития – фаза переменного состава с широкой областью гомогенности на фазовой диаграмме, что позволяет регулировать физические характеристики кристалла изменением стехиометрии и легированием.

Эффект фоторефракции и сопутствующее ему фотоиндуцированное рассеяние света (ФИРС) обуславливают сильную деструкцию лазерного луча в кристалле  $\text{LiNbO}_3$  и являются мешающими факторами для преобразования излучения кристаллом.

В этой связи актуальны исследования, направленные на оптимизацию структуры и фоторефрактивных свойств, на создание высокосовершенных кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  с предельно низким эффектом фоторефракции и ФИРС.

Традиционно повышение оптической стойкости конгруэнтных кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  можно получить путем легирования кристалла  $\text{LiNbO}_3$  ( $R = \text{Li/Nb} = 0.946$ ) металлическими “нефоторефрактивными” катионами, однако, при этом может ухудшиться оптическая и структурная однородность монокристалла [1].

В случае отсутствия внутренних дефектов коноскопическая картина монокристалла ниобата лития в каждой точке входной грани представляет собой систему концентрических черных и светлых колец-изохром с центром на оси системы с черным «мальтийским крестом», состоящим из двух ветвей-изогир.

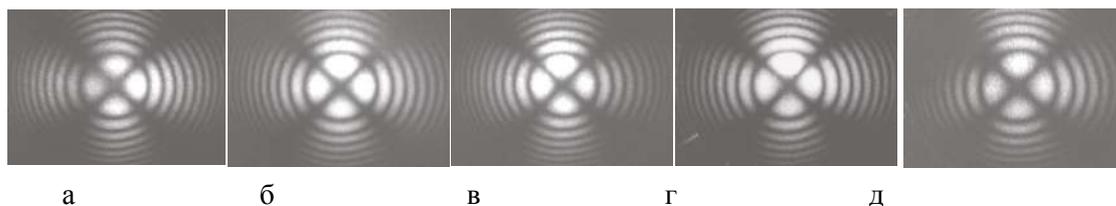
При постоянном радиусе каждого кольца-изохромы коноскопической картины и отсутствии просветления в центре черного «мальтийского креста» делают вывод об оптической однородности кристалла в данной точке входной грани в направлении просвечивания и отсутствии аномального двулучепреломления [2, 3].

Кристалл ниобата лития в идеальных условиях является одноосным, но под действием напряжений, возникающих при легировании и термической предыстории получения монокристалла, в плоскости, перпендикулярной его оптической оси, может приобретаться аномальная двуосность, которая проявляется на коноскопической картине в виде расхождения ветвей «мальтийского креста» на угол  $2V$ , который характеризует деформацию оптической индикатрисы [3] и величину аномального двулучепреломления.

Коноскопический анализ при сканировании лазерным лучом входной грани образцов монокристаллов  $\text{LiNbO}_3$  с концентрацией катионов Cu [0.005 мас. %] и Gd [0.004 мас. %], Cu [0.007 мас. %] и Gd [0.02 мас. %], Cu [0.013 мас. %] и Gd [0.101 мас. %], Cu [0.041 мас. %] и Gd [0.076 мас. %], Cu [0.05 мас. %] и Gd [0.107 мас. %], показывает оптическую однородность и отсутствие аномальной двуосности в исследуемых образцах.

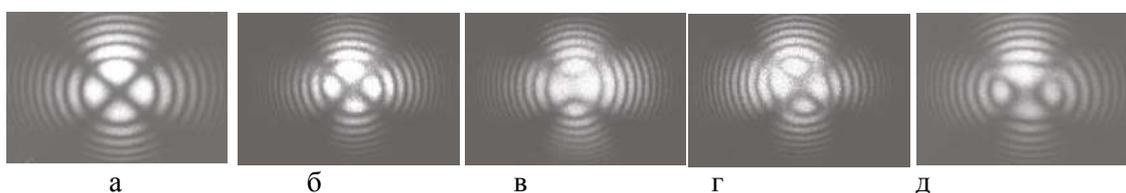
Изменение в указанных пределах концентраций легирующих примесей Cu и Gd не вносит видимых различий и искажений в коноскопические картины исследуемых монокристаллов.

Коноскопическая картина каждого образца соответствует одноосному кристаллу и состоит из контрастного черного «мальтийского креста», который накладывается на концентрические кольца-изохромы с центром в точке выхода оптической оси, совпадающей с центром «мальтийского креста» (рис. 1; а, б, в, г, д).

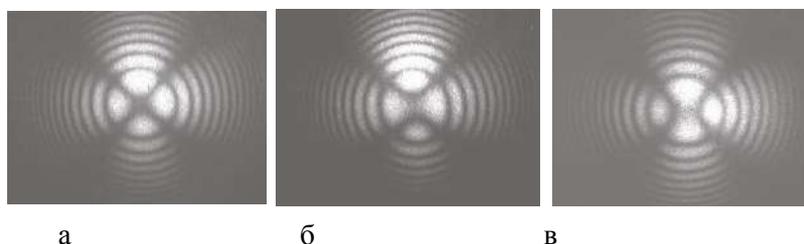


**Рис. 1.** Коноскопические картины легированных кристаллов  $\text{LiNbO}_3$ : а - Cu [0.005 мас. %] и Gd [0.004 мас. %], б - Cu [0.007 мас. %] и Gd [0.02 мас. %], в - Cu [0.013 мас. %] и Gd [0.101 мас. %], г - Cu [0.041 мас. %] и Gd [0.076 мас. %], д - Cu [0.05 мас. %] и Gd [0.107 мас. %].  $\lambda = 532 \text{ нм}$ , плотность мощности  $P = 0.039 \text{ Вт/см}^2$

При увеличении концентрации легирующих добавок наблюдают два вида коноскопических картин – один вид соответствует одноосному кристаллу (рис. 2, а, 3, а), на другом проявляются признаки аномальной оптической двуосности – изохромы приобретают вид эллипсов, вытянутых в различных радиальных направлениях (рис. 2, б, в, г, д; 3, б, в), «мальтийский крест» претерпевает разрыв в центре (рис. 2, в, г, д; 3, б, в).



**Рис. 2.** Коноскопические картины легированного кристалла  $\text{LiNbO}_3$ :Cu [0.31 мас. %] и Gd [0.01 мас. %].  $\lambda = 532 \text{ нм}$ , плотность мощности  $P = 0.039 \text{ Вт/см}^2$



**Рис. 3.** Коноскопические картины легированного кристалла  $\text{LiNbO}_3$ :Cu [0.34 мас. %] и Gd [0.06 мас. %].  $\lambda = 532 \text{ нм}$ , плотность мощности  $P = 0.039 \text{ Вт/см}^2$

Таким образом, результаты визуального исследования аномальной оптической двуосности кристаллов методом лазерной коноскопии показали наличие двух видов коноскопических картин (характерных для одноосного кристалла, а также коноскопических картин с признаками аномальной оптической двуосности) для образцов  $\text{LiNbO}_3$ :Cu [0.31 мас. %] и Gd [0.01 мас. %] и  $\text{LiNbO}_3$ :Cu [0.34 мас. %] и Gd [0.06 мас. %].

Отличия коноскопических картин от идеальных обусловлены структурной неоднородностью кристаллов.

Расчеты показали для образца  $\text{LiNbO}_3$ :Cu [0.31 мас. %] и Gd [0.01 мас. %] максимальное значение угла аномальной оптической двуосности  $2V = 19,8'$ , аномальное двулучепреломление  $\Delta n_{\text{аном}} \sim 0,1 \cdot 10^{-5}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров Н. В., Волк Т. Р., Маврин Б. Н., Калиников В. Т. Ниобат лития: дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны. М.: Наука, 2003. 255 с.
2. Пикуль, О. Ю. Особенности оптической системы для создания коноскопических фигур больших размеров / О.Ю. Пикуль, [и др.] // ИВУЗ. Приборостроение. 2004. № 12. С. 53-55.
3. Штукенберг А. Г., Пунин Ю. О. Оптические аномалии в кристаллах. СПб.: Наука, 2004. 263 с.

УДК 620.22:004.35

### ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕСС-ФОРМ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D ПЕЧАТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

**А. Е. Скируга, М. И. Дворник**

Институт материаловедения Хабаровского НЦ ДВО РАН, г. Хабаровск  
e-mail: [skiruta.andrei@mail.ru](mailto:skiruta.andrei@mail.ru)

*Благодаря высокой эксплуатационной стойкости твёрдые сплавы уже почти 100 лет остаются наиболее распространенным материалом для режущих пластин [3].*

#### **Введение**

В промышленности твердые сплавы получают прессованием порошков в пресс-формах из закалённой стали и твердых сплавов ограниченной сложности и спеканием. Технология изготовления пресс-формы состоит из: черновой и чистовой механической обработки, электроэрозионной обработки, термообработки, шлифования и полирования [6]. Метод имеет ряд недостатков, а именно высокие трудовые и материальные затраты, низкий коэффициент использования сырья, ограничения на форму и размер изделий, накладываемые применяемыми станками и инструментами. Значительные затраты на изготовление пресс-формы представляют проблему при производстве единичных твердосплавных деталей и запчастей. Альтернативным методом является шликерное литье [2]. Из недостатков следует отметить длительный и затратный процесс изготовления пресс-форм для литья, высокие затраты энергии и времени на удаление пластификатора, низкие физико-механические свойства готовых изделий. Помимо этого применяется газостатическое прессование. Объективными недостатками являются большая длительность рабочего цикла, высокие капитальные и эксплуатационные затраты. В последние годы получила распространение технология 3D печати (аддитивные технологии) металлов, в том числе твёрдых сплавов [1,4]. Основные методы: SLM (Selective Laser Melting), SEBM (Selective Electron Beam Melting), VJAM (Binder Jet Additive Manufacturing), 3DGP (3D gel-printing), FFF (Fused Filament Fabrication) [1]. При FFF, VJAM и 3DJP печати между слоями остаются пустоты, которые при спекании зарастают не до конца, это приводит к образованию пор. При лазерном спекании SLM, SEBM и SLS из-за наличия тугоплавких фаз остаются поры. Таким образом прямое использование существующих технологии 3D печати приводит к изменению химического состава, повышению пористости и снижению физико-механических характеристик твердосплавных изделий. Мы предлагаем, на 3D принтере изготавливать пресс-форму, а изделия получать прессованием в ней и спеканием. Отсутствие данных о давлениях прессования, свойствах и структуре изделий, полу-

ченных в пресс-формах, изготовленных методом 3D печати затрудняет внедрение методики.

Целью данной работы является исследование процесса уплотнения порошков с различным содержанием пластификатора в пресс-формах, изготовленных методом 3D печати и свойств полученных изделий.

**Методика экспериментов.** В экспериментах использовали порошок WC-15Co с различным содержанием пластификатора (раствор каучука в бензине) в нем (1,2,4 об %). С помощью 3D принтера Flash Forge Dreamer изготавливались пресс-форма и пуансоны. Перед началом прессования пуансоны и внутренняя поверхность пресс-формы обрабатывались разделительной смазкой GRASS SILICONE. Масса порошка, засыпаемого в пресс-форму варьировалась от 10,5 до 12 гр. Прессование проводилось на испытательном прессе ИП-250М. Для каждого процентного содержания пластификатора в порошке WC-15Co прессование проводилось при 4 различных давлениях (50,100,140,205 МПа). При давлениях 50, 100,140 МПа формовки изготавливали в пресс-форме, полученной методом 3D печати, а при 205 МПа в стальной пресс-форме. После выпрессовки измерялись геометрические размеры формовок, их масса и плотность на весах VIBRA. Спекание заготовок производилось в вакуумной трубчатой печи Carbolite STF. После спекания повторно производились измерения плотности, массы, геометрических размеров образцов. Помимо этого определено содержание углерода (Horiba EMIA-320V2), проведены анализ структуры на микроскопе ATAMI. Испытания на прочность производилось на испытательном прессе ИП-250М согласно ГОСТ 20019-74. Твердость по Виккерсу определена на твердомере HVS 50.

**Результаты и обсуждение.** Зависимость относительной плотности прессовки описывается уравнением Ждановича [5]:

$$p = p_k \times \frac{v^n - v_o^n}{1 - v_o^n} \quad (1),$$

где  $p_k$  - давление, при котором достигается 100% прочность (445;415;388;338 при содержании пластификатора 1 об%; 345;310;210;250 при содержании пластификатора 2 об%; 195;190;175;135 при содержании пластификатора 4 об%), Мпа;

$v$  - относительная плотность порошка (0,56;0,58;0,59;0,63 при содержании пластификатора 1 об%; 0,64;0,66;0,68;0,72 при содержании пластификатора 2 об%; 0,79;0,8;0,82;0,91 при содержании пластификатора 4 об%), %;

$v_o$  - относительная насыпная плотность порошка (0,21;0,24;0,29 при содержании пластификатора 1, 2, 4 об % соответственно), %;

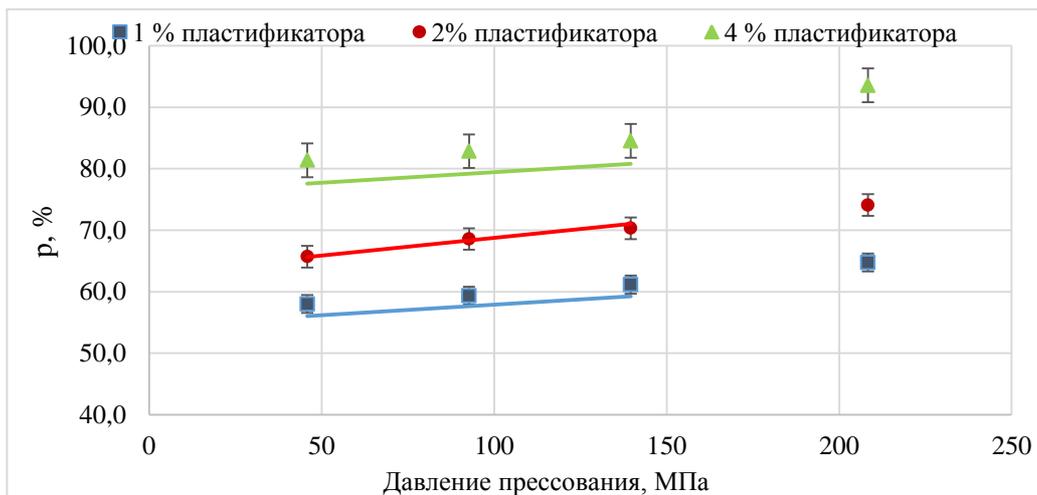
$n$  - фактор прессования (3,54;3,63; 3,83 при содержании пластификатора 1, 2, 4 об % соответственно).

$$n = 1 + \frac{2}{P_o} = 1 + \frac{2}{1 - v_o} \quad (2),$$

где  $P_o$  - пористость насыпки порошка (0,79;0,76;0,71 при содержании пластификатора 1, 2, 4 об % соответственно)

Увеличение давления прессования приводит к линейному росту относительной плотности всех образцов, что соответствует уравнению (1) (Рис.1.). При увеличении содержания пластификатора с 1 до 4 об % происходит снижение  $p_k$  с 445 до 135 МПа.

Теоретическое давление в образцах с содержанием пластификатора 4% приблизилось к значению реального давления прессования.

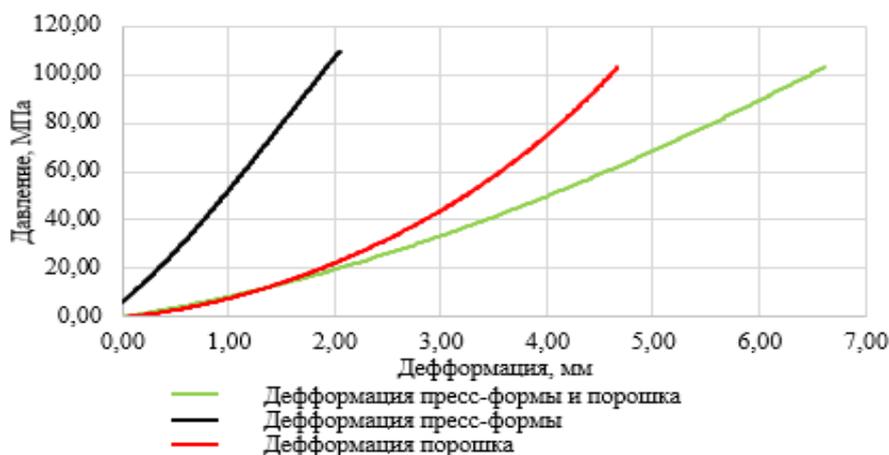


**Рис. 1.** Зависимости относительной плотности от давления прессования при различном содержании пластификатора

Пористость не спечённых образцов, полученных в пресс-форме, изготовленной методом 3D печати лишь на 5,5% меньше, чем у образцов, полученных с применением стальной пресс-формы. Такой незначительный рост пористости не должен повлиять на свойства спеченных изделий.

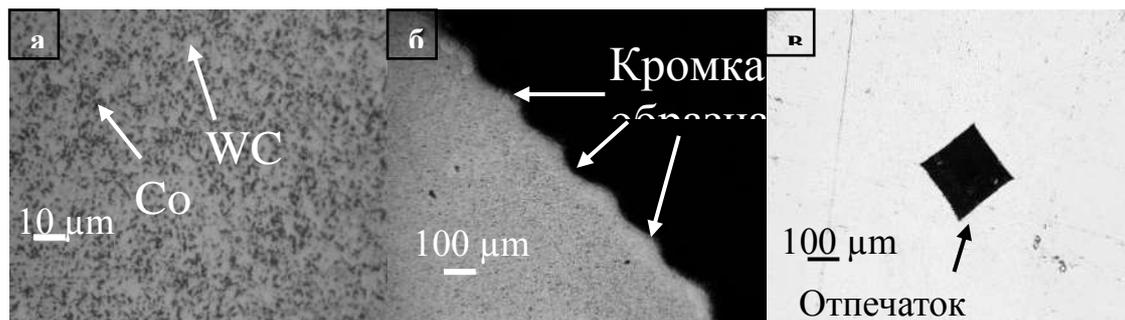
В процессе прессования пресс-форма и порошок подвергались упругим и пластическим деформациям (рис.2).

Из диаграммы видно, что при достижении давления 100 МПа, что соответствует давлению при прессовании в стальных и твердосплавных пресс-формах, пресс-форма, изготовленная методом 3D печати не разрушилась [5, 6]. Учитывалось трение пуансонов о стенки пресс-формы путем математического вычитания экспериментально установленных значений от значений давления прессования (6,3; 11,5; 16,7 МПа соответственно). Увеличение давления пуансона приводит к увеличению силы трения, что приводит к снижению реального давления, действующего на порошок. При максимальном давлении наблюдается значительная пластическая деформация пресс-формы.



**Рис. 2.** Кривые уплотнения порошков в процессе прессования

Для исследования прочности образцы шлифовались алмазными дисками на шлифовально-полировальном станке Beta Buehler 2, а для определения твердости дополнительно полировались алмазной пастой. Результаты исследования образца № 1 (1 об % содержания пластификатора): твердость – 1190 HV (нагрузка 50 кг), прочность на изгиб 3000 МПа, содержание 5,2%. Высокая прочность на изгиб может объясняться мелкозернистой структурой порошка WC-15Co, что является следствием избыточного измельчения порошков WC и Co перед их смешиванием [3, 7]. Результаты исследования образца № 2 (2 об % содержания пластификатора): твердость – 1150 HV (нагрузка 50 кг), прочность на изгиб 1680 МПа, содержание углерода 5,3%. Микроструктура полученных образцов представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Структура образцов, полученных с применением пресс-формы, изготовленной методом 3D печати (а, б); отпечаток индентора пирамидки (в)

Прочность и твердость, полученных нами образцов не уступает образцам, полученным в стальных пресс-формах в [7, 8]. Анализ результатов работы [1] показал, что твердосплавные изделия, полученные 3D печатью, имеют прочность на изгиб на 30-40% меньше по сравнению с полученными нами образцами. Образцы, полученные в пресс-форме, изготовленной методом 3D печати, представлены на рис. 4.



**Рис. 4.** Твердосплавные образцы, полученные в пресс-форме, изготовленной методом 3D печати

**Выводы.** Прессование в пресс-формах, полученных 3D печатью и спекание в вакууме позволяет изготавливать твердосплавные изделия, которые не уступают по свойствам изделиям, полученным прессованием в стальных пресс-формах. При увеличении давления прессования с 50 до 140 МПа, увеличивается относительная плотность прессовок. Увеличение содержания пластификатора снижает давление прессования и увеличивает уплотняемость порошков. Выявлено, что при увеличении содержания пластификатора до 4 об % в порошке, пористость изделий, спеченных при 1435 C<sup>0</sup> значительно выше чем в

образцах с 1 об % и 2 об % содержанием пластификатора - 0,8 % против 0,2% и 0,4% соответственно. Прочность и твердость полученных изделий соответствует современным стандартам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Atefeh Aramian, Seyed Mohammad Javad Razavi, Zohreh Sadeghian, Filippo Berto. A review of additive manufacturing of cermets // Additive Manufacturing. 2020. V.33. P.1-17.
2. Либенсон Г. А., Лопатин В. Ю., Комарницкий Г. В. Процессы порошковой металлургии. В 2-х т. Т.2 Формирование и спекание: учебник для вузов. М.: МИСИС. 2002. С. 77-115.
3. Fang Z.Z., Wang X., Ryu T., Hwang K.S., Sohn H.Y. Synthesis, sintering, and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide // A review. Int. J. Refract. Met. Hard Mater. – 2008. V. 27. P. 288-299.
4. Walter Lengauer, Ivica Duretekb, Markus Fürsta, Viktoria Schwarz, Joamin Gonzalez-Gutierrezb, Stephan Schuschnigg, Christian Kuklac, Michael Kitzmanteld, Erich Neubauerd, Clemens Lieberwirth, Vincent Morrison. Fabrication and properties of extrusion-based 3D-printed hardmetal and cermet components // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2019. V. 82. P. 141-149.
5. Либенсон Г. А., Лопатин В. Ю., Комарницкий Г. В. Процессы порошковой металлургии. В 2-х т. Т.2 Формирование и спекание: учебник для вузов. М.: МИСИС. 2002. С. 23-44.
6. Мендельсон В. С., Рудман П. И. Технология изготовления штампов и пресс-форм: учебник для машиностроительных техникумов. М. 1971. С. 157-180.
7. Kresse T, Meinhard D, Bernthaler T and Schneider G. Hardness of WC-Co hard metals: preparation, quantitative microstructure analysis, structure-property relationship and modelling // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2018. V. 75. P. 287-293.
8. Liu K, Wang Z, Yin Z, Cao L and Yuan J. Effect of Co content on microstructure and mechanical properties of ultrafine grained WC-Co cemented carbide sintered by spark plasma sintering // Ceram. Int. 2018. V. 44. P. 18711-18718.

УДК 53.09:541

## ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В $KNO_3$ , ВВЕДЁННОГО В УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

**И. А. Чернечкин, А. Ю. Милинский**

Благовещенский государственный педагогический университет, Благовещенск  
e-mail: [a.milinskiy@mail.ru](mailto:a.milinskiy@mail.ru)

*Проведён сравнительный анализ фазовых переходов в объёмном  $KNO_3$  и в нанокompозитах на основе  $KNO_3$ , введённого в углеродные нанотрубки с внутренним диаметром 3-5 нм. Произведено исследование температурных зависимостей ДТА сигнала объёмного и нанокompозитного образцов в режиме нагрев-охлаждение со скоростью 2 К/мин. Показано, что в нанокompозитном нитрате калия происходит изменение температур всех трех фазовых переходов.*

На сегодняшний день большое внимание уделяется изучению нанокompозитов, представляющих собой нанопористые матрицы, заполненные различными сегнетоэлектриками. Интерес к таким нанокompозитам, проявляющим сегнето-электрические свойства, довольно легко объясним: область их применения на практике увеличивается.

В связи с размерным эффектом структура и свойства частиц, внедрённых в нанопористые матрицы, в частности углеродные нанотрубки, могут резко отличаться от свойств и структуры объёмного вещества. Кроме размерного эффекта свой вклад на вышеназванное изменение вносит взаимодействия частиц со стенками нанотрубок, а также между собой, что в значительной мере проявляется у нанокомпозитов. Полярные свойства последних на основе углеродных нанотрубок изучены относительно слабо. Большинство же работ посвящено проявлению ограниченной геометрии при сегнетоэлектрических фазовых переходах. Наблюдалось смещение температур фазовых переходов и в некоторых случаях замечены новые переходы, отсутствующие в объёмном веществе, а в некоторых – исчезновение переходов, имеющихся в объёмном веществе. Такие же изменения можно заметить и при изучении фазовых переходов неполярных диэлектриков. Однако, отдельные исследования показали (см. [1–3] и ссылки в них), что размер пор наноматриц не является решающим фактором для изменения температур сегнетоэлектрических переходов: для нитрата натрия и сегнетовой соли наблюдалось, как повышение, так и понижение температуры переходов, но это объяснялось изменением формы наноканалов и материала, из которого они изготовлены.

В настоящей работе приводятся результаты сравнительного анализа фазовых переходов нанокомпозитов на основе  $\text{KNO}_3$ , введённого в углеродные нанотрубки.

При комнатной температуре и атмосферном давлении объёмный нитрат калия имеет ромбическую структуру пространственной группы ( $R\overline{3}m$ ) [8], эта фаза обозначается фазой II. Чтобы образец перешёл в фазу I, необходимо его нагреть приблизительно до 401 К. В фазе I нитрат калия имеет разупорядоченную тригональную кальцитообразную структуру  $R\overline{3}m$ . При понижении температуры возможен переход из фазы I в промежуточную фазу III, характеризующуюся пространственной симметрией  $R\overline{3}m$ , а также спонтанной поляризацией вдоль оси  $c$ . Для перехода из фазы III в стабильную при комнатной температуре фазу II нужны более низкие температуры. Переход из одной фазы в другую является реконструктивным, т. е. в симметриях не соблюдаются соотношения группа-подгруппа.

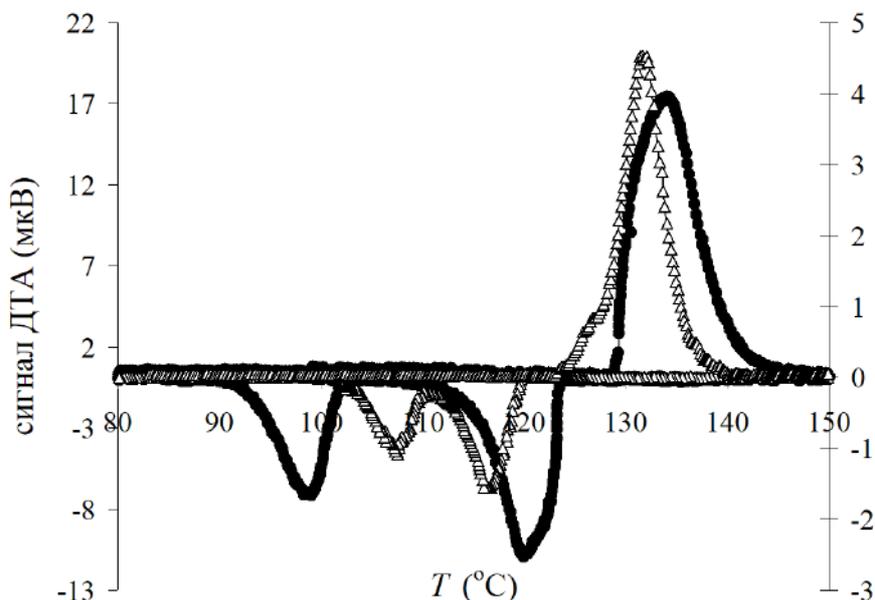
Наноматрицы, используемые в данной работе, представляют собой углеродные нанотрубки – это аллотропная модификация углерода, имеющая цилиндрическую форму диаметром 3-5 нм и длину 3-12 мкм, при этом характеризующиеся малым сопротивлением, равным 1412 мкОм. Углеродные нанотрубки были получены методом CVD, то есть химическим осаждением из газовой фазы.

Полости углеродных нанотрубок заполнялись с помощью насыщенного водного раствора нитрата калия. Внедрение производили так, чтобы весь раствор проник в поры. Затем полученная смесь высушивалась при температуре приблизительно равной 420 К. Для увеличения коэффициента заполнения пор процедура повторялась. Для регистрации сигнала ДТА использовался синхронный термоанализатор Linseis STA PT 1600, позволяющий одновременно проводить исследования по термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии. Точность определения температуры составляла 0.1 К. Исследования проводились в режиме «нагрев–охлаждение» со скоростью 1 К/мин в интервале от комнатной температуры до 440 К. Для сравнения исследовались поликристаллические порошки нитрата калия.

Согласно полученным результатам, для порошка нитрата калия наблюдается один фазовый переход около 134 °С из фазы II в фазу I при нагреве. В режиме охлаждения сначала происходит переход из фазы I в фазу III при ~120 °С а потом из фазы III в фазу II при ~98 °С.

Для нитрата калия в углеродных нанотрубках наблюдается изменение температур всех трех фазовых переходов. Переход из параэлектрической фазы II в параэлектрическую фазу I смещен к низким температурам на 2 °С. Сегнетоэлектрическая фаза III для нитрата калия, внедрённого в углеродные нанотрубки наблюдается в более узком темпе-

ратурном интервале, по сравнению с порошком  $\text{KNO}_3$ , за счет понижения верхнего на 4,5 °С и повышения нижнего на 9,5 °С переходов. Температурный интервал ее существования равен 8 °С, что на 14 °С меньше, чем для объемного нитрата калия (рис.).



Температурная зависимость сигнала ДТА для порошка  $\text{KNO}_3$  (заполненные символы) и  $\text{KNO}_3$  в углеродных нанотрубках (не заполненные символы)

Уменьшение температурного интервала сегнетоэлектрической фазы в нитрате калия, введенном в поры углеродных нанотрубок, согласуется с выводами теоретических моделей, разработанных на основе феноменологической теории Ландау и модели Изинга [5]. Эти модели предсказывают, что температура структурного фазового перехода для малых изолированных частиц сферической или цилиндрической формы смещается вглубь сегнетоэлектрической фазы при уменьшении размеров.

Таким образом, в данной работе обнаружено значительное сужение температурного интервала сегнетоэлектрической фазы нитрата калия, введенного в полости углеродных нанотрубок по сравнению с объемным нитратом калия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Milinskii A. Yu., Baryshnikov S. V. Phase Transitions in Nanocomposites Obtained by Introducing  $\text{KNO}_3$  into the Pores of Nanosized  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Films // *Nanoscience & Nanotechnology-Asia*. 2019. V.9. Iss.1. P. 128-132.
2. Milinskiy A. Yu., Baryshnikov S. V., Charnaya E. V., Egorova I. V., Sarnatskii V. M. // Phase transitions in bulk and confined organic ferroelectric DIPAI. *Results in Physics*. 2020. V. 17. P. 103069.
3. Набережнов А. А., Ванина П. Ю., Сысоева А. А., Cizman A., Rysiakiewicz-Pasek E., Hoser A. Влияние ограниченной геометрии на структуру и фазовые переходы в наночастицах нитрата калия // *ФТТ*. 2018. Т.60. № 3. С. 439-442.
4. Chen A., Chernow F. Nature of ferroelectricity in  $\text{KNO}_3$  // *Phys. Rev.* 1967. V.154. Iss.2. P. 493-505.
5. Wang C. L., Xin Y., Wang X. S., Zhong W. L. // Size effects of ferroelectric particles described by the transverse Ising model // *Phys. Rev. B*. 2000. V.62. Iss. P. 11423-11427.

## Секция «Физическое образование (школьное и вузовское)»

УДК 378.147.88

### ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ «ПОЛЯРИЗАЦИЯ» В РАМКАХ КУРСА ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

М. С. Алёшин

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [max@pnu.edu.ru](mailto:max@pnu.edu.ru)

*В работе рассматривается способ проведения лабораторных занятий по теме «Поляризация» в курсе физики в условиях фактического отсутствия в процессе обучения доступа к лабораторному оборудованию. Описанные лабораторные работы входят в состав электронного учебного курса по дисциплине «Общий физический практикум». При их создании мы ставили целью создать продемонстрировать студенту реальное лабораторное оборудование, процесс работы с ним.*

Современное образование уже невозможно представить без использования информационных технологий. Если ранее электронные средства обучения обычно использовались в качестве вспомогательных инструментов в образовательном процессе, то сейчас, вследствие быстрых темпов развития компьютерной техники и средств связи, дистанционное образование становится всё более популярно и доступно. Более того, современный университет фактически не может вести образовательную деятельность, не имея в распоряжении функционирующую образовательную среду. Произошедшая в мире и стране вспышка коронавирусной инфекции вовсе вынудила образовательные учреждения полностью перейти в дистанционный режим работы. Преимущественно для авторов образовательных курсов перевод в онлайн форму являлся лишь вопросом времени и заключался в простом переносе в электронную образовательную среду с сопутствующим наполнением курса электронными материалами, заданиями и прочим. Однако то же самое нельзя сказать о курсах естественных и физических наук. Здесь проблемным является вопрос о том, как обеспечить эффективный лабораторный практикум.

Создатели курсов, в состав которых входят лабораторные практикумы, прибегают к разным способам их реализации. Наиболее удачный, неприменимый в случае введения режима самоизоляции заключается в создании так называемых гибридных курсов [1]. В таком случае для лабораторного практикума посещения лабораторий университета является обязательным, остальные же занятия проводятся в дистанционном формате. Однако в сложившейся ситуации приходится искать иные способы проведения практикума. Одним из наиболее распространённых является применение компьютерных симуляций физических явлений и создание на их основе виртуальных лабораторных работ [2], в том числе с использованием игровых движков [3]. В работе [4] обсуждаются сложности, возникающие при воплощении описанных способов, а также преимущества и недостатки такого подхода как онлайн-трансляция лабораторного занятия.

В данной статье предлагается способ реализации электронных версий лабораторных работ по оптике в форме видеороликов и фотографий, по которым обучающийся самостоятельно выполняет измерения. Настоящие работы создавались под существующие методические пособия и были внедрены в учебный процесс в составе электронного учеб-

ного курса. Здесь мы рассмотрим краткое описание видеoverсий следующих работ: «Изучение естественной оптической активности», «Изучение поляризованного света». Мы приведём лишь описание некоторых технических моментов реализации опытов, оставляя вопрос о методическом обеспечении и инструментах внедрения работ в электронные образовательные курсы, поскольку подразумеваем, что эти инструменты имеются в распоряжении современного университета.

**Лабораторная работа «Изучение естественной оптической активности».** Цель работы заключается в определении удельного вращения плоскости поляризации света и концентрации сахара в водном растворе. Для этого применяется полутеневого поляриметр СМ-2 [5]. Студентам предлагается просмотреть видеоролик, в котором запечатлён процесс измерения. Для определения угла поворота плоскости поляризации необходимо остановить видео в момент, когда достигается равенство яркостей полей сравнения в окуляре поляриметра вблизи полного затемнения. Для удобства можно замедлить скорость воспроизведения видео. Кадр из видеоролика работы представлен на рис. 1.



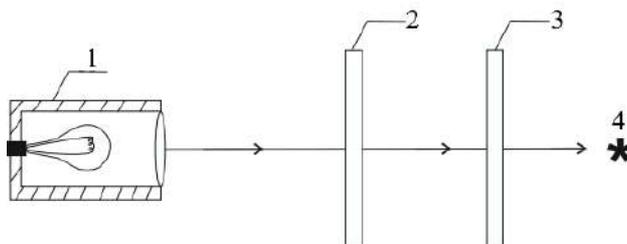
**Рис. 1.** Кадр с поляриметром из работы «Изучение естественной оптической активности»

Сложность съёмки такой работы обусловлена необходимостью одновременной фиксации на камеру чёткого изображения в окуляре поляриметра и измерительных угловых шкал. При повторном поиске областей равного затемнения полей зрения в окуляр невозможно поставить видео на паузу ровно в тот же момент несколько раз, это позволяет проводить серию измерений углов по одному ролику.

**Лабораторная работа «Изучение поляризованного света».** Цель работы заключается в ознакомлении с методами получения линейно поляризованного света и исследовании его свойств. Работа состоит из двух частей: «Исследование отражения линейно поляризованного света от диэлектриков», в ходе которой определяется угол Брюстера для стекла и эбонита, и «Проверка закона Малюса» [6]. При определении угла Брюстера студенту необходимо добиться наблюдения минимальной интенсивности света, прошедшего через поляризатор и отраженного от пластинки диэлектрика вращая сначала поляризатор, а затем поворачивая саму пластинку диэлектрика. Таким образом определяется положение, в котором наблюдается наименьшая интенсивность отражённого поляризованного света. Решающую роль для удачных измерений играет правильное направление взгляда наблюдателя на пластинку. Съёмка подобных измерений невозможна без конструирования

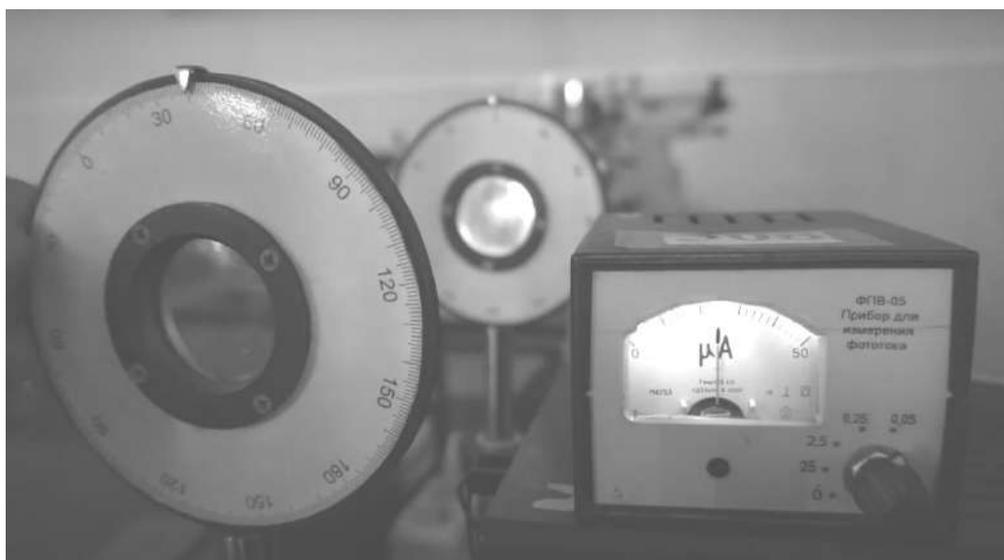
ния дополнительных приспособлений. По этой причине в электронной версии была реализована только вторая часть работы.

Схема установки для проверки закона Малюса приведена на рис. 2. Свет от лампы 1 проходит через поляризатор 2 и анализатор 3. Интенсивность света регистрируется с помощью фотоприёмника 4. В ходе эксперимента измеряется фототок  $I$  в зависимости от угла  $\alpha$  между плоскостями поляризатора и анализатора, строится график этой зависимости в относительных единицах. Проверятся выполнение закона Малюса по формуле  $\frac{I}{I_0} = \cos^2 \alpha$ , где  $I_0$  – фототок при совпадении разрешенных плоскостей колебаний обоих поляроидов.



**Рис. 2.** Схема для проверки закона Малюса

Электронная версия работы представляет собой видеоролик процесса измерений. Сцена для съёмки была подобрана таким образом, чтобы все шкалы измерительных приборов присутствовали в одном кадре (см. рис. 3).



**Рис. 3.** Кадр с двумя поляроидами из работы «Изучение поляризованного света»

Для съёмки всех работ использовалась полупрофессиональная камера с возможностью ручной фокусировки и штатив, что позволило получить качественные видеофайлы с хорошим разрешением, по которым не составляет труда произвести измерения.

Таким образом, описанный нами способ реализации лабораторного практикума позволяет, хоть и не в полной мере, симитировать взаимодействие студента с реальным лабораторным оборудованием. Наличие фото и видео настоящих установок с процессом измерений реальных экспериментальных данных позволяет в большинстве случаев продемонстрировать явление как есть, а не его упрощённую модель. Однако стоит отметить,

что проведение лабораторного практикума в такой форме, имеет скорее больше минусов, нежели плюсов. С точки зрения передачи студентам к недостаткам относится, прежде всего, сложность, а в большинстве случаев невозможность, сформировать у студента навыки и умения работы с измерительными приборами без непосредственного контакта с ними. Здесь же стоит отметить, что в приведённых нами работах фактически опускается процесс калибровки и настройки лабораторного оборудования. Подобный опыт необходим для приобретения в процессе обучения, поскольку способствует закреплению навыков самостоятельного проведения эксперимента. Данный подход имеет ещё одно негативное следствие: пропадает элемент случайности в эксперименте. Так, в работе «Проверка закона Малюса» за счёт того, что в каждом отдельном эксперименте невозможно установить одинаковую интенсивность осветителя, наборы значений фототока в независимых экспериментах будут отличаться, что способствует большей вариативности результатов измерений.

В представленном же случае, когда эксперимент поставлен однажды и зафиксирован на видео, а результаты по нему снимаются многократно, у разных измеряющих в пределах небольших отклонений постоянно будет получаться один и тот же набор данных. Это, бесспорно будет способствовать списыванию среди студентов. Если при очном выполнении преподавателю не составит труда определить плагиат, то в данном случае сам формат работы накладывает ограничение на вариативность результатов.

С позиций реализации такого практикума большим минусом является техническая сложность проведения фото и видео съёмки некоторых лабораторных работ. Так, для качественной съёмки описанных виртуальных лабораторных работ требуется наличие как минимум полупрофессиональной камеры и штатива, без которых в частности было бы невозможно получить чёткого изображения шкалы поляриметра и изображения в его окуляре. Естественно, далеко не каждый сотрудник университета имеет распоряжении подобное оборудование. Но даже при его наличии необходимы навыки съёмки в таких условиях.

Для создания каждого видеоролика приходится детально продумывать расположение объектов и инструментов съёмки, подбирать подходящее освещение, производить монтаж.

В качестве заключения отметим, что описанные нами виртуальные работы являются результатом попытки наиболее качественного перевода в короткие сроки лабораторного практикума в дистанционный формат в условиях фактического отсутствия возможности допустить обучающихся к оборудованию. По нашему мнению, нельзя полностью отказываться от практикума на реальном оборудовании. Сочетание очной и дистанционной форм проведения занятий, когда лабораторные занятия проводятся в лаборатории университета, а остальные в электронной образовательной среде может быть эффективным при реализации существующих образовательных программ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Jeschofnig P. Effective laboratory experiences for distance learning science courses with self-contained laboratory kits [Электронный ресурс] // Proceedings of the 20th Annual Conference on Distance Teaching and Learning – 2004. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/228489913\\_Effective\\_laboratory\\_experiences\\_for\\_distance\\_learning\\_science\\_courses\\_with\\_self-contained\\_laboratory\\_kits](https://www.researchgate.net/publication/228489913_Effective_laboratory_experiences_for_distance_learning_science_courses_with_self-contained_laboratory_kits) (10.10.2020).
2. Драчёв К. А., Губин С. В. Виртуальные лабораторные работы по физике для студентов дистанционной формы обучения // The Scientific Heritage. № 44-1 (44). 2020. С. 9-12.
3. Насыров В. В., Хаин Д. С. Виртуальная лабораторная работа «Машина Аत्वуда» // Материалы научно-практической конференции: ТОГУ-Старт: фундаментальные и прикладные исследования молодых. Хабаровск. 2020. С. 69-74.
4. Алёшин М. С. Лабораторный практикум по оптике в условиях дистанционного обучения // The Scientific Heritage. № 48-3 (48). 2020. С. 50-53.

5. Кирюшин А. В. Изучение естественной оптической активности: методические указания к лабораторной работе № 53. [Электронный ресурс]. 2006. URL: [http://pnu.edu.ru/ media/filer\\_ public/2013/04/03/lab53.pdf](http://pnu.edu.ru/media/filer_public/2013/04/03/lab53.pdf) (10.10.2020).
6. Шербаков Ю. И. Изучение поляризованного света: методические указания к лабораторной работе № 308 [Электронный ресурс]. 2013. URL: [http://pnu.edu.ru/media/filer\\_public/92/dd /92dd 0dc1-a3ba-4143-b7e8-04e41e947a7e/lab308.pdf](http://pnu.edu.ru/media/filer_public/92/dd /92dd 0dc1-a3ba-4143-b7e8-04e41e947a7e/lab308.pdf) (10.10.2020).

УДК 378.147.88

## **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМАМ «ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ» И «ДИФРАКЦИЯ» В РАМКАХ КУРСА ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ**

**М. С. Алёшин**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [max@pnu.edu.ru](mailto:max@pnu.edu.ru)

*В работе рассматривается способ проведения лабораторных занятий по темам «Интерференция» и «Дифракция» в курсе физики в условиях фактического отсутствия в процессе обучения доступа к лабораторному оборудованию. Описанные лабораторные работы входят в состав электронного учебного курса по дисциплине «Общий физический практикум». При их создании мы ставили целью продемонстрировать студенту реальное лабораторное оборудование, процесс работы с ним.*

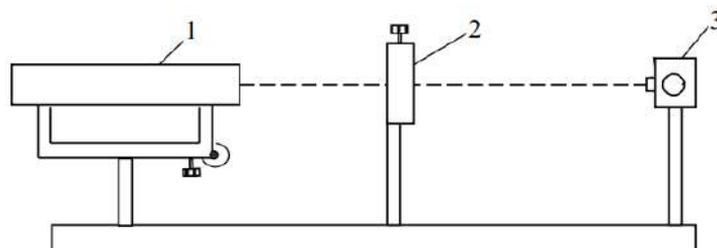
В настоящее время использование информационных технологий в учебном процессе становится не столько актуальным, сколько необходимым. Введённый практически по всему миру режим социального дистанцирования вынудил учебные заведения перейти на дистанционную форму обучения. Если раньше такой режим работы рассматривался как альтернатива очным занятиям и применялся в большей степени для заочной формы обучения, то теперь, в связи с принятием мер по предотвращению распространения коронавирусной инфекции, онлайн-обучение стало единственно возможным вариантом функционирования учебных заведений, в том числе и университетов. Таким образом, электронные средства обучения, которые обычно используются в качестве вспомогательных инструментов в образовательном процессе, на момент написания данной работы становятся уже основными и даже обязательными. Однако одной из самых трудно решаемых задач при переходе в дистанционный режим является вопрос о том, как обеспечить эффективный лабораторный практикум.

Наиболее удачный опыт организации дистанционных технологий обучения основан на использовании так называемых гибридных курсов [1]. В таком случае для лабораторного практикума посещения университета является обязательным, остальные же занятия проводятся в дистанционном формате. Однако в условиях социального дистанцирования такой способ, очевидно, неприменим. Одним из наиболее распространённых способов перевод лабораторных занятий в электронную форму является применение компьютерных симуляций и виртуальных лабораторных работ [2], в том числе с использованием игровых движков [3]. В работе [4] обсуждаются сложности, возникающие при воплощении описанных способов, а также преимущества и недостатки такого подхода как онлайн-трансляция лабораторного занятия.

В данной статье предлагается способ реализации электронных версий лабораторных работ по оптике в форме видеороликов и фотографий, по которым обучающийся само-

стоятельно выполняет измерения. Настоящие работы создавались под существующие методические пособия и были внедрены в учебный процесс в составе электронного учебного курса. Здесь мы рассмотрим краткое описание видеoverсий работ «Изучение дифракции света от одной щели» и «Определение радиуса кривизны линзы и показателя преломления воды при помощи колец Ньютона».

**Лабораторная работа «Изучение дифракции света от одной щели».** Цель работы заключается в изучении влияния ширины узкой щели на вид дифракционной картины при наблюдении в свете лазера. Схема установки приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема опыта с кольцами Ньютона

На оптической скамье установлены лазер 1, вертикальная щель 2 регулируемой ширины и держатель фотоприёмника 3. В качестве фотоприёмника используется фотодиод, который может перемещаться перпендикулярно направлению луча в горизонтальной плоскости. Устройство откалибровано так, что фототок пропорционален интенсивности света, падающего на фотодиод [5].

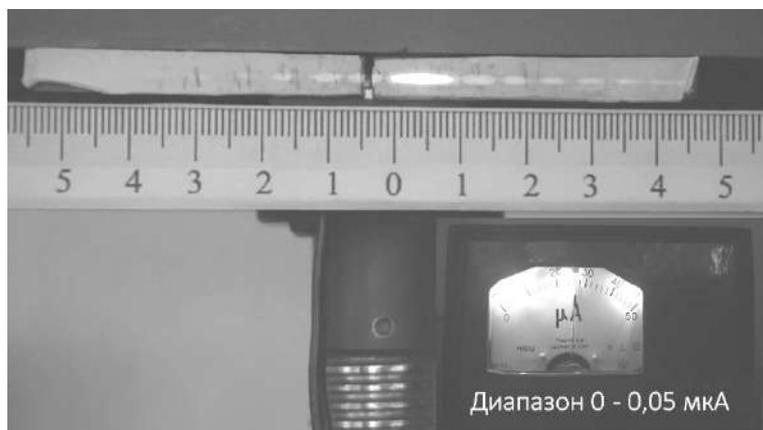
Данная работа состоит из двух частей. В первой части студенту необходимо менять положение фотоприёмника с помощью специального винта определить интенсивности первых трёх максимумов  $J_1, J_2, J_3$ , а также центрального  $J_0$ , затем проверить выполнение для них соотношения  $J_0 : J_1 : J_2 : J_3 = 1 : 0,045 : 0,016 : 0,008$ . Во второй части требуется проградуировать шкалу барабана, регулирующего ширину щели, используя положения минимумов дифракционной картины. Для этого при определённых значениях ширины щели на барабане измеряются расстояния между минимумами одного порядка  $x_m$  и вычисляется ширина щели  $b$  по формуле  $b = L \frac{2m\lambda}{x_m}$ , где  $m$  – порядок дифракционного минимума,  $\lambda = 633$  нм – длина волны света, испускаемого лазером.

На рис. 2 и 3 представлены кадры из видео версии лабораторной работы. Электронная версия представляет собой ролик, включающий в себя демонстрацию общего вида установки, всех измерительных приборов, с акцентированием внимания на их метрологических характеристиках, непосредственно процесс измерений.

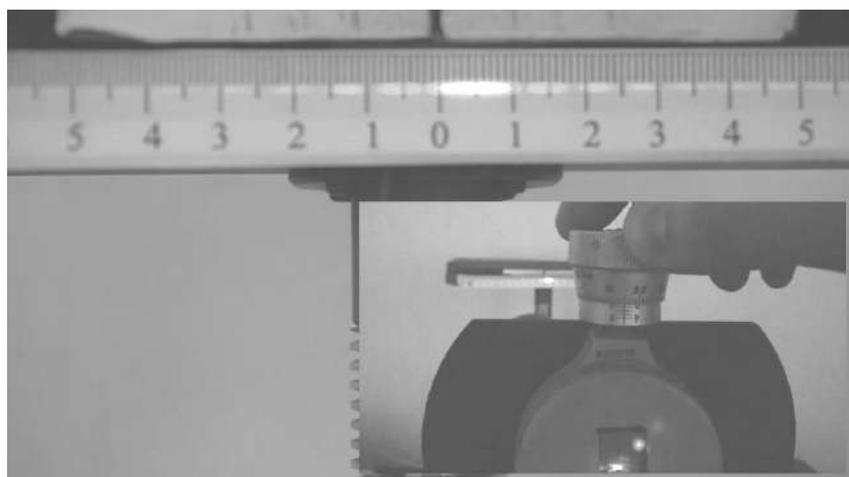
Некоторые детали, на которых стоило обратить внимание учащегося, описывались с помощью текстовых вставок.

Сложность для подготовки видеоряда с измерениями состояла в невозможности одновременного фиксирования двух измерительных приборов в одном кадре. По этой причине съёмка велась с использованием двух камер. Так, для процесса измерения интенсивностей максимумов камера на штативе была направлена на дифракционную картину, одновременно на камеру смартфона фиксировались показания микроамперметра. В конечном видео для электронной лабораторной работы эти два видеоряда были совмещены в режиме «картинка в картинке» и синхронизированы друг с другом на стадии монтажа. Аналогичным способом был отснят и смонтирован процесс измерений расстояний между минимумами одного порядка для различных значений ширины щели. В этом случае на одну камеру фиксировалась дифракционная картина, на вторую – барабан со шкалой, которым регулировалась ширина щели.

Таким образом, при выполнении работы у студента есть возможность наблюдать процесс изменения дифракционной картины по мере увеличения ширины щели, а не просто работать со статическими изображениями.



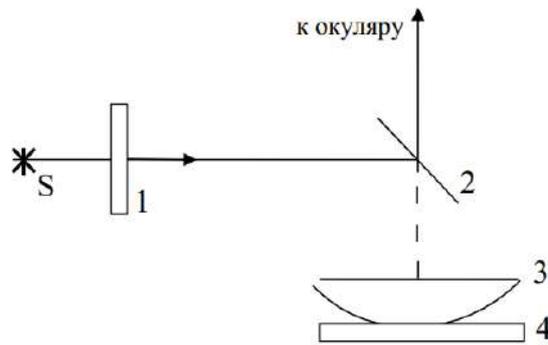
*Рис. 2.* Кадр процесса измерения интенсивностей максимумов дифракционной картины



*Рис. 3.* Кадр процесса измерения расстояний между минимумами дифракции одного порядка

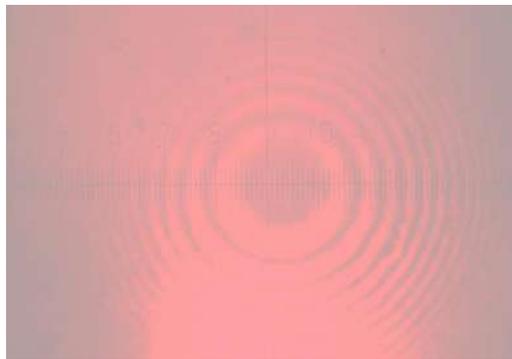
**Лабораторная работа «Определение радиуса кривизны линзы и показателя преломления воды при помощи колец Ньютона».** Цель работы заключается в изучении интерференции световых волн в тонких пленках. Для этого используется установка, схема которой приведена на рис. 4. В опыте исследуемая линза 3 и плоскопараллельная пластинка 4 вставлены в оправу и поджаты винтами. Свет от источника  $S$  пройдя светофильтр 1 преобразуется в монохроматический с длиной волны  $\lambda = 630$  нм. Лучи падают на прозрачную пластинку 2, отражаются от нее, затем отражаются от нижней грани линзы 3 и верхней грани пластинки 4 и интерферируют между собой. Интерференционная картина наблюдается в окуляр микроскопа [6]. В работе предлагается измерить радиусы  $r_m$  темных колец Ньютона, наблюдаемых при отражении света от соприкасающихся друг с другом плоскопараллельной пластинки и плосковыпуклой линзы. По измеренным значениям  $r_m$  определяется радиус кривизны линзы  $R$  из формулы

$$r_m = \sqrt{R\lambda \frac{(m-1)}{2}}, \text{ где } m \text{ – номер кольца.}$$



*Рис. 4.* Схема опыта с кольцами Ньютона

Электронная версия работы представляет собой набор фотографий, которые демонстрируют общий вид установки, стеклянную линзу, используемую в работе и непосредственно изображения колец Ньютона в окуляре микроскопа (рис. 5).



*Рис. 5.* Фото колец Ньютона, наблюдаемых в окуляре микроскопа

Студенту необходимо самостоятельно измерить радиусы колец в случае воздушного зазора между линзой и пластинкой, по ним определить радиус кривизны линзы. Далее измерения повторяются для случая заполнения зазора водой и определяется показатель преломления жидкости. Для съёмки использовалась полупрофессиональная камера с возможностью ручной фокусировки и штатив. Без данной аппаратуры получение качественных изображений крайне затруднительно. Заметим, что при подборе подходящих условий съёмки полученные снимки значительно упрощают выполнение измерений. Определение диаметров колец становится значительно проще, нежели при измерении непосредственно с микроскопа ввиду малости делений и сложности их подсчёта.

Таким образом, описанный нами способ реализации лабораторного практикума позволяет, хоть и не в полной мере, симитировать взаимодействие студента с реальным лабораторным оборудованием. Стоит отметить, что проведение лабораторного практикума в такой форме, имеет скорее больше минусов, нежели плюсов. К недостаткам относится прежде всего невозможность сформировать у студента навыки и умения работы с измерительными приборами без непосредственного контакта с ними, техническая сложность проведения фото и видео съёмки некоторых лабораторных работ. Так, для качественной съёмки описанных виртуальных лабораторных работ требуется наличие как минимум полупрофессиональной камеры и штатива, поскольку работы по темам «Интерференция» и «Дифракция» обычно проводятся в условиях затемнённого помещения.

В качестве заключения отметим, что описанные нами виртуальные работы являются результатом попытки наиболее качественного перевода в короткие сроки лабораторного

практикума в дистанционный формат в условиях фактического отсутствия возможности допустить обучающихся к оборудованию. По нашему мнению, нельзя полностью отказываться от практикума на реальном оборудовании.

Сочетание очной и дистанционной форм проведения занятий, когда лабораторные занятия проводятся в лаборатории университета, а остальные в электронной образовательной среде может быть эффективным при реализации существующих образовательных программ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Jeschofnig P. Effective laboratory experiences for distance learning science courses with self-contained laboratory kits [Электронный ресурс] // Proceedings of the 20th Annual Conference on Distance Teaching and Learning – 2004. – URL: (10.10.2020).
2. Драчёв К. А., Губин С. В. Виртуальные лабораторные работы по физике для студентов дистанционной формы обучения // The Scientific Heritage. № 44-1 (44). 2020. С. 9-12.
3. Насыров В. В., Хаин Д. С. Виртуальная лабораторная работа «Машина Атвуда» // Материалы научно-практической конференции: ТОГУ-Старт: фундаментальные и прикладные исследования молодых. Хабаровск. 2020. С. 69-74.
4. Алёшин М. С. Лабораторный практикум по оптике в условиях дистанционного обучения // The Scientific Heritage. № 48-3 (48). 2020. С. 50-53.
5. Михеенко А. В. Изучение дифракции света от одной щели: методические указания к лабораторной работе № 305 [Электронный ресурс]. – 2014 – URL: [http://pnu.edu.ru/media/filer\\_public/2013/04/03/lab305.pdf](http://pnu.edu.ru/media/filer_public/2013/04/03/lab305.pdf) (10.10.2020).
6. Швец Н. Л. Определение радиуса кривизны линзы и показателя преломления воды при помощи колец Ньютона: методические указания к выполнению лабораторной работы № 52ф [Электронный ресурс]. 2014. URL: [http://pnu.edu.ru/media/filer\\_public/a1/da/a1da1ad2-df0b-4e81-ac22-0e1e89855b8f/lab52.pdf](http://pnu.edu.ru/media/filer_public/a1/da/a1da1ad2-df0b-4e81-ac22-0e1e89855b8f/lab52.pdf) (10.10.2020).

УДК 004.4

## ПРИМЕНЕНИЕ EXCEL И MATLAB/SIMULINK В НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

**А. С. Герман, Д. О. Струков, Д. В. Фомин, Е. М. Веселова**

Амурский государственный университет, г. Благовещенск  
e-mail: [as-german97@yandex.ru](mailto:as-german97@yandex.ru)

*Рассмотрено использование пакета прикладных программ MATLAB/Simulink вместе с табличным процессором Microsoft Excel. На примере оформления лабораторной работы показаны основные принципы и механизмы взаимодействия. Предполагается, что показанный способ совместного использования данных программных продуктов будет полезен как в образовательной деятельности, так и в профессиональной практике научных сотрудников, инженеров и других специалистов.*

В современном мире информационные технологии стали неотъемлемой частью нашей жизни, они проникли практически во все сферы человеческой деятельности.

Образовательный процесс также претерпел изменения, и внедрение информационных технологий в учебную деятельность становится все обширнее.

Профессиональные продукты достаточно сложны в освоении, что вызывает определенные трудности при попытке их интеграции в учебную программу.

Широко распространенный среди студентов математических, инженерных и многих других направлений подготовки пакет прикладных программ MATLAB является мощным инструментом для решения широкого спектра теоретических и практических задач.

Однако, приведенные в [1] результаты опроса среди студентов-магистрантов показывают, что многие считают интерфейс MATLAB неудобным с точки зрения представления и хранения исходных и полученных данных, предпочитая ему Microsoft Excel. И действительно, кто занимался исследовательской работой, непременно сталкивались с проблемой хранения исходных и обработанных экспериментальных данных, зачастую используя для этих целей табличный процессор Microsoft Excel, при этом для обработки перенося данные из таблицы в MATLAB либо вручную, либо используя специальные встроенные функции чтения электронных таблиц Excel.

Существует иной способ, существование которого для многих остается неизвестным, о чем можно судить по крайней скудности наличия материалов в русскоязычном сегменте интернета.

Программное обеспечение *Spreadsheet Link* для Microsoft Excel позволяет управлять пакетом MATLAB прямо из электронной таблицы Excel или используя макрос на языке VBA (Visual Basic for Application). Данное решение представляет собой специальный модуль надстройки, устанавливаемый в Microsoft Excel. Подробную инструкцию по установке и основам работы можно найти на официальном сайте разработчиков MATLAB [2]. Отметим, что данное расширение поставляется вместе с основным пакетом MATLAB и не требует дополнительного приобретения и скачивания.

Получаемый конгломерат из табличного процессора Excel и пакета прикладных программ MATLAB обладает всеми достоинствами табличного представления данных первого и просто неописуемыми вычислительными возможностями второго.

После установки расширения в Excel станут доступны около двух десятков глобальных функций, которые можно использовать в формулах для ячеек таблицы либо в макросах. Функции позволяют переносить значения переменных из рабочей среды MATLAB в ячейки таблицы и наоборот, запускать функции MATLAB с записью результатов в ячейки таблицы и др.

Рассмотрим простой пример использования данных программных средств на примере лабораторной работы для студентов инженерных направлений: изучение влияния аддитивного белого шума и фазового шума на форму сигнального созвездия квадратурной амплитудной модуляции. За основу была взята модель для имитационного моделирования с официального сайта MATLAB [3].

В данном примере используется пакет Simulink, который является частью MATLAB и предоставляет гибкую среду модельно-ориентированного проектирования с большой библиотекой функциональных блоков, охватывающих огромный перечень решаемых задач из различных областей исследовательской и практической профессиональной деятельности.

Обмен данными между Excel и Simulink осуществляется посредством глобальных переменных рабочей среды MATLAB. Изменим данную модель следующим образом: параметры блоков, которые в дальнейшем необходимо изменять, зададим в виде имен переменных, а результаты моделирования запишем в переменные специальным блоком (*To Workspace*).

На рис. 1 представлена схема полученной модели в окне графического редактора Simulink.

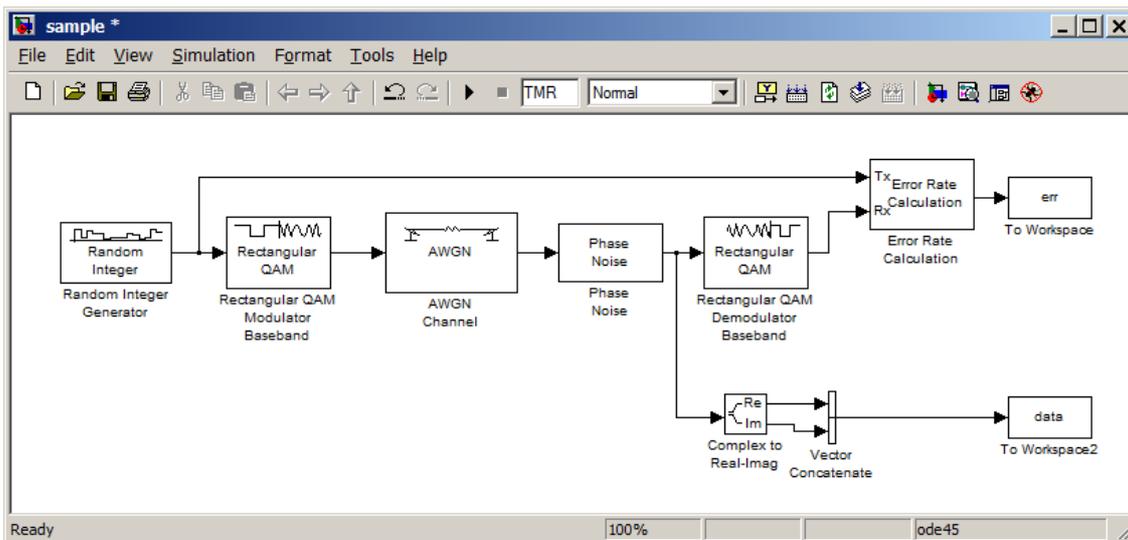


Рис. 1. Блок-схема модели

Далее в Excel с помощью функции *MLPutVar* перенесем значения из ячеек в переменные среды MATLAB, что позволит изменять настройки нашей модели. Функцией *MLGetMatrix* перенесем значения результатов моделирования из MATLAB на лист электронной таблицы. Последним этапом является запуск процесса симуляции, для чего с помощью команды *matlabfcn* в Excel необходимо вызвать функцию MATLAB *sim* с аргументом расположения модели для симуляции в формате *.mdl*. Например, *matlabfcn("sim"; "C:\model.mdl")*. Отметим, что при таком вызове симуляция модели будет проходить в фоновом режиме без отображения палитры компонентов и графической рабочей среды Simulink, в случае наличия в модели блоков графического вывода результатов в виде графиков, появится только окно графика, что довольно удобно.

На рис. 2 представлен пример оформления электронной таблицы для задания входных параметров модели и отображения результата моделирования средствами Excel.

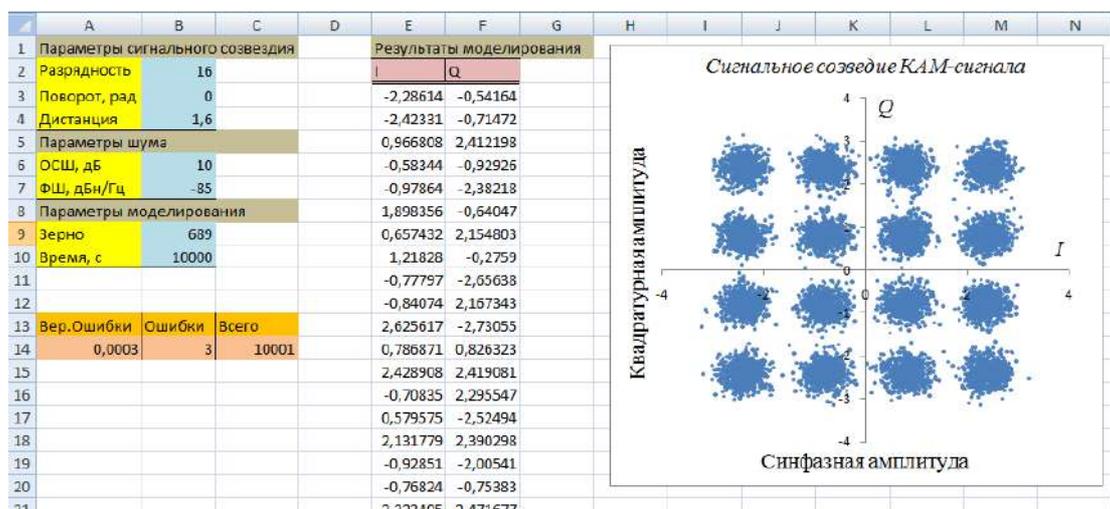


Рис. 2. Пример оформления электронной таблицы

Как можно видеть, использование функционала MATLAB/Simulink в таблицах Excel никак не изменяет их внешний вид и принципы работы с ними. Обновление расчетов

производится обновлением ячеек, содержащих соответствующие функции, для удобства можно использовать сочетание горячих клавиш *Ctrl+Alt+F9*, обновляющее весь активный лист, что приводит к пересчету модели и выводу новых данных. Для более сложных сценариев рекомендуется использование макросов с привязкой к кнопочным элементам управления.

Оформленные таким образом лабораторные работы позволяют исключить взаимодействие пользователя с интерфейсом MATLAB, что позволяет использовать их в образовательных дисциплинах, не предполагающих к моменту их проведения знания студентами основ работы с пакетами MATLAB и Simulink. В виду того, что изучение табличного процессора Microsoft Excel включается в школьную образовательную программу, на основе таблиц Excel с использованием функционала MATLAB могут быть разработаны лабораторные работы для многих школьных дисциплин.

Связка Excel и MATLAB/Simulink может быть также полезна научным сотрудникам, имеющих дело с обработкой большого количества однотипных данных, инженерам для быстрого расчета типовых задач, и многим другим.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Меженная Н. М. Об использовании систем компьютерной алгебры и Microsoft Excel магистрантами инженерного направления подготовки // Вестн. Том. гос. ун-та. 2019. №442. С.167-179.
2. Help Center: Integrating Excel and MATLAB. URL: <https://www.mathworks.com/help/exlink/add-in-setup-1.html> (дата обращения: 10.10.2020).
3. Help Center: Examine 256-QAM Using Simulink. – Режим доступа: [https://www.mathworks.com/help/comm/gs/examine\\_256\\_qam\\_using\\_simulink.html](https://www.mathworks.com/help/comm/gs/examine_256_qam_using_simulink.html) (дата обращения: 10.10.2020).

УДК 373.5.016

## ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ РАБОЧИХ ТЕТРАДЕЙ ПО ФИЗИКЕ В СОВРЕМЕННОМ ОБРАЗОВАНИИ

**Л. В. Горбанева, Л. Ю. Актанко**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [009608@pnu.edu.ru](mailto:009608@pnu.edu.ru)

*Рабочие тетради улучшают учебный процесс, а главное, позволяют сохранить мотивацию, заинтересованность школьников. В статье рассматривается возможность использования виртуальных рабочих тетрадей по физике их преимущества перед традиционными печатными, а также отмечаются ряд недостатков.*

В современном образовательном процессе важную роль занимает не только учебное пособие, но и рабочая тетрадь, так как они вместе составляют учебно-методический комплекс и значительно повышают качество усвоения учебного материала. Одной из ключевых целей концепции федеральных государственных образовательных стандартов второго поколения является развитие универсальных учебных действий школьника, овладение которыми создает возможность самостоятельного успешного усвоения новых знаний, умений и компетентностей учащимися в рамках конкретного учебного предмета. Оце-

нить уровень сформированности универсальных учебных действий, приобретенных обучающимися компетенций, работающих на достижение метапредметных результатов, возможно с помощью рабочей тетради учащегося.

Рабочая тетрадь относится к учебным изданиям нового поколения и должна рассматриваться как отдельная категория учебных пособий. Тем более, что невозможно временно использовать тетрадь, которая подразумевает индивидуальное выполнение обучающимися заданий непосредственно на страницах пособия.

Исключить рабочую тетрадь из образовательного процесса мы не можем, так как она играет очень важную роль в усвоении учебного материала. Как говорила Людмила Вербицкая, Президент РАО, академик РАО, Председатель федерального УМО по общему образованию: «Исключение рабочей тетради из учебного процесса ставит под угрозу достижение поставленных в образовательной программе целей формирования компетентного, мыслящего, креативного, способного решать нестандартные задачи молодого человека».

На данный момент существует огромное количество рабочих тетрадей к каждому учебнику по физике, но при использовании их в учебном процессе возникают следующие проблемы:

- не весь материал рабочих тетрадей используется во время учебного года или не используются вовсе, так как не хватает времени учителя на их проверку;
- в тетрадях различных УМК есть много интересных задач, но невозможно же ученику купить все тетради, а включить их все в общую тетрадь не целесообразно из-за получаемого объема;
- используя стандартные тетради учителю сложно использовать дифференцированный подход к учащимся;
- не все родители могут себе позволить ежегодно покупать несколько рабочих тетрадей по различным предметам, а школы не обязаны обеспечивать учеников рабочими тетрадями наряду с учебниками. Они лишь вправе это сделать при наличии запроса и соответствующих сумм в бюджете.

Проблемы обычных печатных тетрадей могут решить виртуальные рабочие тетради. Виртуальная электронная тетрадь по предмету – это модель интерактивного электронного образовательного ресурса для использования в учебном процессе. Данная тетрадь также является учебным пособием, которое имеет свой дидактический аппарат, способствующий самостоятельной работе учащихся над усвоением учебного материала.

Виртуальные рабочие тетради предназначены для:

- Активизации самостоятельной работы учащихся в процессе усвоения ими теоретического и практического материала при выполнении заданий.
- Расширения знаний учащихся по предмету, за счет большого количества задач разного характера, а также упражнений, тестов, графических задач и задач рисунков, направленных на формирование у учащихся критического и творческого мышления.
- Формирование у учащихся аргументировать свой выбор.

Виртуальные рабочие тетради отвечают всем требованиям обычной рабочей тетради, но имеют ряд преимуществ перед ней:

- Они доступны для учащихся, так как для пользования ими нужен лишь доступ в интернет. Доступ к образовательной платформе, на которой находится виртуальная рабочая тетрадь, может осуществляться как через компьютер, так и через телефон.
- Электронную рабочую тетрадь можно наполнить любыми задачами, из различных сборников. Учитель может в любой момент времени дополнить ее необходимыми ресурсами.
- Учащиеся могут выполнять задания и прикреплять их на сайт в любое удобное для них время, так как тетрадь находится на интернет площадке.

- Учителя могут проверять задания в любое удобное для них время и мгновенно давать обратную связь ученикам по выполнению заданий.

- Учителя могут организовать индивидуальный подход к учащимся, так как есть возможность в любой момент изменить задания или добавить новые.

Но, несмотря на все преимущества, виртуальная рабочая тетрадь имеет и ряд недостатков:

- Общий минус на данный момент всех существующих тетрадей заключается в том, что в данных ресурсах сложная настройка образовательной среды, недоработанные системы регистрации и коммуникации с учениками.

- Непонятный интерфейс для работы затруднит выполнение заданий и может вызвать нежелание учеников работать в данной среде.

- Возникновение технических неполадок на сайте.

- Не у всех учеников есть возможность выйти интернет.

- Отсутствие необходимой технической базы (компьютера, ноутбука или телефона).

В современном образовании использование рабочей тетради очень важно. Так как она является не только одним из компонентов УМК, но и способствует углублению знаний ученика, так как содержит в себе дополнительный материал, не вошедший в учебник. С помощью рабочей тетради ученик закрепляет полученные на уроке знания, учится критически мыслить.

Несмотря на все имеющиеся недостатки, использование виртуальной рабочей тетради актуально на сегодняшний день. Электронный вариант тетради более динамичен, так как позволяет использовать быстрое обновление, дополнение и замену информации.

Данная тетрадь может содержать различные задания, составленные исходя из программы учебной дисциплины и уровня подготовленности обучающихся.

Задания в таких тетрадях могут содержать различные формы контроля (тесты, самостоятельные работы, карточки заданий и т.д.), помогая обучающимся всесторонне подготовиться к предмету. В тетрадь можно включить теоретический материал, справочные материалы, примеры решения и оформления задач, что поможет ученикам актуализировать пройденный материал и поможет в решении задач разного типа.

Также обучающийся сможет восстановить в памяти алгоритм выполнения и оформления подобного рода заданий. В тетрадь также можно включить практические задания, которые можно выполнить в домашних условиях и ссылки на дополнительные ресурсы (исторические справки, интересные видеоролики и т.д.).

Учитель может использовать виртуальную рабочую тетрадь не только как форму самостоятельной работы учащихся, но и активно включать работу с электронной рабочей тетрадью непосредственно на уроках.

Для учителей тетрадь с уже подобранными заданиями сможет стать незаменимым помощником и сэкономить время на подготовку к занятиям. На уроке сокращается время выполнения заданий, что позволяет дополнительно проработать материал с учениками.

Для подготовки к экзаменам ВПР, ОГЭ и ЕГЭ такие тетради (например, «Физика. ЕГЭ.

Тренировочные работы» или «ВПР. Физика. Тренировочные работы») дают возможность потренироваться на заданиях, которые составлены в соответствии со всеми требованиями федерального стандарта и имеют структуру (форму и количество заданий, уровень сложности), аналогичную предстоящему испытанию.

Таким образом, использование электронных тетрадей в учебном процессе меняет характер взаимодействия учителя и ученика. Ученик сам становится активным участником образовательного процесса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методические рекомендации к разработке рабочей тетради [Электронный ресурс] // URL: <http://www.cnao72.ru/wp-content/uploads/2016/10/требования-к-рабочей-тетради.pdf> (дата обращения 12.10.2020).
2. Официальное письмо Российской академии образования [Электронный ресурс] // URL: <https://rosuchebnik.ru/material/kto-pokupaet-rabochie-tetradi-v-shkolu/> (дата обращения 12.10.2020).
2. Рабочая тетрадь [Электронный ресурс] // URL: [https://official.academic.ru/20630/Рабочая\\_тетрадь](https://official.academic.ru/20630/Рабочая_тетрадь) (дата обращения 13.10.2020).
3. Тунцева А. Ю. Виртуальная электронная тетрадь как средство активизации познавательной деятельности учащихся // Теория и практика образования в современном мире: материалы VI Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, декабрь 2014 г.). Санкт-Петербург: Заневская площадь, 2014. С. 376-378. URL: <https://moluch.ru/conf/ped/archive/145/6361/> (дата обращения 01.10.2020).

УДК 373.5.016

### МЕТОДИКА ПОДГОТОВКИ ОГЭ ПО ФИЗИКЕ С ПОМОЩЬЮ ВНЕУРОЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

**Л. В. Горбанева, К. В. Книга**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [kseniia\\_vladimirovna@mail.ru](mailto:kseniia_vladimirovna@mail.ru)

*В статье на основе статистики выполнения заданий ОГЭ по физике и методических рекомендаций для учителей проводится анализ проблем, возникающих при решении задач ОГЭ. Для обеспечения повышения качества подготовки учащихся к ОГЭ сделана попытка дать рекомендации по подготовке школьников к ОГЭ. Кроме этого в статье рассматриваются основные затруднения, которые учащиеся испытывают при решении некоторых заданий и способы их преодоления.*

Государственная итоговая аттестация (ГИА) с 2004 в России проводится ежегодно для учащихся девятых классов. Изначально она носила экспериментальный характер, но постепенно стала обязательной и, на данный момент, является средством контроля уровня знаний учащихся и соответствия образования, получаемого в школе, Федеральному государственному образовательному стандарту (ФГОС), служит испытанием при приеме в учреждения среднего профессионального образования, получив новое название – основной государственный экзамен (ОГЭ).

В целях более успешной сдачи учащимися девятых классов ОГЭ по физике и реализации требований ФГОС появляются и совершенствуются разнообразные методики, методы и технологии обучения физике.

Просмотрев статистику по сдаче ОГЭ по физике в Хабаровском крае 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 и 2019 годов [1] можно отметить следующие моменты (табл. 1). С каждым годом все больше учащихся сдавали физику, при этом средний оценочный балл снизился, что даёт нам право сделать вывод о необходимости подготовки к ОГЭ в учебном заведении.

Таблица 1

## Сравнение различных параметров ОГЭ по физике

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Число участников ОГЭ по физике	787	756	1960	1655	1770	1734
Средний оценочный балл	3,87	3,87	3,37	3,69	3,66	3,68
Процент качества	7,5	71,03	38,98	57,46	53,95	56,23
Количество участников, набравших максимальный балл	1	1	1	0	2	1

Результативность сдачи ОГЭ во многом определяется тем, насколько эффективно организован процесс подготовки на всех ступенях обучения, со всеми категориями обучающихся. Именно поэтому в современном образовании актуальной стала проблема подготовки школьников к ГИА в форме ОГЭ. Основная работа осуществляется во внеурочное время: повторяется весь материал, разбираются задания по каждой теме разного уровня сложности и только затем контрольно-измерительными материалами. Для успешной деятельности необходимо составление программы действий.

Разработанный нами курс состоит из 72 часов (2 часа в неделю).

Основные задачи курса:

- систематизация и обобщение теоретических знаний по основным темам курса;
- формирование умений решать задачи разной степени сложности;
- усвоение стандартных алгоритмов решения физических задач в типичных ситуациях и в изменённых или новых;
- формирование у школьников умений и навыков планировать эксперимент, отбирать приборы, собирать установки для выполнения эксперимента;
- повышение интереса к изучению физики.

Прежде всего, необходимо познакомить учащихся с процедурой проведения обязательного государственного экзамена по физике, чтобы участники экзамена понимали смысл предлагаемых заданий и владели методами их выполнения, умели правильно оформить результаты выполненных заданий, рационально распределять время экзамена, иметь собственную оценку своих достижений в изучении физики. Всю необходимую информацию можно взять на сайте «Федеральный институт педагогических измерений» в разделе ОГЭ [2].

Первым и важным пунктом является входной контроль. Входной контроль должен состоять из заданий, основанных на пройденной теории и иметь вид ответов, используемых в ОГЭ (с кратким ответом в виде одной цифры или числа, набора цифр (на соответствие и множественный выбор) и развёрнутым ответом). По результатам тестирования можно подкорректировать дальнейшую работу по остаточным знаниям учеников и определить на какие темы стоит обратить особое внимание.

Для систематизации и обобщения теоретических знаний по основным темам курса можно использовать сборники Марон А.Е. «Физика. 7 кл. Опорные конспекты и разноуровневые задания» [3], «Физика. 8 кл. Опорные конспекты и разноуровневые задания» [4], Марон Е.А. «Физика. 9 кл. Опорные конспекты и разноуровневые задания» [5]. Пособия содержат комплект опорных конспектов и разноуровневых заданий, составленных в соответствии с действующими учебниками физики и с федеральным государственным образовательным стандартом. Опорные конспекты в виде схематических блоков учебной информации (формул, рисунков, символов и т.д.) охватывают все основные темы курса физики 7, 8 и 9 классов и представляют собой целостную структуру.

Большое количество времени нужно уделить заданиям с развёрнутым ответом, так как учащихся нужно обучить (или повторить) не только решением самих задач, но и стандартам предъявляемым к выполнению и оформлению данных задач. А также они

представлены только в повышенном и высоком уровне, что не только делает их выполнение более трудным, но и даёт возможность получить более высокий итоговый результат, так как оцениваются данные задания до 4 баллов.

Большим положительным аспектом является возможность уделять больше времени тем темам, которые вызывают затруднения у учеников, чаще всего ими являются задания требующие развернутого ответа. Для этого анализируются работы учащихся, при самостоятельном решении или во время консультации, выделяются проблемные задания, для решения данной проблемы вместе с учениками выполняются аналогичные задания (по теме и типу).

Также в статистике за 2017-2019 года приведены в процентном соотношении количество верных ответов, они позволяют преподавателю разбирать самые сложные задания для учеников и выбрать на каких моментах им стоит уделить больше внимания. Перед составлением плана действий и перечня решаемых совместно с учащимися задач важно проанализировать контрольно-измерительные материалы и выявить подводные камни некоторых из них. Наиболее яркие замечания представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные затруднения в заданиях ОГЭ по физике

Задание № 7	Это расчетная задача на механические явления. Вопрос повышенного уровня сложности. Оценивается в один балл. Здесь нужно произвести расчет в два действия, а не просто подставить имеющиеся данные в формулу.
Задание № 10	Расчетная задача на тепловые явления. В условии представлен график зависимости температуры $t$ твердого тела от полученного им количества теплоты $Q$ . Для подготовки к данному типу заданий необходимо тренироваться работать с графиками. Их часто дают в задачах на расчет количества теплоты.
Задание № 16	Расчетная задача на электромагнитные явления. Здесь нужно знать формулу для КПД и формулу для электрической мощности. Обратите внимание на единицы измерения. Например, в демоверсии в этой задаче ответ надо дать в киловаттах, а не в ваттах. Часто школьники считают все правильно, а в ответе пишут не то, что требуется.
Задание № 19	Задача на физические явления и законы, понимание и анализ экспериментальных данных, представленных в виде таблицы, графика или рисунка. Оценивается в два балла. С одной стороны, здесь нужно знать свойства силы трения/скольжения. Она не зависит от скорости и пропорциональна реакции опоры. С другой стороны, необходимо понять, что именно следует из представленного эксперимента. Не должно произойти смешение следствий эксперимента и теории. С этим возникают сложности, поскольку лабораторных работ в школах ребята проводят мало.
Задание № 22	Вопрос на применение информации из текста физического содержания. На него надо потратить немало времени, это единственная сложность. В этом задании девятикласснику предлагается текст, нужно его прочитать, осмыслить и найти ответ на поставленный вопрос. Как правило, в тексте всегда есть ответ на вопрос.
Задание № 23	Экспериментальное задание на механические и электромагнитные явления. Оценивается в четыре балла. Надо собрать экспериментальную установку и выполнить измерения. Здесь нужно продемонстрировать свои умения по теории и умение работать с приборами, то есть показать знания в комплексе. Именно поэтому эта задача оценивается на экзамене выше всех.
Задание № 24	Качественная задача на механические, тепловые или электромагнитные явления. Здесь требуется анализ предлагаемого явления на качественном уровне с упоминанием физических законов и явлений. В рамках одной задачи может встречаться несколько тем. Сами формулы, которые нужно применить, простые, но их нужно соединить из разных тем.
Задания № 25, 26	Расчетные задачи на механические, тепловые, электромагнитные явления, каждая из которых оценивается в три балла. Имейте в виду, что правильно записанное условие задачи плюс законы, необходимые для решения, уже дают один балл. Поэтому даже если не знаешь, как решать задачу, есть шанс получить балл за нее.

Отрабатывать следует в первую очередь решение задач ОГЭ прошлых лет, так как чем больше у них опыта, тем меньше возможных ошибок на экзамене.

Эта работа даёт возможность научиться логическим рассуждениям при решении задач и освоить основные приемы их решения.

При изучении лабораторных работ учащимся нужно объяснить не только правильное оформление, но и обратить внимание на правильное выполнение самой лабораторной работы, так как от этого зависят результаты опыта.

Кроме всего выше сказанного при отработке выполнения экспериментальных заданий, следует обратить внимания учащихся на формулировку заданий и требования к ней.

В этих заданиях нет необходимости описывать весь ход своих действий. Важно правильно составить ответы на задания, которые сформулированы.

Таким образом, для обеспечения повышения качества подготовки учащихся к ОГЭ необходимо осуществлять выбор содержания и способов обучения; повышение сложности учебного материала; поддержка индивидуального развития учащихся; сотрудничество учителя, ученика, родителей.

Необходимо активизирующее воздействие на обучаемых, систематическое убеждение их в том, что лишь при наличии активной позиции при изучении предмета, при условии приобретения практических умений и навыков и их реального использования и, конечно, самостоятельной подготовки обучающихся, можно рассчитывать на высокие баллы на ОГЭ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Краевое государственное казенное учреждение «Региональный центр оценки качества образования» КГКУ РЦОКО [Электронный ресурс] // URL: <http://rcoko.khb.ru/gia-9/stat-gia> (дата обращения 12.10.2020).
2. Федеральный институт педагогических измерений // URL: <http://fipi.ru/oge-i-gve-9> (дата обращения 12.10.2020).
3. Марон Е. А. Опорные конспекты и разноуровневые задания. К учебнику для общеобразовательных учебных заведений А. В. Перышкин «Физика. 7 класс. СПб.: ООО «Виктория плюс», 2016. 96с.
4. Марон Е. А. Опорные конспекты и разноуровневые задания. К учебнику для общеобразовательных учебных заведений. А. В. Перышкин «Физика. 8 класс». СПб.: ООО «Виктория плюс», 2018. 96с.
5. Марон Е. А. Опорные конспекты и разноуровневые задания. К учебнику для общеобразовательных учебных заведений А. В. Перышкин «Физика. 8 класс». СПб.: ООО «Виктория плюс», 2010. 64с.
6. Советы эксперта: Как сдать ОГЭ по физике <https://www.ucheba.ru/article/6085#>
7. Шаповал В. В., Митрофанов К. Г., Саплина Е. В. Правила и приёмы успешной сдачи экзаменов. М., 2004.
8. СДАМ ГИА: РЕШУ ОГЭ Образовательный портал для подготовки к экзаменам Физик [Электронный ресурс] // URL: <https://phys-oge.sdangia.ru/manual> (дата обращения 12.10. 2020).

## НАТУРНЫЕ И ВИРТУАЛЬНЫЕ ОПЫТЫ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ В ШКОЛЬНОМ КУРСЕ ФИЗИКИ

**Л. В. Горбанева, М. А. Сон**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [009608@pnu.edu.ru](mailto:009608@pnu.edu.ru)

*В школьной программе при изучении раздела физики «Оптика» в 11 классе предусмотрено выполнение лабораторных работ. Программа предусматривает в первую очередь натурные лабораторные работы, однако не исключено использование и виртуальных лабораторных работ, которые представляют компьютерные модели для непрямого взаимодействия пользователями. Лабораторные работы, которые учащиеся выполняют, используя оборудование для лабораторных работ по физике (натурные лабораторные работы) традиционны в школьной практике. Виртуальные лабораторные работы – работы, выполняемые с помощью компьютерных программ, используются в школьной практике относительно недавно. В статье рассматривается применение натуральных и виртуальных лабораторных работ в курсе физики 11 класса.*

Относительно недавно представилась возможность для широкого применения в образовательных учреждениях виртуальных лабораторных работ.

Для этого в школах применяются компьютерные классы, на которых предустановлено специализированное программное обеспечение. В настоящее время поднимается вопрос о целесообразности применения виртуальных физических экспериментов в образовательном процессе, и в тоже время существуют проблемы в использовании и наличии в открытом доступе программного обеспечения.

Виртуальные лабораторные работы – лабораторные работы, для выполнения которых требуются компьютерные программы, позволяющие выполнять эксперименты и получать результаты, без непосредственного использования реальных лабораторных установок и приборов.

Натурные лабораторные работы – это работы, в которых ученики сами воспроизводят и наблюдают физические явления или проводят измерения физических величин, пользуясь при этом специальным (лабораторным) оборудованием.

Виртуальные лабораторные работы можно разделить на виды, исходя из возможностей, которые предоставляются программой.

### **1. Интерактивные демонстрации.**

В основном данный вид не является компьютерными лабораторными работами, так как отсутствует интерактивность, однако успешно выполняет функцию демонстрации проведения эксперимента.

Могут быть как статическими, анимационными или видео демонстрациями.

- 1.1. Видео интерактивные демонстрации.
- 1.2. Анимационные интерактивные демонстрации.
- 1.3. Моделируемые интерактивные демонстрации.

### **2. Простые модели.**

Представляет собой модель одной лабораторной работы, где имеется возможность записывать и обрабатывать результаты опыта в самом программном обеспечении.

### 3. Универсальные лаборатории.

Представляют собой сложные моделирующие системы, в основе которых заложен мощный математический аппарат, дающий возможности продвинутых средств вывода, обработки и хранения результатов моделирования, такие как таблицы, графики и формулы.

Использовать виртуальные лабораторные работы в образовательном процессе.

Раздел «Оптика» в 11 классе включает в себя следующие обязательные лабораторные работы:

1. Формирование изображения в линзе и строение человеческого глаза.
2. Изучение оптических приборов.
3. Применение законов отражения и преломления света стеклянной пластинки с помощью микроскопа.
4. Изучение интерференции света.
5. Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки.
6. Изучение дисперсии света.

В лабораторной работе «Формирование изображения в линзе и строение человеческого глаза» изучается прохождения света через тонкую линзу. Подобную работу несложно поставить в натуральном виде, работая фронтально с классом. Применяя данную виртуальную лабораторную работу, можно продемонстрировать прохождение света, как на интерактивной демонстрации, так и использовать более сложное программное обеспечение для расчетов значений фокусного расстояния и оптической силы линзы. В зависимости от технического и программного оснащения школы виртуальная лабораторная работа по первой теме «Формирование изображения в линзе» можно использовать как репетицию перед натурной лабораторной работой, как дополнение или как замену натурной работы.

В работе «Изучение оптических приборов» производится сборка моделей оптических приборов: лупы, микроскопа, зрительной трубы Кеплера (телескопа), зрительной трубы Галилея, а также экспериментальное определение их видимого увеличения и сравнение его с расчетным. Данную работу лучше провести в натурном виде, чтобы учащиеся могли лично заняться сборкой моделей, пронаблюдать разницу увеличения, а также зарисовали схемы расположения линз. В виртуальном эксперименте сложно найти интерактивные программы, где имеется возможность проделать данную лабораторную работу. В открытом доступе присутствуют лишь анимации и видео о структурах моделей, без практического значения.

В работе «Применение законов отражения и преломления света стеклянной пластинки с помощью микроскопа» учащиеся должны экспериментально определить абсолютные показатели преломления стекла для белого и монохроматического света. Благодаря натурному виду лабораторной работы ученик увидит отчетливое изображение штрих-метки, нанесенного на нижней поверхности пластинки, научится определять по значениям барабана микроскопа значение преломления среды. Виртуальная лабораторная работа, особенно интерактивные демонстрации, не смогут дать практические навыки, которые присутствуют в натурной лабораторной работе.

Изучение интерференции света на примере схемы Юнга возможно при выполнении работы «Изучение интерференции света».

В этой работе строятся интерференционные картины для разных длин волн, изучается сдвиг интерференционной картины при помещении за одной из щелей прозрачной пластинки, т. е., по сути дела, рассматривается принцип работы двулучевого интерферометра (типа интерферометра Релея), предназначенного для точного измерения показателя преломления. Даже при наличии натурального интерферометра Релея «виртуальная» работа более полезна, т.к. в ней изучается сам принцип измерения показателя преломления.

В лабораторной работе «Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки» рассматривается применение дифракционной решетки в качестве спектрального прибора. При пропускании через решетку света, содержащего несколько длин волн, образуется линейчатый дифракционный спектр из соответствующего числа спектральных линий. Длины волн этих линий можно экспериментально определить, измеряя углы дифракции для этих линий и зная период решетки. Для иллюстрации на экране строится сплошной дифракционный спектр для белого света при различных периодах решетки.

В лабораторной работе «Изучение дисперсии света» изучается дисперсия света и измеряется показатель преломления вещества призмы по углу наименьшего отклонения лучей этой призмой. Если свет содержит в своем составе излучение нескольких длин волн, то каждая компонента световой волны отклонится на свой угол, и поэтому волны с разной длиной волны окажутся пространственно разделенными. Это позволяет изучить зависимость показателя преломления от длины волны.

К последним двум лабораторным работам проблематично найти программный продукт для проведения комплексной работы. Присутствуют лишь интерактивные демонстрации, но не виртуальные лаборатории, которые могли бы продемонстрировать, как и от чего изменяются значения при получении иных показателей.

Одной из особенностей лабораторных работ из раздела «Оптика» является то, что во многих лабораторных работах учащимся предлагается построить экспериментальный график зависимости от физических параметров измеряемой физической величины. Для этой цели необходима миллиметровая бумага. Кроме того, учащиеся должны быть знакомы с общими правилами построения графиков.

В программных модулях принципиально не предусмотрено абсолютно никакой автоматической обработки результатов измерений, поскольку одной из задач физического практикума является обучение учащихся умению обрабатывать результаты измерений. Например, учащийся самостоятельно использует программы построения таблиц и рисования графиков (Microsoft Excel).

Лабораторные работы в среднем рассчитаны на 2 часа непосредственной работы каждая, включая основные расчеты и рисование графиков. Теория лабораторной работы должна тщательно изучаться учащимися заранее, иначе они не успеют выполнить сами измерения и, тем более, провести необходимые вычисления. Однако некоторые лабораторные работы даже в этом случае могут оказаться слишком «длинными» для школьников. В принципе, многие работы допускают выполнение не всех предусмотренных измерений, а только некоторых из них. Во многих работах в разделе «ход работы» при описании какого-либо упражнения стоит пометка «по указанию преподавателя», которая означает, что данное упражнение при наличии времени можно выполнять, а при его отсутствии – не выполнять.

**Заключение.** В ходе исследования были рассмотрены виртуальные и натурные лабораторные работы. Большинство лабораторных работ не являются компьютерными аналогами экспериментов, которые можно осуществить реально, а являются мысленными модельными экспериментами. Все лабораторные работы из раздела «Оптика» могут быть поставлены в натуральном виде при наличии соответствующих измерительных приборов и источников света типа газоразрядных ламп.

Натурные демонстрационные и лабораторные эксперименты совершенно необходимы для изучения физики. При этом компьютерные работы не являются альтернативой реальным, а дополняют их, позволяя изучать при помощи интерактивных моделей недоступные или труднодоступные для реальных опытов явления. При этом благодаря визуализации компьютерные работы обладают большей степенью наглядности.

Также не стоит забывать о том, что виртуальные лабораторные работы и другие средства ИКТ способствуют привлечению заинтересованности учащихся к образователь-

ному процессу по сравнению с традиционной формой ведения урока. Использование таких программных продуктов позволяет сэкономить время для дополнительного объяснения материала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуразаков М. М. К вопросу о внедрении и развитии современных информационных и телекоммуникационных средств в учебном процессе // Стандарты и мониторинг в образовании. 2012. № 2. С.26-30.
2. Ахутин А. В. Эксперимент и природа. Санкт-Петербург: Наука, 2012. 659 с.
3. Генденштейн Л. Э., Орлов В. А. Физика. Тетрадь для лабораторных работ. 11 класс: учебное пособие для учащихся общеобразовательных организаций //Базовый уровень. Издание: Мнемозина, 2012.
4. Кавтрев А. Ф. Компьютерные модели в школьном курсе физики //Компьютерные инструменты в образовании. М., 1998. № 2. С.40-47.
5. Оспенникова Е. В. Использование ИКТ в преподавании физики в средней общеобразовательной школе: методическое пособие. М.: Издательство БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 655с.
6. Новые педагогические и информационные технологии в системе образования //Под ред. Е. С. Полат. М.: АСАДЕМА, 2000.
7. Физика 11: учебник для общеобразовательных организации: базовый и углубленный уровни /Г. Я. Мякишев Б. Б. Буховцев, В. М. Чаругин; под редакцией Н. А. Парфентьевой. М.: Просвещение, 2013. 432 с.
8. Чепан М.-Л.А., Бугаева Н. М. Проблемы обеспечения валидности эксперимента в условиях виртуальной среды // Экспериментальный метод в структуре психологического знания. М., 2012. С. 82-86.

УДК 378.018.43

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРЕПОДАВАНИИ ФИЗИКИ В 10-11 КЛАССАХ

**Н. А. Дейнекина, О. В. Кравченко**

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск  
e-mail: [ndeyka@mail.ru](mailto:ndeyka@mail.ru), [kob61-61@mail.ru](mailto:kob61-61@mail.ru)

*В статье рассмотрены вопросы дистанционного обучения физики в программе ZOOM и возможности проведения занятий для студентов.*

Современные условия пандемии 2020 года заставили все школы страны перейти на дистанционное обучение. Дистанционное обучение – это разговор или обмен информацией между обучающимися и преподавателем с использованием интернет технологий [1,2].

Использование дистанционных технологий закреплено Законом «Об образовании в Российской Федерации» и Приказом Министерства образования и науки России «Об утверждении порядка применения организациями, осуществляющими образовательную деятельность электронного обучения, дистанционных образовательных технологий при реализации образовательных программ» путем их внедрения в образовательный процесс для всех форм получения образования [3].

Несколько лет назад мы не могли представить, что можно вести занятия на расстоянии, т. е. дистанционно. Развитие современных технологий позволяет нам это сделать с помощью интернет технологий. Сегодня все студенты и школьники используют интернет технологии для своего образования.

Настоящие реалии заставили всех учителей проводить дистанционные занятия по предметам как в высшей школе, так и средней образовательной. Дистанционное обучение строится по тем же принципам, что и очное обучение. Такой вид образования отличается от очного только формой передачи информации, формой взаимодействия между преподавателем и школьником. Основные дидактические принципы дистанционного образования такие же, как и у обычного, но передача информации осуществляется через чаты, форумы, почту, видеоконференции.

Дистанционные способы обучения широко использовались для заочного обучения, т.к. не у всех студентов была возможность приезжать на сессии или выполнять тестирование по предмету.

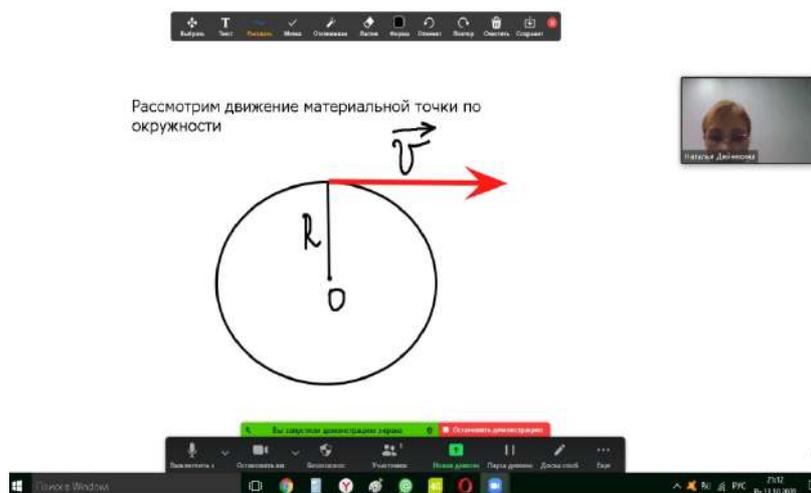
Если при заочной формой обучения часть материала осваивалась самостоятельно, т.е. без участия преподавателя, и только на сессии они могли встретиться, то при дистанционном обучении студенты могут находиться в постоянном общении с педагогом (консультации по интернету, лекции и семинары в режиме online) на расстоянии.

С помощью дистанционного обучения можно подготовить школьников к поступлению в ВУЗ, т.е. подготовить их к сдаче ЕГЭ; помочь учащимся углубленно изучить темы из школьной программы или темы вне школьного курса; помочь ликвидировать пробелы в знаниях, умениях, навыках по некоторым предметам школьного цикла.

Самым большим преимуществом дистанционного обучения является то, что учащиеся получают доступ к многочисленным средствам обучения за минимальные ресурсы. Обучение может происходить с помощью программных продуктов: Free Conference Call, ZOOM, Discord и т.д.

ZOOM – это интерактивная платформа для проведения онлайн занятий и видеоконференций для дистанционного обучения. Эта программа подходит как для индивидуальных занятий, так и групповых. Заходить в ZOOM можно как с компьютера, так и с телефона. Занятие можно запланировать в определенное время и эту ссылку передать всем школьникам, присутствующим на этих занятиях. Эта программа обладает большими преимуществами: во-первых – это видео и аудио связь со всеми учащимся, а у учителя есть возможность включать и выключать микрофон, как у себя, так и у присутствующих на занятиях школьников; во-вторых, показывая презентацию на экране, можно поставить на паузу и прокомментировать то, что на экране; в-третьих - в платформу встроена интерактивная доска, на которой можно демонстрировать рисунки с расстановкой сил, писать формулы, делать рисунки и т.д. (рис.).

Занятия в дистанционной форме каждый учитель может строить на своей методике. Лекцию учитель представить может либо в виде презентации, и при этом комментировать слайды, а может использовать интерактивную доску. При проведении практических занятий ведущую роль играет все-таки доска, на которой можно показать примеры решения задач и разобрать теоретические вопросы. Лабораторные работы тоже можно демонстрировать на экране в виде фильма или действующей модели. Во время занятия учитель может общаться со студентами и обсуждать результаты лабораторных работ. Платформой ZOOM можно воспользоваться при проведении итоговой аттестации или в виде тестов, или в виде индивидуальной беседы со студентами, подключая только одного из присутствующих школьников, отключая всех остальных.



Пример окна ZOOM

Дистанционное обучение физики в 10-11 классах средней общеобразовательной школы достаточно сложный процесс. Школьники не были готовы самостоятельно изучать новый материал. При изучении темы "Электростатика" некоторые десятиклассники, изучая закон Кулона, разобрались в этой теме, т.к. они понимали действия с векторами. А вот понятия напряженность и потенциал усваивались хуже, поэтому при встрече в новом учебном году пришлось полностью разбирать этот материал. Во время пандемии эта тема разбиралась с учителем с помощью платформы ZOOM.

В марте 2020 года в период пандемии были разработаны видеокурсы и видеоуроки ведущими учителями страны по всем предметам и темам школьной программы. Однако не все школьники могли воспользоваться просмотром этих уроков либо из-за слабой технической оснащенности, либо из-за нежелания самостоятельной работы при изучении нового материала.

При дистанционном обучении есть и недостатки:

1. Отсутствует очная связь между школьниками и учителем, что может привести к ослаблению дисциплины, и не каждый учащийся имеет сильную мотивацию для посещения интерактивных занятий.
2. Необходимость постоянного доступа к источникам информации, т.е. нужна хорошая техническая оснащенность: компьютер и выход в Интернет.
3. Необходимость наличия целого ряда индивидуально-психологических условий, т.е. для дистанционного обучения необходима жесткая самодисциплина, а его результат напрямую зависит от самостоятельности и сознательности школьника.
4. Отсутствует постоянный контроль над школьником, который является мощным побудительным стимулом к учебе.

Выбор жизненного пути является очень сложной задачей и решать эту задачу приходится каждому человеку. При этом формируется его личностные взгляды на профессию, мироощущение и миропонимание.

Все это является компонентами мировоззрения человека.

Становление мировоззрения у школьников является сложным процессом. Предметы естественного блока способствуют этому формированию. Физика – это один из предметов, имеющих самое большое значение в формировании научного мировоззрения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Полат Е. С., Бухаркин М. Ю., Моисеева М. В. Теория и практика дистанционного обучения: учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений. Под ред Е. С. Полат // М.: Издательский центр "Академия", 2004. 416с.
2. Полат Е. С., Бухаркин М. Ю., Моисеева М. В. Педагогические технологии дистанционного обучения / Под ред Е. С. Полат // М.: Издательский центр "Академия", 2006.
3. Об образовании в Российской Федерации. Федеральный закон от 29.12.2012 № 273-ФЗ. [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_)
4. Деревянко О. С. Преимущества и недостатки дистанционного обучения // Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : тр. Всерос. науч.-практ. конф. творческой молодежи с междунар. участием (Хабаровск, 17–20 апреля 2020 г.). В 2 т. Т. 2. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2020

УДК 378.147

### ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО РАЗДЕЛУ ФИЗИКИ «МЕХАНИКА» ДЛЯ СТУДЕНТОВ ДИСТАНЦИОННОЙ ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ

**К. А. Драчёв, С. В. Губин**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [kirill@pnu.edu.ru](mailto:kirill@pnu.edu.ru)

*В работе представлены несколько виртуальных лабораторных работ для электронного учебного курса по дисциплине «Физика» для студентов, изучающих курс дистанционно. Использование таких работ позволит эффективно сопровождать дистанционное обучение студентов заочного отделения без применения специализированного оборудования.*

В современном учебном процессе активно применяются информационные технологии, позволяющие сделать процесс обучения доступным для дистанционной формы обучения. Уровень их развития позволяет создавать математические модели практически любых реальных процессов и явлений. Однако их применение оправданно для дистанционных форм обучения, когда студент находится на расстоянии от лабораторной базы. Использование таких технологий для очной формы обучения не может заменить опыт работы студента на реальном оборудовании. В работе [1] подробно рассмотрены преимущества и недостатки внедрения виртуальных лабораторных практикумов в учебный процесс инженерных специальностей. Авторами отмечается, что «в практику нужно вводить виртуальные работы, не заменяя реальные, а лишь дополняя их. Внедрение информационных технологий в образовательный процесс оправдано, если имеются дополнительные преимущества по сравнению с традиционными формами обучения».

Для решения задачи по созданию виртуальных лабораторных работ по разделу «Механика» была выбрана среда разработки Visual Studio Community. Для реализации графической составляющей программы используется библиотека SFML [2]. Главное её преимущество в том, что она очень проста и удобна в использовании и имеет очень хорошую документацию. Нами было разработано несколько виртуальных лабораторных работ, которые планируется внедрить в учебный процесс технических направлений дистанционной формы обучения. Эти работы относятся к разделу «Механика» по дисциплине «Физика»: изучение свободного падения тел на примере шарика, определение ускорения силы тяжести при помощи математического маятника [3], определение коэффициентов трения покоя и скольжения, маятник Максвелла, упругое столкновение шаров, неупругое столкновение шаров [4], скатывание твердого тела с наклонной плоскости. Выполнение

виртуальной работы осуществляется в том же порядке, что и реальной. Учащиеся изучают теоретический материал, методику измерений, проводят эксперимент и затем оформляют отчет по проделанной работе.

Помимо данных лабораторных работ в настоящее время используются работы «Определение ускорения силы тяжести при помощи математического маятника» и «Определение плотности твердых тел», которые не являются виртуальными. Данные работы позволяют студентам произвести измерения используя подручные приборы (например, линейка, весы). Остановимся подробнее на методике выполнения данных работ. Все измерения по лабораторной работе студент выполняет самостоятельно, применяя материалы и предметы, используемые в быту (рис.).

### Лабораторная работа «Определение плотности твердых тел».

Лабораторная работа №1  
 Определение плотности твердых тел.

Цель работы: Изучить и измерить физические свойства твердых тел: масса, объем, плотность, вес. Сравнить с теоретическими значениями этих характеристик.

Задача: Определить плотность тела правильной геометрической фигуры и материала, из которого оно изготовлено.

Приборы и принадлежности: измерительные весы, линейка, штангенциркуль, мензурка, формулы для вычисления массы и объема.

Таблица 1

Прибор	Масштаб измерений	Цена деления	Погрешность $\Delta x$
Весы	100 г	10 г/дел	$\pm 4,5$ мг
Линейка	100 мм	1 мм/дел	$\pm 0,05$ мм
Штангенциркуль	25 мм	0,05 мм/дел	$\pm 0,05$ мм

Основные понятия и законы.

Масса  $m$  - мера инертности тела и мера его гравитационного воздействия.

Объем  $V$  - мера размера объема тела.

Вес - сила, с которой тело действует на опору/весы (подвес).

Удельный вес - вес единицы объема тела.

Цель работы - найти плотность тела, равномерно погруженного в воду, и под действием которой тело движется с ускорением  $a$ .

Список методов измерений и умножений.

Расчетная формула для определения плотности цилиндра:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi R^2 h}$$

Здесь  $V$  - объем цилиндра,  $R$  - его радиус,  $h$  - высота.

Расчетная формула определения плотности погруженного параллелепипеда:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi a b c}$$

Здесь  $a, b, c$  - стороны параллелепипеда.

Результаты измерений.

Таблица 2

Измерение массы цилиндрической фигуры.

$i$	$m, г$	$\Delta m, мг$	$h, мм$	$\Delta h, мм$
1	3,14	0,1	24,3	0,3
2	3,14	0,1	24,3	0,3
3	3,14	0,1	24,3	0,3
4	3,14	0,1	24,3	0,3

Расчетная плотность тела (перевод измерений в систему СИ):

$$\rho = \frac{4 \cdot 0,00314}{\pi \cdot 0,00243^2 \cdot 0,0243} = 403,3 \frac{кг}{м^3}$$

а

б

Таблица 3

Измерение массы в форме параллелепипеда

$i$	$m, г$	$\Delta m, мг$	$a, мм$	$b, мм$	$c, мм$
1	3,14	0,1	24,3	21,7	22,9
2	3,14	0,1	24,3	21,7	22,9
3	3,14	0,1	24,3	21,7	22,9
4	3,14	0,1	24,3	21,7	22,9

Расчетная плотность тела (перевод измерений в систему СИ):

$$\rho = \frac{4 \cdot 0,00314}{\pi \cdot 0,0243 \cdot 0,0217 \cdot 0,0229} = 403,3 \frac{кг}{м^3}$$

Вывод: Результаты расчета плотности тела не отличаются, что свидетельствует о том, что плотность тела равна  $403,3 \frac{кг}{м^3}$ , что соответствует плотности воды (при температуре  $4^{\circ}C$ ), а плотность воздуха равна  $1,29 \frac{кг}{м^3}$ , следовательно плотность тела (при температуре  $20^{\circ}C$ ).

рис. 1. Тело цилиндрической формы из цилиндра.

рис. 2. Тело параллелепипедной формы из цилиндра.

в

г

Типовой отчет по лабораторной работе «Определение плотности твердых тел» (а-г – листы лабораторной работы)

В данной лабораторной работе студенту предлагается самостоятельно определить плотность тела правильной геометрической формы и указать материал, из которого оно изготовлено.

Для этого выбирается любой имеющийся в наличии сплошной предмет (желательно прямоугольной или цилиндрической формы).

Это может быть, например, деревянный брусок, мыло и т.д.

В качестве минимального набора измерительных приборов обучающемуся предлагается выбрать бытовые кухонные весы и линейку.

Использование более точных приборов приветствуется, но в случае невозможности их применения, студент пользуется минимальным набором инструментов.

Таким образом, студент получает все необходимое для оформления отчета по лабораторной работе и проводит все исследования собственными руками, не выходя из дома. К отчету студент должен обязательно приложить фотографию исследуемого тела.

**Лабораторная работа «Определение ускорения силы тяжести при помощи математического маятника».** Аналогично предыдущей работе студент все измерения производит самостоятельно.

В результате он учится экспериментально определять основные характеристики гармонических колебаний и осваивает метод определения ускорения силы тяжести, при помощи математического маятника в бытовых условиях.

Измерительные инструменты также выбираются из минимального бытового набора (линейка, рулетка, секундомер на телефоне, часы).

Для выполнения данной лабораторной работы необходимо выбрать любое тело небольшого размера (шарик из пластилина, кольцо, гайка и т.п.) и подвесить его на нити. Рекомендуется длина нити примерно 1 метр для более точных измерений.

Для измерения времени колебаний маятника необходимо отвести шарик из положения равновесия на угол от  $4^\circ$  до  $6^\circ$  и отпустить его, предоставив ему возможность свободно колебаться.

Убедившись, что колебания происходят в одной плоскости, пускают в ход секундомер в момент наибольшего отклонения маятника и отсчитывают время, в течение которого маятник совершает  $n = 20$  полных колебаний.

Амплитуда колебания определяется приближенно по миллиметровой шкале линейки как максимальное смещение от положения равновесия центра тела.

Таким образом, студент определяет основные параметры гармонического колебания, записывает уравнение движения и строит итоговый график колебания. Обучающемуся предлагается также проверить утверждение о том, что период колебаний математического маятника не зависит от массы.

По итогам проведения исследований студент рассчитывает ускорение свободного падения на основе полученных измерительных данных.

Дополнительно к отчету студенту необходимо приложить электронную фотографию маятника, используемого при выполнении лабораторной работы аналогично предыдущей работе (рис.).

Предлагаемые работы могут быть успешно использованы совместно с виртуальными работами в образовательном процессе дистанционной формы образования при изучении раздела «Механика» курса физики.

По мнению многих авторов, только экспериментальная работа в полной мере задействует все возможности, предоставляемые деятельностным подходом в педагогике. Вместе с тем в случае удаленного обучения виртуальная работа является достаточно эффективным средством для достижения поставленных образовательных целей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гергова И. Ж. Виртуальные лабораторные работы как форма самостоятельной работы студентов / Гергова И. Ж., Коцева М. А., Ципинова А. Х., Шериева Э. Х., Азизов И. К. // Современные наукоемкие технологии. №1. 2017. С. 94-98.
2. Simple and Fast Multimedia Library [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sfml-dev.org/>. (20.02.2020)
3. Губин С. В. Внедрение виртуальной лабораторной работы по теме «Колебания и волны» // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки и образования». 2020. С. 13-15.
4. Драчёв К. А., Губин С. В. Виртуальные лабораторные работы по физике для студентов дистанционной формы обучения // The scientific heritage. 2020. Vol. 1, № 44(2020). С.9-12.

УДК 373.5.016

### ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ В ШКОЛЕ

**И. Н. Егоршин, Н. В. Кожемяко**

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск  
e-mail: [2016100875@pnu.edu.ru](mailto:2016100875@pnu.edu.ru)

*Данная работа посвящена проблемам изучения раздела «Физика плазмы» в рамках школьной программы и способам ее решения путем наглядных демонстраций. Создание экспериментальной установки «катушка Тесла» для визуализации изучаемого материала и его успешного усвоения.*

Эксперимент, как известно, еще в древности был актуальным и часто используемым методом познания окружающего мира, его явлений и законов. И, даже спустя тысячелетия, его актуальности и необходимость как в научных исследованиях, так и в сфере образования не только не уменьшились, но и значительно возросли.

Демонстрационный эксперимент на уроках физики в школе призван повысить концентрацию внимания учащихся в рамках ознакомления с новыми темами, регламентированными учебной программой, создать максимально доступное восприятие изучаемого материала, способствующее стабилизации учебной деятельности учащихся и выведению ее на новый, более высокий уровень.

Для этого эксперимент должен быть, по возможности, красивым, зрелищным, ярко подчеркивающим важные детали рассматриваемого явления или закона, но при этом не оторванным от реальности, чтобы учащийся смог спроецировать опыт личных наблюдений на изучаемое явление.

Наиболее подходящей, с точки зрения зрелищности, темой, для проведения демонстрационного эксперимента является «Физика плазмы».

При подробном рассмотрении школьной программы можно сделать вывод, что на данную тему выделяется очень мало времени, и в большинстве случаев «Физика плазмы» изучается в разделе астрономии.

Но ознакомить учащихся с понятием плазмы необходимо, так как в последние годы свойства веществ, находящихся, как принято говорить в «четвёртом состоянии», привлекают всё больше внимания учёных, что находит отражение и во многих сферах жизни

общества.

С педагогической точки зрения имеет огромное познавательное и научное значение, представляет собой практический интерес, способствует расширению кругозора учащегося.

Для достижения лучшего результата можно использовать демонстрационный эксперимент при изучении физики плазмы не только на уроках, но и на элективных курсах.

Внеурочная деятельность уже несколько лет внедряется в школьную программу. Элективный курс по физике плазмы соответствует потребности учащихся в более глубоком изучении данной темы, помогает сориентировать школьников на выбор профиля обучения на старшей ступени школы, осуществляет предпрофильную подготовку, а также позволяет отработать условия мотивационной функции учебника и применить полученные знания на практике.

Однако и в рамках учебной программы непосредственно на уроках физики можно использовать эксперимент для демонстрации свойств и основных функций физики плазмы, причем, на нескольких ступенях обучения.

Уже в 7 классе при изучении темы «Агрегатные состояния вещества» учащиеся знакомятся с понятием «плазма», и, как правило, у многих это вызывает значительные затруднения.

В таком случае целесообразно использовать демонстрационный эксперимент для ознакомления учащихся с элементарными проявлениями плазмы в природе.

Однако на этом знакомство учащихся с плазмой не заканчивается, в 10 классе стоит заострить внимание на устройстве генератора Тесла, также учащимся можно показать различные виды газовых разрядов, существующих в природе, и подробно изучить их отличительные особенности.

При более детальном рассмотрении способа применения демонстрационного эксперимента на уроке физики в 7 классе можно выделить несколько основных аспектов.

Из материала учебника, можно сделать вывод, что внимание на понятии «плазма» практически не заостряется, этого недостаточно для первичного ознакомления учащихся с данным явлением.

Продемонстрировав катушку Тесла на уроке, можно визуализировать данное понятие, что в значительной степени облегчит задачу восприятия и осмысления предложенной темы.

На примере дугового и тлеющего разрядов мы можем наблюдать возникновение плазмы.

Таким образом, учащиеся могут спроецировать полученные знания на всем известные природные явления, такие как молния, огонь и т.д.

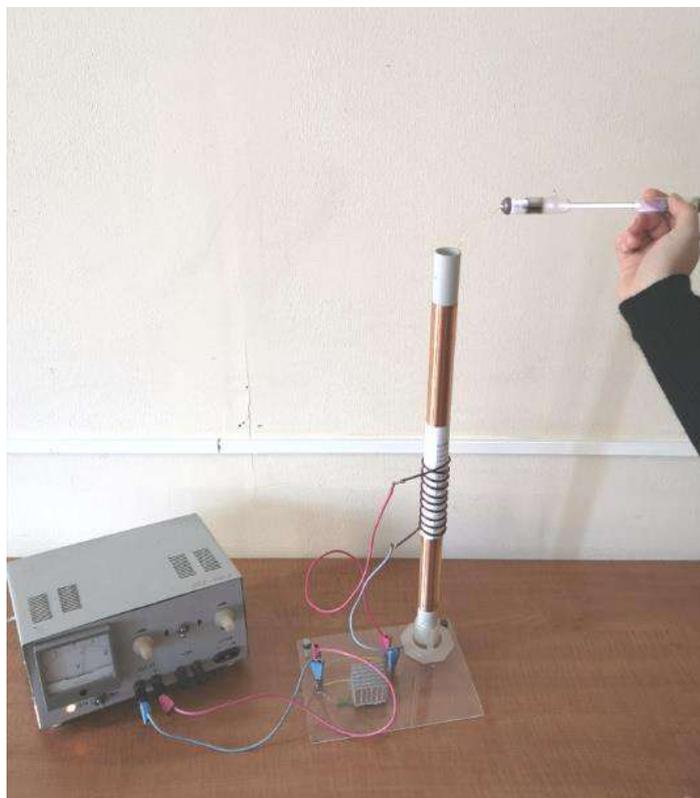
В 10 классе при изучении темы «Электрический ток в различных средах» стоит более детально изучить виды газового разряда и их отличительные характеристики.

Необходимо показать демонстрационный эксперимент для визуализации изучаемого материала, в чем может помочь генератор Тесла.

Он имеет две обмотки. На первичной обмотке наматывают более 10 витков. Вторичная обмотка тысячу витков. На первичную подходит напряжение переменного тока, создающее поле потока. Это позволяет получить магнитное поле, передающее электричество от первичной обмотки ко вторичной. В этот момент вторичная обмотка создаст контур колебательного типа.

Похожее действие у трансформатора. Стоит отметить, что для питания используется источник напряжением в 12В и силой тока 1А. Напряжение, возникающее в обмотках, напрямую зависящее от числа витков каждой. Напряжение во столько раз, во сколько число витков первичной обмотки меньше, чем во вторичной.

Несмотря на высокое напряжение, данный прибор можно использовать не только для демонстрации, но и в рамках лабораторных работ, так как он обладает большой степенью безопасности (рис.).



Демонстрационная установка «Катушка Тесла»

Также в рамках процесса обучения стоит заострить внимание учащихся на следующих понятиях, которые помогут более точно и емко отразить свойства и характеристики плазмы, понять способы ее применения.

Термическая ионизация - процесс ионизации, в результате которого, энергию, необходимую для отрыва электрона от атома, дают столкновения между атомами вследствие повышения температуры;

Ионизация электрическим полем - процесс ионизации, вследствие которого полученные значения напряжения внутреннего электрического поля выше предельного значения.

Из этого следует отрыв электронов от атомов газа.

Используя данный прибор, можем демонстрировать виды тлеющего разряда в различных газах как в виде небольших демонстраций, так путем закрепления трубки на штативе, для более подробного рассмотрения определенных характеристик. Например, для изучения спектров свечения различных газов.

Так же можно демонстрировать дуговой, искровой и коронный разряды.

1. Тлеющий разряд возникает при низких давлениях. Его можно наблюдать в стеклянной трубке с впаянными у концов плоскими металлическими электродами.

2. Искровой разряд возникает в газе обычно при давлениях порядка атмосферного. Он характеризуется прерывистой формой. По внешнему виду искровой разряд представляет собой пучок ярких зигзагообразных разветвляющихся тонких полос, мгновенно пронизывающих разрядный промежуток, быстро гаснущих и постоянно сменяющих друг друга (рис. 8.6). Эти полосы называют искровыми каналами.

3. Дуговой разряд. Если после получения искрового разряда от мощного источника постепенно уменьшать расстояние между электродами, то разряд из прерывистого становится непрерывным, возникает новая форма газового разряда, называемая дуговым разрядом.

При этом ток резко увеличивается, достигая десятков и сотен ампер, а напряжение на разрядном промежутке падает до нескольких десятков вольт.

Дуговой разряд поддерживается, главным образом, за счет термоэлектронной эмиссии с поверхности катода. На практике – это сварка, мощные дуговые печи.

4. Коронный разряд возникает в сильном неоднородном электрическом поле при сравнительно высоких давлениях газа (порядка атмосферного).

Такое поле можно получить между двумя электродами, поверхность, одного из которых обладает большой кривизной (тонкая проволока, острие).

В данной исследовательской работе были рассмотрены физические явления и свойства четвёртого агрегатного состояния вещества, плазмы, которые можно использовать в рамках демонстрационного эксперимента на уроках физики в школе.

Стоит подчеркнуть, что в современности изучение этой темы становится все более необходимо, это связано с высоким развитием науки и техники, где и встречается различные проявления физических свойств и функций плазмы.

В большинстве случаев изучение нового материала происходит более продуктивно при использовании наглядных примеров, демонстраций.

На любых ступенях обучения в школе наибольший интерес для учащихся представляет возможность проведения того или иного опыта, позволяющего не только изучать физику в рамках теории, но и применять полученные знания на практике.

Генератор Тесла представляет собой простой в исполнении прибор, создающий высоковольтное электромагнитное поле, позволяющее изучать опытным путем газовые разряды с высокой степенью безопасности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жданов С. К., Курнаев В. А., Романовский М. К., Цветков И. В. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках / Под ред. В.А. Курнаева. М.: МИФИ, 2007. 368 с.
2. Каменецкий С. Е. и др. Лабораторный практикум по теории и методике обучения физике в школе: учеб. Пособие для студ. высш. пед. учеб. Заведений. М.: Издат. центр «Академия», 2006.
3. Методика преподавания физики в средней школе. Частные вопросы. /Под ред. С. Е. Каменского, Л. А. Ивановой. М.: Просвещение, 1987. 335 с.
4. Демонстрационные опыты по физике в VII-VIII классах средней школы /Под ред. А. А. Покровского). М.: Просвещение, 1974.
5. Основы методики преподавания физики в средней школе /Под ред. А. В. Перышкина, В. Г. Разумовского, В. А. Фабриканта. М.: Просвещение, 1984.

## ПРОЕКТНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ОБУЧАЮЩИХСЯ КОЛЛЕДЖА

**Ю. О. Иванюк<sup>1</sup>, С. В. Ланкин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Амурский колледж сервиса и торговли, г. Благовещенск

<sup>2</sup>Благовещенский государственный педагогический университет, г. Благовещенск

e-mail: [svlankin@yandex.ru](mailto:svlankin@yandex.ru)

*Проблема «как заставить студентов учиться лучше» до сих пор не потеряла смысла. Повышение качества образования и формирования у обучающихся научного мировоззрения – важнейшая задача школьного образования в рамках ФГОС, которая предлагает активную самостоятельную работу учащихся в учебе. Формирование познавательной активности и самостоятельности студентов является одной из главных проблем современной школы. По новым стандартам ФГОС при преподавании физики необходимо использовать такую систему методов, которая направлена главным образом не на изложение преподавателями готовых знаний, их воспроизведение студентами, а на самостоятельное овладение обучающимися знаниями и умениями в процессе активной познавательной деятельности. В данной статье показано, что проектно исследовательская деятельность студентов является неотъемлемой частью учебного процесса, итогом обучения. Представлены организация, структура и этапы работы, методические приемы и критерии оценки. Проектно исследовательская работа по физике позволяет расширить границы изучаемых явлений, способствует развитию универсальных учебных действий.*

Школьное и вузовское образования находятся в поиске новых путей для качественного обучения. Дифференциация, индивидуализация, профилизация, гуманизация педагогического процесса – свойство современного образования. Однако, разные концептуальные идеи направлены на совершенствования отдельных компонент сложной системы образования. В настоящее время чтобы ничего не менялось, какие бы концепции не возникли, главное это образованность, самостоятельная деятельность и компетентность [1-4]. Современным преподавателям необходимо уделять пристальное внимание физическому и духовному здоровью, индивидуальным особенностям и уровню личностного развития молодого человека, профессиональной подготовке, стремлению к творчеству, правильному пониманию современной физической картины мира и т.д.

Физика – экспериментальная наука, поэтому важнейшей составной частью курса является использование физических экспериментов. В учебных заведениях изучение физики невозможно без лабораторных работ, потому что именно на этих занятиях отрабатываются практические умения и навыки, а также развиваются такие важные личностные и профессиональные качества студентов как самостоятельность, активность, мыслительная деятельность, компетентность и т.п. Однако, в этом направлении имеются большие трудности: по программе и учебным планам выделено министерством образования очень малое число практических занятий. Одной из основных проблем преподавания физики в колледже и в вузе является очень малое число выделенных часов на закрепление теоретических знаний, т.е. на выполнение заданий лабораторных и практических занятий. В связи с этим учителя нашли выход решения задачи в организации научно-исследовательской деятельности студентов, которая не только развивает и обогащает методическую науку, но, как показал опыт, повышает желание у обучающихся учиться. Все вышеперечисленное и определило цель работы.

В настоящее время для учителей имеются указания, программа и план научно-исследовательской деятельности, составленные в соответствии с «Положением о проектно-исследовательской деятельности (об итоговом индивидуальном проекте) на основе ФГОС среднего (полного) общего образования. Приказ № 413 от 17 мая 2012 г.». Данный документ ориентирует преподавателей на организацию обучения студентов самостоятельному исследованию, который выходит за рамки учебного курса. Для выполнения приказа педагогам необходимо организовать (создать) условия для формирования универсальной учебной деятельности (УУД) у учащихся, развитие логического мышления, индивидуальных способностей. Вытекающие из приказа задачи, которые должны решаться в рамках учебного заведения, можно сформулировать таким образом:

- формирование научного мировоззрения студентов;
- развитие творческих способностей и познавательной активности;
- воспитание осознанного отношения к учебному труду;
- обучение элементарным исследованиям и навыкам самостоятельной работы;
- научить осуществлять научно-исследовательский поиск, и составлять план научной работы;
- приобщить к культуре рассуждения и продуманной аргументации;
- оформление тезисов, результатов работы, выводов и аннотации;
- осуществление контроля исследовательской работы (проекта).

Самая сложная задача преподавателей – это побудить интерес к физике, к желанию учиться, данную проблему можно осуществить через внеурочную деятельность. Согласно Базисному учебному плану общеобразовательных учреждений России, организация внеучебной деятельности является составной частью учебного процесса в колледже. Часы, которые отводятся на внеучебную деятельность, необходимо использовать по желанию обучающихся и в иных рамках учебного процесса [3-5]. Необходимо отметить, что внеурочная деятельность отличается от классно-урочной и направлена на достижение планируемых результатов развития индивидуальных способностей. Это определяет специфику проектных исследований и использование научной и вузовской литературы [5-8], в ходе которой обучающийся не только должен узнать нового, сколько научиться действовать, чувствовать, принимать самостоятельные решения, писать рефераты и доклады. Поэтому внеурочная деятельность гораздо шире учебной, так как учащиеся углубляют знания исходя из своих интересов.

Для обучающихся значимыми в их личностном развитии является индивидуальные и групповые (2 студента) проектно-исследовательской работы. В организации таких работ можно выделить несколько этапов. Первый. Не каждый обучающийся самостоятельно может определиться темой исследования. Поэтому при изучении каждого раздела по физике учащимся предлагается перечень тем исследовательских работ, включая и те, которые прописаны в учебниках физики [5-12]. Это могут быть темы, как мини-проектов, так и долгосрочных проектов, для реализации которых требуется не менее месяца работы. Например, «Вода вчера и сегодня». Вопрос, который необходимо здесь изучить: физические свойства воды, её структура и значение для Природы, а также «Свойства бетона», «Экологические проблемы полета самолетов», «Нanomатериалов» и т.д. Перечень тем можно предлагать несколько раз в течение учебного года.

Какие критерии предлагаем к выбору исследовательских тем?

- тема обязана вызвать интерес для студента не только на данный момент, но и могла быть продолжена в дальнейшем на более высоком научном уровне;
- тема должна быть реализуема в существующих учебно-лабораторных условиях;
- задачи работы должны выходить за рамки учебной программы курса.

Второй этап. Проводится консультация актуальности выбранной темы, составляется план работы исследования, определяется объект и предмет изучения, ставятся цель и за-

дачи проекта. Определяются сроки выполнения, график дополнительных консультаций и отчет работы.

Третий этап – начинается самостоятельный сбор теоретической информации по выбранной теме. Этот этап работы важен, так как обучающиеся самостоятельно добывают те знания, которыми ему помогут решить поставленные задачи (собрать существующую информацию по поставленной проблеме, изготовить установку, провести измерения и обработку полученных данных, провести их анализ и сделать выводы). Все это способствует повышению мотивации к изучению предмета.

Четвертый этап – предварительный отчет по проделанной работе. В этот период корректируется план, обсуждение промежуточных результатов эксперимента. Студенты составляют отчет по проектно-исследовательской работе, готовят выступление на научную конференцию. На этом этапе исследователь доказывает истинность своих гипотез, получивших экспериментальное подтверждение. Результат своей работы оформляет в виде компьютерной презентации.

Примеры исследовательских работ, выполненных студентами 1 курса колледжа сервиса и торговли Ященко И.Я., Егоровым Н.А., Прохоровой Т.А., Козловой Е.В. по курсу физики во внеурочное время. Исследуемая тема: Определение коэффициента поверхностного натяжения воды. Предлагаемые методы: сравнения, отрыва смачивающегося кольца от поверхности жидкости, капилляров, параллельной пластинки, вытекания жидкости из эллиптического отверстия.

Актуальность проблемы. Трудно назвать вещество, имеющее столь огромное значение для человечества, как вода. Почти три четверти поверхности земного шара покрыты водой, образующей океаны, моря, реки и озёра. Много воды находится в газообразном состоянии в виде паров в атмосфере; в виде огромных масс снега и льда. В недрах планеты также находится вода, пропитывающая почву и горные породы. Недаром у древних народов наряду с культом Солнца существовал культ Воды. Древние философы рассматривали воду в качестве важнейшей составной части материи. По Аристотелю (IV в. до н. э.), вода – одно из четырех «начал» (элементов), и её соединение с другими «началами» (землей, воздухом и огнём) порождает весь окружающий мир. В 18 веке выяснилась фундаментальная роль воды как универсального растворителя и компонента множества объектов живой и не живой природы. Развитие молекулярных и структурных представлений дали объяснение исключительной способности молекул воды образовывать связи с молекулами почти любых веществ. Стала ясна роль воды и в важных физических свойствах гидратированных веществ – глины, гипса, цементного камня, некоторых типов сегнетоэлектриков. Большой интерес всегда привлекала проблема биологической роли воды, связанная с биохимическими процессами. Так, например, организм человека почти на три четверти состоит из воды, которая участвует во всех жизненных актах. Сейчас проблема воды – одна из актуальнейших проблем века приобрела новое направление. Если раньше она сводилась к изысканию и рациональному использованию пресной воды и её очистке, то теперь изучается изменение свойств воды с помощью внешних физических воздействий, например, электромагнитными полями. Вода обладает уникальными физическими свойствами: сложное молекулярное строение, смачиваемость, вязкость, теплопроводность, испарение, диффузия, кипение, адсорбция и т.д., которые зависят от многих внешних и внутренних факторов. Большинство свойств воды аномальны и важны для многих природных явлений. Например, высокая теплопроводность воды приводит к следующему: в дневное время или при переходе от зимы к лету вода медленно нагревается, а в ночное время – медленно остывает. Такое поведение воды регулирует температуру на земном шаре. Теория воды (жидкостей) до сих пор слабо разработанный раздел теоретической физики. Этому трудно дать разумное объяснение – слишком огромна роль воды в жизни человечества, растений и животных.

Предмет и объект исследования поверхностное натяжение воды при нормальных условиях.

Цель проектного исследования: изучить природу поверхностного натяжения воды, исследовать зависимость коэффициента поверхностного натяжения воды от внешних факторов (температуры, давления, примесей).

Задачи проектно-исследовательской работы:

1. Используя существующую теорию, выяснить причины возникновения поверхностного натяжения воды и его значимость в природе и жизни человека [6,7,10-12].

2. Рассмотреть способы измерения коэффициента поверхностного натяжения воды [10-13].

3. Экспериментально изучить влияние температуры, давления и наличия примеси на значение коэффициента поверхностного натяжения воды. Провести обработку результатов [9,12].

Методы исследования: 1) используя научную литературу, справочники, интернет, теоретически изучить и проанализировать методы определения коэффициента поверхностного натяжения воды; 2) экспериментально провести наблюдение и рассчитать коэффициент.

Гипотеза: поверхностное натяжение воды уменьшается при наличии примеси и повышении температуры.

Из теории поверхностного натяжения и капиллярных явлений [6, 9, 10] следует обратить внимание на такой факт. На жидкость, кроме внутренних сил взаимодействия между частицами, из-за которых и возникает сила поверхностного натяжения, обычно действуют еще и внешние силы.

Это, во-первых, сила тяжести и, во-вторых, силы взаимодействия частиц жидкости с частицами твердых стенок сосуда, в котором она содержится. Поэтому действительная форма, которую принимает жидкость, определяется соотношениями этих трех сил.

Исключить действие силы тяжести возможно в условиях невесомости.

Опыты в космосе это подтвердили: жидкость, вылитая из сосуда внутри космической станции, стремится принять форму шара. Ранее ученый Плато, используя капли анилина в соленом растворе с той же плотностью, экспериментально скомпенсировал действие силы тяжести силой Архимеда, благодаря чему капля анилина приняла форму шара.

Необходимо отметить. В проектно-исследовательской работе, выполненной студентами колледжа, был определен коэффициент поверхностного натяжения пятью способами: методом сравнения, отрыва смачивающегося кольца от поверхности жидкости, опускание (подъем) жидкости в капиллярах, параллельные пластинки, вытекание жидкости из эллиптического отверстия.

Три первых метода просты для понимания и выполнения. Студенты самостоятельно подбирают такие приборы: равноплечные весы без разновесов, динамометр, тонкую проволоку, медицинские капилляры. Для измерения коэффициента поверхностного натяжения методом двух параллельных стеклянных пластинок требуется от руководителя помощь. Обычно используют предметные стёкла микроскопа.

Для достижения параллельности между пластинами располагаем тонкую проволоку известного диаметра, изогнутую в виде буквы П. Придерживая пластинки пальцами, опускаем их в сосуд с водой так, чтобы нижний их край коснулся жидкости. вода поднимается на высоту  $H$ , которую измеряют. Далее используя теорию капиллярности, определяем искомый коэффициент. Выше рассмотренные методы являются статическими.

Коэффициент поверхностного натяжения воды можно определить и в динамическом режиме (задача Рэлея). Для поддержания постоянной скорости вытекания жидкости используем сосуд Мариотта, в дне которого сделано эллиптическое отверстие.

Струйка воды, вытекающая из отверстия, периодически меняет форму капли. Колебания продолжаются довольно долго, т.к. затухание мало. Длина волны (расстояние меж-

ду двумя каплями с эллипсом в одной фазе) пропорционально скорости вытекающей струи. Измеряя период колебания легко определить коэффициент поверхностного натяжения воды.

В результате самостоятельно проделанной исследовательской работы коэффициент поверхностного натяжения при комнатной температуре и атмосферном давлении 745 мм. рт. ст. оказался равным около 0,07 Н/м. Приборная ошибка составила  $\pm 0,005$  Н/м. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения воды от температуры и давления экспоненциальна; количественные результаты отличаются от табличных на 20-25 %.

Подводя итог работы со студентами, опыт показал, что молодёжь, однажды выполнившая исследовательскую работу, продолжает участвовать в научной деятельности и с желанием расширяет границы изучаемых явлений. Проектно-исследовательская работа способствует более успешному усвоению курса физики и его применению в дальнейшей и профессиональной деятельности. Хотелось бы отметить, что изучение физики нельзя сводить только к механическому запоминанию учебного материала. Использование проблемно-исследовательского метода познания позволяет развить личностную заинтересованность студента к учебной деятельности, активизировать память и творческое мышление. Интерес к исследовательской работе связан с новизной материала, сменой конкретных видов работы и игровыми элементами занятия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А. И., Калачев Н. В., Кокин С. М. и др. Ведение специального практикума в курс общей физики // Учебная физика. 2010. № 4. С. 41-45.
2. Арцев М. Н. Учебно-исследовательская работа учащихся: методические рекомендации для педагогов и учащихся // Завуч для администрации школ. 2005. № 6. С. 4-30.
3. Бельх С. Л. Управление исследовательской активностью ученика: Методическое пособие для педагогов общеобразовательных школ. Ижевск: Изд-во ИПТУ. 2007. 64 с.
4. Зырянов А. И. Методы проектно-исследовательской работы <http://medianetyartet.ru>.
5. Ивашкина Д. А. Поэтапное обучение обработки экспериментальных данных. Физика. 2007. № 18. С. 15-18.
6. Иродов И. Е. Физика макросистем: Основные законы: учебное пособие для вузов. М.: Лаборатория базовых знаний. 2001. С. 137-144.
7. Кикоин А. К., Кикоин И. К., Шамаш С. Я. Физика: учебник для 10 класса и классов с углубленным изучением физики. М.: Просвещение. 2018. 302 с.
8. Лебедев С. А. Уровни научного знания // Вопросы философии. 2010. № 1. С. 62-75.
9. Леонтович А. В. Исследовательская деятельность учащихся. М.: Просвещение. 2003. 96 с.
10. Матвеев А. Н. Молекулярная физика: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа. 1981. С.262-270.
11. Пурышева Н. С., Вожаевская Н. С., Исаева Д. А. Физика: учебник для 10 кл. общеобразоват. учреждений. М.: Просвещение. 2018. 400 с.
12. Пустолова Г. Е. Простейшие физические измерения и их обработка. М.: Просвещение. 1987. 132 с.
13. Сандакова Н. А. Как организовать проектную исследовательскую работу обучающихся // Физика и ее преподавание в школе и в вузе: материалы Всероссийской научн.- практ. конф. Йошкар-Ола. Мар. гос. ун-т. 2016. С. 149-152.

## ПРИНЦИП ИНТЕГРАЦИИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ КАК СПОСОБ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНОГО МЫШЛЕНИЯ

А. В. Казарбин<sup>1</sup>, Ю. В. Лунина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск,

<sup>2</sup> Хабаровский технический колледж, г. Хабаровск,

e-mail: [000283@pnu.edu.ru](mailto:000283@pnu.edu.ru), [lunina2110@mail.ru](mailto:lunina2110@mail.ru)

*В статье авторы рассматривают применение интегрированных и активных форм обучения естественнонаучным дисциплинам как способ развития инженерного мышления. Приводят сравнительный анализ исследовательского и проектного методов, а так же рассматривают важность применения принципа интеграции в образовательном процессе.*

Суть и цель качественного обновления образования в XXI в. – подготовка выпускника, способного освоить профессиональные компетенции, востребованные на рынке труда. Необходимо развивать у студентов умение осознанно использовать полученные знания и умения для целостного решения профессиональных задач. Это возможно, по нашему мнению, только на основе сформированного инженерного мышления.

Ведущая роль в формировании инженерного мышления принадлежит дисциплинам естественнонаучного цикла (математика, физика, информатика), среди которых наиболее значимым для развития конструкторских и изобретательских способностей является учебный предмет «физика». Физика вносит наиболее существенный вклад в развитие у школьников/студентов мотивации к изобретательской деятельности, к сожалению, в настоящее время многие педагоги образовательных организаций профессионального образования (СПО и ВО) констатируют проблему несформированности у студентов инженерного мышления. Эта проблема имеет глубокие корни и вызвана не только несовершенством программ профессионального образования и методами преподавания в образовательных организациях среднего профессионального и высшего образования, но также определенными пробелами на дошкольном и школьном уровнях образования.

Так, преподавателями колледжа выявлены такие умения и виды деятельности, несформированные у большинства обучающихся (табл. 1):

Таблица 1

Умения и виды деятельности, несформированные у большинства обучающихся

9 класс	11 класс
Интерпретация графиков зависимости физических величин	
Зависимости для механических колебаний в колебательной системе	Зависимости для электромагнитных колебаний в колебательном контуре
Анализ явлений, процессов и применение законов	
Законы сохранения энергии и импульса	Закон электромагнитной индукции

Возможными причинами выявленных затруднений выступают:

- формальное усвоение учащимися теоретических составляющих курса физики;
- неумение строить физическую модель решения задачи;
- недостаточное владение навыками самостоятельного проведения измерений и анализа физических величин.

По мнению авторов, системными ошибками при обучении физике на уровне основного общего и среднего общего образования выступают:

- использование тренинговых приемов при обучении навыку решения качественных и расчетных задач повышенного и высокого уровней сложности;
- применение пошаговых инструкций для учащихся при формировании практических навыков проведения физических измерений и интерпретации полученных данных.

Авторы подробно обсуждали проблему несформированности инженерного мышления в статье «Проориентационная деятельность как фактор развития инженерного образования», где выявляли причины данного явления [1].

В рамках преемственности уровней образования, целями которого является подготовка к поступлению студентов КГБ ПОУ «Хабаровский технический колледж» в ФГОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» на технические направления подготовки, в колледже отдается предпочтение принципу интеграции в образовательном процессе и внедрению проектно-исследовательского метода в обучение студентов по дисциплинам естественнонаучного цикла.

Мы считаем, что принцип интегрированного обучения, в настоящее время, выступает как основной механизм построения моделей профессиональной деятельности.

Необходимость обращения нами к интегрированному подходу в обучении вызвана рядом объективных причин, которые обнаружились в процессе обучения естественнонаучным дисциплинам (физике, математике, информатике).

Одной из важнейших проблем, на наш взгляд, является заметное снижение интереса студентов к предметам естественнонаучного цикла, что во многом обусловлено объективной сложностью дисциплин.

Сама специфика физики и математики на их современном уровне побуждает к комплексному подходу в обучении студентов этим дисциплинам, т. е. логика данных наук ведёт к их объединению, интеграции.

Практика показывает, что нередко одно и то же понятие в рамках каждой конкретной дисциплины определяется по-разному – такая многозначность научных терминов затрудняет восприятие учебного материала.

Одна и та же тема по разным дисциплинам изучается в разное время, что несет несогласованность, разобщённость этапов формирования у студентов общих понятий физики, математики, информатики; выработки у них обобщённых умений и навыков.

Эти противоречия снимаются при интегрированном обучении.

Мы считаем, что интегрированное обучение подразумевает проведение бинарных занятий и занятий с широким использованием межпредметных связей.

Так, например, используя компьютерную технику, на занятиях по предмету информатика, производилась демонстрация видеофильмов, клипов, воспроизведение звуковых эффектов, в том числе и музыкальных композиций.

Данные возможности были нами использованы при проведении занятия по физике по теме «Звуковые колебания». Были использованы записи звуковых колебаний различных природных явлений, голоса зверей и птиц, вокальные композиции. Занятие позволило наглядно продемонстрировать, как человек воспроизводит и регистрирует звуки, как менять характеристики воспроизводимых звуков и др.

В рамках работы творческой группы «За здоровый образ жизни» студенты участвуют в изучении своей двигательной активности с помощью шагомеров. Нами было разработано и проведено практическое занятие «Энергетические характеристики движения», на котором студенты смогли наглядно убедиться во взаимосвязи характера движения, энергетических характеристик и режима питания.

Наглядно было продемонстрирована взаимосвязь знаний физических понятий и их использования для здорового образа жизни.

Авторы считают, что применение исследовательского и проектного методов, как активных методов обучения, мотивируют учащихся к самостоятельному, инициативному и творческому освоению учебного материала в процессе познавательной деятельности. Интеграция этих двух методов в форме проектно-исследовательской работы позволяет интенсифицировать техническое и творческое развитие студентов.

Рассмотрим и проанализируем педагогическую сущность данных методов на основе выделенных критериев (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительный анализ проектного и исследовательского метода [2]

Параметр	Исследовательский метод	Проектный метод
Основные понятия	<i>Исследование</i> – поиск новых знаний или систематическое расследование с целью установления фактов. <i>Учебное исследование</i> – это творческая субъективно новая задача, которую обучающиеся еще не решали [3].	<i>Проект</i> - деятельность, направленная на выполнение какого-либо замысла или плана. <i>Учебный проект</i> – совместная учебно-познавательная, творческая или игровая деятельность учащихся- партнеров, имеющая общую цель, согласованные методы, способы деятельности, направленная на достижение общего результата по ре-
Прогнозирование	Исследование находится в принципиально неподдающейся никакому прогнозированию составляющей [4].	Проектирование разворачивается и развивается в основном в рамках предсказуемой, «детерминированной» составляющей [4].
Сущность	Исследование не предполагает создания какого-либо заранее планируемого объекта, даже его модели или прототипа. Исследование – процесс поиска неизвестного, новых знаний, один из видов познавательной деятельности человека [5]. Исследовательская деятельность изначально более свободная, практически нерегламентированная какими-либо внешними установками. В идеале ее не должны ограничивать даже рамки самых смелых гипотез. Потому она значительно более гибкая, в ней значительно больше места для импровизации.	Проектирование – процесс разработки и создания проекта (прототипа, прообраза, предполагаемого или возможного объекта или состояния). Проект всегда ориентирован на практику. Проектирование изначально задает предел, глубину решения проблемы. Метод проектов предполагает составление четкого плана проводимых изысканий, с неизбежностью требует ясного формулирования и осознания изучаемой проблемы, выработку реальных гипотез, их проверку в соответствии с четким планом [6].
Этапы	-постановка проблемы; -изучение теории, посвященной данной проблематике; -подбор методик исследования; -сбор материала, его анализ и обобщение; -научный комментарий; -собственные выводы.	-постановка проблемы; -выработка концепции (гипотезы); -определение целей и задач проекта, доступных и оптимальных ресурсов деятельности; -создание плана; -организация деятельности по реализации проекта.

Виды работ	<p><i>Учебное исследование</i> Цель: процесс поиска неизвестного, поиска новых знаний. Степень анализа информации: полноценный процесс анализа информации. Характер творческого процесса: максимальное проявление творчества личности.</p>	<p><i>Учебный проект</i> Цель: создание какого-либо заранее планируемого объекта, модели или прототипа. Степень анализа информации: полноценный процесс анализа информации. Характер творческого процесса: «творчество по плану».</p>
------------	--	---

Например, в ходе лабораторной работы «Изучение движения тела по окружности под действием сил упругости и тяжести» обучающиеся определяют величину центростремительного ускорения шарика при его равномерном движении по окружности. Данную лабораторную работу можно дополнить заданиями:

1. Исследуйте влияние значения массы шарика на скорость вращения шарика.
2. Исследуйте влияние значения длины нити на скорость вращения шарика.
3. Смоделируйте (спроектируйте) ситуацию, где можно использовать предложенное в лабораторной работе оборудование.

Применяя проектно-исследовательский метод в образовательном процессе, преподаватель решает следующие задачи:

- развитие субъектной позиции обучающихся;
- формирование научной картины мира;
- развитие навыка создания и осуществления исследования и проектирования;
- освоение элементов научного метода познания;
- приобретение технических и технологических знаний и навыков;
- мотивация на профессиональное самоопределение в области науки и техники;
- развитие навыков рефлексии собственной деятельности.

При проведении лабораторных работ, авторы рекомендуют использовать различные модели их проведения - от применения заранее заданного плана выполнения работы через самостоятельное выполнение отдельных шагов (постановки цели, определения теоретических основ выполнения) до самостоятельной разработки алгоритма выполнения лабораторной работы.

Обязательным требованием должно выступать представление экспериментальных результатов в виде таблиц, графиков, расчет погрешностей прямых измерений, запись расчета косвенных измерений с учетом погрешности и др.

При анализе взаимосвязей различных физических параметров включать в образовательную деятельность фронтальные демонстрации с использованием реальных приборов и устройств. Систематически применять групповые формы обсуждения результатов выполнения фронтальных экспериментов, лабораторных работ и опытов.

По мнению авторов, принцип интеграции в образовательном процессе стимулирует обучающихся переходить от простых операций анализа и сравнения к более сложным - моделированию, систематизации, структуризации, редуцированию, идеализации, абстрагированию, аналогии, аксиоматизации, экстраполяции, формализации, комбинаторике и др. В итоге выстраивается определенная стратегия и тактика рассуждений и доказательств, владение дедуктивной и индуктивной логикой, развивается способность строить гипотезы, устанавливать причинно-следственные связи, выводить аксиомы, сопоставлять теорию и практику, совершать более глубокое и широкое познание действительности, т.е. развиваются именно те качества, которые необходимы будущим инженерам.

Применяя интегрированный подход, преподаватель, делает процесс более полным, интересным, насыщенным. При пересечении предметных областей естественных наук

такая интеграция просто необходима для формирования целостного мировоззрения и мировосприятия, что, несомненно, благоприятно сказывается и на формирование инженерного мышления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Казарбин А. В., Лунина Ю. В. Профориентационная деятельность как фактор развития инженерного образования // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование// Материалы XVI региональной научной конференции// Издательство: ТОГУ 2018.
2. Баженова И. И., Романько Д. В. Выполнение индивидуального проекта как одно из современных требований к результатам образования школьников// Педагогическое образование в России. 2016. № 8.
3. Советский энциклопедический словарь / Гл. ред. А. М. Прохоров. Изд. 4-е. М.: Сов. Энциклопедия, 1987. С.1065.
4. Поливанова К. Н. Проектная деятельность школьников. М.: Просвещение, 2011.
5. Савенков А. И. Психологические основы исследовательского подхода к обучению: учебное пособие. М.: «Ось-89», 2006. С. 230.
6. Леонтович А. В. Об основных понятиях концепции развития исследовательской и проектной деятельности учащихся // Исследовательская работа школьников. 2003. № 4.
7. Пентин А. Ю. Исследовательская и проектная деятельности: сущность и форма // Новые ценности образования. М., 2006.
8. Проект Концепции комплексной государственной программы «Уральская инженерная школа» на 2015-2020 годы. [Электронный ресурс] URL: <http://sospp.ru/news/razra-botan-proektkonceptcii-kompleksnoj-gosudarstvennoj-programmy>.

УДК 378.147

## МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КУРСА ФИЗИКИ ДЛЯ БАКАЛАВРОВ

**Г. Г. Капустина**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [g.kapustina@mail.ru](mailto:g.kapustina@mail.ru)

*В настоящее время необходимость внедрения новых методов обучения, использующих современные информационные технологии и новое методическое обеспечение не вызывает сомнений. Электронное обучение и дистанционные технологии активно внедряются на всех ступенях образования, как дополнение к традиционным формам. Усилия педагогов направлены на поиски эффективных моделей реализации смешанного обучения. Создание электронного курса способствует эффективной организации самостоятельной работы студентов в процессе обучения.*

Система физического образования, напрямую связано с реформами в системе образования в целом. В настоящее время существует противоречие между потребностями современного рынка труда и сложившейся традиционной системой образования, не способной удовлетворить эти потребности.

Предполагается, что эти противоречия могут быть разрешены при реструктурировании системы образования и изменении содержания образования, что получило отражение в новых образовательных стандартах.

Следует отметить корреляцию исходных теоретических подходов, принятых при разработке ФГОС ВПО:

- компетентностный подход в ФГОС ВПО как отражение идеи «учение через всю жизнь»;
- предоставление учреждениям ВПО свободы в наполнении образовательных программ;
- увеличение вариативной части программы, в том числе учебного времени на курсы по выбору студентов и учащихся,
- усиление доли самостоятельной работы в учебном процессе, нацеленность ее на приобретение обучаемыми исследовательских, проектных и др. компетенций.

Реализация этих идей и подходов должна позволить при определении содержания образовательной программы учитывать потребности регионов в кадрах разной квалификации, мотивы и интересы обучаемых и строить их индивидуальные образовательные траектории; определить содержание предметного образования в системе ВПО исходя из запросов рынка труда, профессиональных задач и гибко реагировать на их изменение.

Опыт работы по новым программам для бакалавров, составленных авторами, выявил необходимость создавать новые учебники, задачки, описания лабораторных работ и прочие методические рекомендации для студентов. Многие учебники (пятитомные учебники И. В. Савельева, Д. В. Сивухина «Курс общей физики») создавались не для бакалавров, они имеют очень большой объем и насыщены сложными математическими выкладками. В последнее время в нашем университете чаще используется адаптированный для технических вузов «Курс физики» Т. И. Трофимовой. Однако при сокращении лекционных часов еще в полтора раза и этот одностомный учебник стал велик.

Идея переноса части учебного материала на самостоятельную работу реализуется тем, что мы создаем новые методические пособия со ссылками на ту литературу, которую студенты должны проработать самостоятельно. Однако отсутствие должного контроля деятельности студентов в этом направлении приводит к тому, что разделы курса, переносимые на самостоятельную работу, попросту игнорируются. Об этом говорят и пустые читальные залы, и откровенно неудовлетворительные ответы студентов по этим разделам на экзаменах и зачётах.

Серьёзной проблемой встаёт создание учебного электронного курса для бакалавров. Естественно при этом пересмотреть уже имеющиеся материалы и соответствующим образом их адаптировать для нового контингента. В настоящее время преподавателями нашей кафедры проводится такая работа с использованием созданных электронных курсов, которые можно использовать как при очном обучении, так и при онлайн-обучении. Например, электронный курс «Общая физика ориентирован на будущих бакалавров, изучающих физику в течение двух семестров. Программа курса сжата по сравнению с прошлыми рабочими программами. Прошлые курсы переработаны и приспособлены специально для контингента бакалавров. Неизбежно некоторые физические законы и явления должны при этом отойти на второй план. Тем не менее, материал, не входящий в учебную программу, но который автору представляется важным, в курсе может быть напечатан более мелким шрифтом: те, кому это интересно, его прочитают и расширят свой кругозор и общую культуру.

Адаптация под бакалавриат семинарских занятий – ещё одна проблема; возможно, одна из наиболее серьёзных. Количество часов, выделяемых на семинары, катастрофически мало – один или два часа в неделю, а для некоторых специальностей семинары вообще не предусматриваются. На семинарах рассматривается решение нескольких типовых задач, выдается задание для самостоятельного решения. Проверка достигнутых навыков в решении задач осуществляется прикреплением в электронном курсе решенных задач. Желательно, чтобы каждое из заданий было индивидуальным и составлено таким обра-

зом, чтобы индивидуальная активность была максимально активизирована, а массовое творчество (читай: списывание) затруднено.

С помощью электронного курса можно проводить фронтальные лабораторные работы (при онлайн-обучении). В курсе напечатаны описания лабораторных работ и таблицы для занесения результатов измерений, расчетные формулы для обработки результатов. С помощью компьютерных моделей лабораторных установок студенты сами могут снимать необходимые для выполнения лабораторных работ значения, оформлять отчет по лабораторной работе и прикреплять его в электронный курс.

С целью улучшения контроля самостоятельной работы предлагается проводить проверку знаний студентов с помощью тестирования. Преподавателями кафедры создан набор тестов по отдельным разделам курса физики, для проведения входного контроля уровня подготовки студентов, промежуточного контроля усвоения отдельных разделов, соответствующих дидактическим единицам, а также рубежного контроля для допуска к экзаменам. Регулярное онлайн-тестирование сможет заменить контрольные работы в течение семестра.

Создание электронных курсов – это возможность для интенсификации учебного процесса и активизации самостоятельной работы студентов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров В. Г., Авенариус И. А. О создании новых учебных пособий по физике (бакалавриат) // Сб. Физика в системе современного образования (ФССО-15). Материалы XIII Международной конференции. 2015. С.291-293.
2. Шурыгин В. Ю., Краснова Л. А. Организация самостоятельной работы студентов при изучении физики на основе использования элементов дистанционного обучения В LMS MOODLE // Образование и наука. 2015. № 8 (127). С. 125-139.

УДК 378

## ДИСТАНЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ: ЗАМЕЧАНИЯ И ВЫВОДЫ

**И. Б. Копылова**

Амурский государственный университет, г. Благовещенск,  
e-mail: [kopylovaib@mail.ru](mailto:kopylovaib@mail.ru)

*Проблемы, с которыми столкнулись преподаватели и студенты в процессе дистанционного обучения настолько обширны, что охватить их практически невозможно. Они связаны не только с техническим обеспечением процесса, но и с этическими нормами, связанными с обезличиванием связи преподаватель – студент. Наиболее острые из них рассматриваются в данной работе.*

Перевод студентов на дистанционное в конце прошлого семестра высветил множество проблем, связанных как с организацией процесса, так и с оценкой качества усвоения знаний студентами.

Электронно-информационная образовательная среда вуза (ЭИОС) позволяет использовать электронные методы обучения и предоставляет преподавателю широкий спектр возможностей для размещения учебных материалов и формирования заданий, контроля за выполнением заданий. Формирование электронного курса и размещение учебного ма-

териала в электронной системе требует от преподавателя значительных затрат рабочего времени. Особенно, если это естественнонаучная или техническая дисциплина, которая содержит формулы, рисунки, графики, таблицы. Таким образом, в режиме постоянного цейтнота качество размещаемых учебных материалов не может быть высоким [1].

Техническое оснащение дистанционного обучения у каждого преподавателя и студента находится на различном уровне и, работая в домашних условиях, невозможно использовать все возможности электронных средств обучения – это также приводит к ухудшению качества учебного материала.

Другая проблема – это обезличивание связки преподаватель-студент. С одной стороны, оценивание результатов выполнения заданий становится более объективной, по факту. С другой стороны, многие студенты не могут оформлять свои работы, не читают требований к выполнению заданий, к оформлению задания. Все это приводит к тому, что студент получает невысокие оценки. Очень сложно подробно изложить студенту его проблемы в процессе письменного общения или используя видеосвязь, поэтому у студента возникает много вопросов и претензий к преподавателю.

При этом студент не хочет понимать, что преподаватель должен уделить внимание не только одному студенту, но и всему потоку.

Многие студенты часто представляют на проверку не свои работы, многим из них удается обмануть бдительность преподавателя. А если нет, то студент больше не присылает выполненное задание. Очевидно, что это свидетельство недобросовестного отношения к выполнению заданий. Анализ показывает, что таких студентов немного, в разных группах от 5 до 10 процентов.

Ошибки, которые допустил студент, выполнивший задание первым, повторяются затем в работах других студентов. На эти ошибки можно указать при общем анализе ошибок. Но на ошибки каждого студента указать невозможно, просто не хватает времени при большом потоке работ.

Главная проблема – неумение студентов самостоятельно работать с незнакомым материалом, читать учебники и другую учебную литературу, составлять конспекты, делать выводы, отвечать грамотно на вопросы. К такому выводу можно прийти при анализе выполненных заданий.

Причем, данный вывод относится ко всем студентам даже тем, которые занимаются систематически, получают хорошие оценки, успешно сдают экзамены. На очных занятиях, в процессе диалога преподавателя и студента, а также студентов между собой при работе в группе, решить вышеперечисленные проблемы можно достаточно успешно, потому что имеется возможность получить ответ на вопрос или разобраться в непонятном материале в тот момент, когда это требуется.

Проверка заданий студентов на занятиях позволяет выявить самостоятельность при выполнении. Даже если задание списано, то всегда можно разобрать задание на занятиях и добиться понимания учебного материала большинством студентов. Качество усвоения учебного материала наиболее полно выявляется в процессе промежуточной аттестации, которая показала низкий уровень усвоения учебного материала практически у всех студентов.

Недостатков у системы дистанционного обучения достаточно много. Но есть и положительные моменты. Прежде всего, для преподавателя: это возможность применения новых методов представления учебного материала, формирования заданий, тестов, способов проведения занятий, контроля за систематической работой студентов.

Современные студенты не представляют своей жизни без современных электронных устройств, но часто не умеют пользоваться ими эффективно, чаще всего пользуясь их возможностями автоматически, не задумываясь. Дистанционное обучение заставляет их посмотреть на этот процесс с другой стороны: использовать не просто для получения информации, но для получения и усвоения знаний. Учит самодисциплине, заставляет само-

стоятельно работать, анализировать информацию, акцентировать важные моменты, делась правильные умозаключения и выводы. Этот метод обучения не учит самостоятельной работе, а просто заставляет научиться это делать. Учит внимательно и обдуманно вчитываться в инструкции, требования и комментарии, внимательно и тщательно выполнять задания. Оформление заданий и умение пользоваться различными форматами представления электронных документов также является положительным моментом при освоении электронного курса. Поэтому студентам необходимо изучение хотя бы одного электронного курса.

По итогам дистанционной работы можно сделать несколько выводов.

Во-первых, студенты не готовы учиться дистанционно. Предварительно нужно научить их учиться самостоятельно. Особенно это относится к первокурсникам.

Во-вторых, работа преподавателя при дистанционном обучении наиболее эффективна в малой группе (не более 50 студентов).

В-третьих, освоение студентами электронного курса является успешным средством заставить студентов организовать свою работу оптимально.

## ЛИТЕРАТУРА

Копылова И. Б. Проблемы и достижения современной системы электронного обучения //Материалы XVI региональной научной конференции. Хабаровск: Издательство ТОГУ, 2018. С.266-268.

УДК 372.853

### ПРИЧИНЫ СНИЖЕНИЯ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОЗНАВАТЕЛЬНОГО ИНТЕРЕСА В ПРОЦЕССЕ РЕШЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

**С. В. Ланкин**

Благовещенский государственный педагогический университет», г. Благовещенск

e-mail: [svlankin@yandex.ru](mailto:svlankin@yandex.ru)

*Одной из актуальных проблем физического образования в вузе и в школе является обучение решению физических задач. Решение задач позволяет приучить подростков к правильному и логичному рассуждению, критическому осмысливанию полученных результатов, вариативности мышления. Решение задач по физике – сложный процесс, требующий не только знаний математики и физики, но и специфических умений и навыков.*

*Научиться решать задачи – это научиться задавать себе вопросы и правильно отвечать на них, используя физические понятия, законы, что невозможно без понимания условия задачи. Процесс решения любой задачи представляет собой: восприятие и осмысление содержания, поиска плана решения, реализация плана и осмысление содержания. Формирование умения решать физические задачи должно начинаться с создания условий, обеспечивающих понимание ситуаций, описанных в задаче. В настоящее время наблюдается резкое понижение интереса к решению задач по физике. В статье раскрываются причины наблюдаемого явления, проведен анализ школьных и вузовских задачников по физике, указаны типы задач, пути повышения познавательного интереса в процессе решения задач.*

Хотелось бы отметить, что изучение физики нельзя сводить только к механическому запоминанию учебного материала. Использование проблемно-исследовательского метода познания позволяет развить личностную заинтересованность студента к учебной деятельности, активизировать память и творческое мышление. Интерес к исследовательской работе связан с новизной материала, сменой конкретных видов работы и игровыми элементами занятия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аганов А. В., Сафулин Р. К., Скворцов А. И. и др. Физика вокруг нас: качественные задачи по физике. М.: Дом педагогики. 1998. 336 с.
2. Гельфман Э. Г. Анализ текстов заданий школьных учебников физики // Вестник томского государственного педагогического университета. 2012. № 4 (119). С. 42-47.
3. Ефремова Н. А., Рудковская В. Ф., Витюк Е. С. О некоторых проблемах обучения физике в вузе // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 8 (1). С. 116-120.
4. Иванюк Ю. О., Ланкин С. В. Особенности занятий решения экспериментальных задач по физике в школе и в вузе // Физика и ее преподавание в школе и в вузе: Материалы Всероссийской научн. – практ. конф. Йошкар-Ола.: МГУ. 2016. С. 58-62.
5. Кадыров К. С., Курбаналиев М. Б. Решение физических задач как цель и метод обучения физике // Санкт-Петербургский образовательный вестник. 2017. № 4 (8). С. 32-36.
6. Коробкова Т. М. Развитие интеллектуальных способностей учащихся основной школы при обучении физике: автореф. дис....канд. пед. наук. М.: МГПУ. 2009. 22 с.
7. Низамов И. М. Методические основы формирования практических умений школьников в процессе решения физических задач: автореф. дис....докт. пед. наук. М.: Просвещение. 1990. 36 с.
8. Николаев В. И. О дидактических достоинствах курса физики // Физическое образование в вузах. 2006. Т. 12. № 2. С. 8-14.
9. Новодворская Е. М., Дмитриев Э. М. Методика проведения упражнений во втузе. М.: Высшая школа. 1981. 319 с.
10. Орлов В. Л., Сауров Ю. А. Методы решения физических задач. М.: Дрофа. 2005. 240 с.
11. Ослепников А. А., Ослепников Н. А. Виды задач в физике: их разнообразие в традиционных и цифровых учебных пособиях по предмету // Вестник пермского государственного гуманитарного педагогического университета. Серия: Информационные компьютерные технологии в образовании. 2010. № 3. С. 79-89.
12. Половникова Л. Б. Реализация развивающей функции обучения через решение физических задач // Молодой ученый. 2018. № 15 (201). С. 243-245.

УДК 378.147

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ТРАДИЦИОННОМ ОБУЧЕНИИ В ВУЗЕ

**В. В. Насыров<sup>1</sup>, М. Г. Насырова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

<sup>2</sup>Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск  
e-mail: [000612@pnu.edu.ru](mailto:000612@pnu.edu.ru)

*В работе описывается опыт интеграции автоматизированного тестирования в балльно-рейтинговую систему оценивания курса общей физики.*

В 2014 г. на основе платформы Moodle была создана компьютерная система онлайн тестирования студентов [1, 2], включающая достаточно обширный банк задач по курсу

общей физики, сформированный коллективом авторов кафедры физики ТОГУ [3]. С тех пор данная система успешно применялась сотрудниками кафедры для проверки остаточных знаний студентов как очной, так и заочной форм обучения. Стоит заметить, что при подборе заданий банка, в первую очередь, ставились две задачи: проверка минимальных итоговых знаний и их автоматизированная оценка. Разработанная система являлась вспомогательным средством; при этом основной контингент студентов проходил итоговый контроль непосредственно в «живом» общении с преподавателем, поэтому большую часть заданий составляли качественные задачи, предполагающие выбор ответов из заданного перечня. Задания с открытыми и множественными вычисляемыми ответами, хотя и присутствовали, давали не очень большой вклад в итоговую оценку теста. Так как предполагалось, что тестирование проводится в учебной аудитории и процесс контролируется преподавателем, то это обеспечивало достоверность итоговой оценки знаний студентов.

В связи с изменяющимися условиями обучения и частичным или полным переходом к дистанционному обучению возникают новые задачи [4], решать которые также можно на основе развития имеющейся системы тестирования.

Очевидно, что умение решать задачи – это один из основных критериев усвоения курса физики. При традиционном подходе к очному обучению, навык решения физических задач студент получает на практических занятиях, когда на занятии под руководством преподавателя коллективно изучаются методы решения на примере типовых задач. Однако, для выработки требуемых рабочей программой навыков и для качественного проведения практических занятий, нужен не просто индивидуальный подход к каждому студенту со стороны преподавателя, но и активное участие в обсуждении решения со стороны студента, чего часто трудно добиться из-за слабой мотивированности студентов, особенно на младших курсах. При переходе к дистанционной форме обучения мотивация к самостоятельной работе по отработке навыков решения различных задач является также одной из задач, решаемых системой тестирования.

Опыт перехода к дистанционному проведению различных видов занятий в 2019–2020 учебном году показал, что традиционные подходы и технологии, используемые при очном обучении студентов должны быть существенно пересмотрены. Так как, из-за наличия в сети интернет множества источников, с размещенными базами уже решенных задач из основного перечня рекомендованных сборников задач сильно возросло количество несамостоятельно выполненных студенческих заданий. В результате преподаватель проверяет «списанную» работу, а студент не получает реальных знаний. Поэтому обеспечение достоверности оценки в случае, если студент проходит тестирование удаленно, также должно обеспечиваться средствами системы тестирования.

В ТОГУ достаточно оперативно была создана централизованная система электронного обучения, также основанная на платформе Moodle, что позволило интегрировать в нее банк задач кафедры с одновременным внесением элемента уникальности в стандартные условия задач и качественным изменением состава тестовых заданий: мы существенно увеличили в тестах количество заданий с открытыми ответами. Отметим, что в Moodle имеется возможность автоматического использования в xml-коде задания заранее заданных наборов числовых данных. Это позволяет формировать уникальное условие для каждой задачи внутри каждой новой попытки прохождения теста, что подразумевает, как минимум, необходимость выполнения индивидуальных расчетов для получения количественных ответов в процессе решения заданий такого теста. В качестве примера (рис. 1) приведем задачу из сборника [5], решение которой легко ищется в любой поисковой системе по поисковому запросу «Миномет установлен под углом к горизонту на крыше здания». В нашем случае для этой задачи задано 50 наборов данных в которых угол  $\alpha$  меняется от  $0^\circ$  до  $70^\circ$ , скорость  $v_0$  – от 40 м/с до 80 м/с, высота  $h$  – от 20 м до 50 м. Соответственно, даже если у обучающегося имеется готовое шаблонное решение, то для рас-

чета правильного ответа обучающийся должен выполнить анализ решения, расчетной формулы и произвести собственные вычисления.

Таким образом, всегда будет присутствовать этап, на котором обучающийся получит минимальные навыки при решении задачи.

Миномет установлен под углом  $\alpha = 43^\circ$  к горизонту на крыше здания, высота которого  $h = 26$  м. Начальная скорость мины  $v_0 = 58$  м/с. Определить время  $t$  полета мины.

$\tau =$   с.

Ускорение свободного падения  $g = 9.8$  м/с<sup>2</sup>. Сопротивлением воздуха пренебречь.

*Рис. 1.* Вид задачи с открытым вычисляемым ответом в Moodle

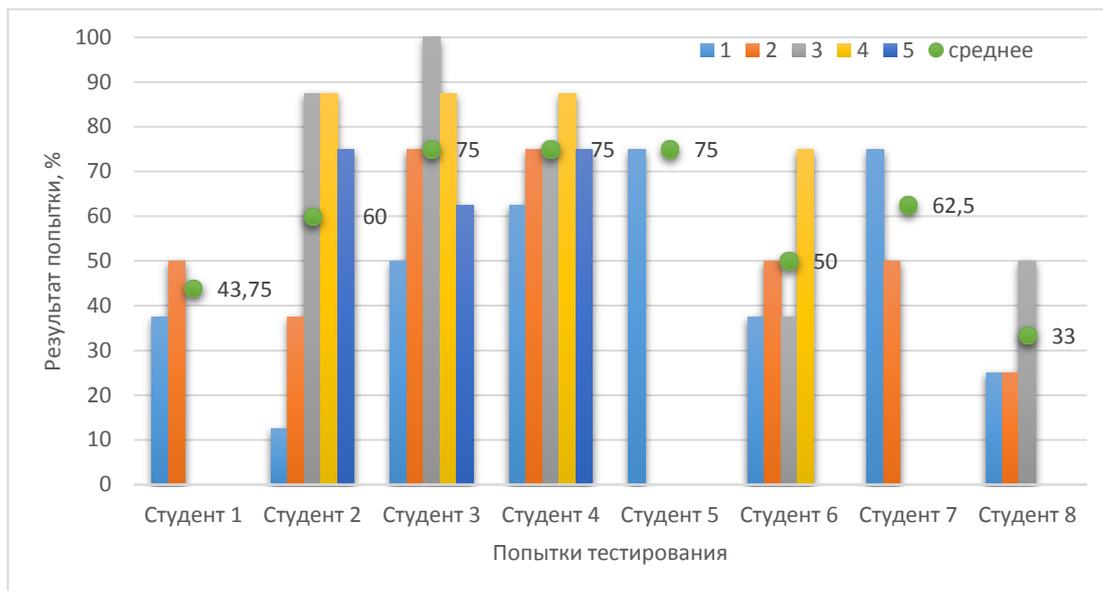
В 2020-2021 учебном году в системе электронного обучения автором созданы учебные курсы по дисциплине «Физика», в которых каждому практическому занятию, проводимому в очном режиме, соответствует тест из 8 – 10 заданий средней сложности с открытыми ответами (аналогичными рис. 1). Так как предполагалось, что тест выполняется студентом после каждого очного практического занятия, то такое регулярное автоматизированное тестирование, может быть как количественным индикатором качества усвоения учебного материала, так и критерием оценивания текущей работы студента в течение семестра. Предполагается, что результаты тестирования входят в итоговую оценку за курс, выставляемую в рамках балльно-рейтинговой системы.

Студентам были предложены следующие условия выполнения и оценивания тестов в системе электронного обучения:

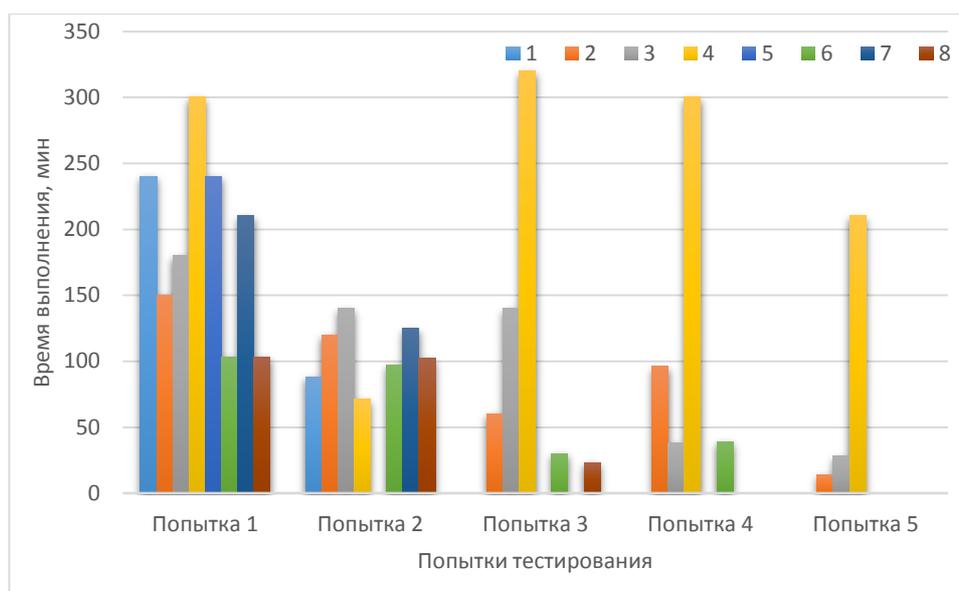
1. Тест может быть пройден в любое время (как до, так и после практического занятия).
2. Тест считается пройденным, если правильно выполнено 50% его заданий.
3. Тест может быть выполнен повторно для увеличения процента правильно решенных заданий (максимально допускается 5 попыток).
4. При повторном выполнении автоматически изменятся числовые параметры всех заданий теста, поэтому потребуется пересчитать ответы ко всем заданиям.
5. При повторном выполнении теста итоговая оценка будет считаться как среднее арифметическое по результатам всех попыток.
6. Результаты теста учитываются в балльно-рейтинговой системе оценивания всего курса.

На рис. 2 и рис. 3 представлены обезличенные результаты прохождения такого теста одной из учебных групп.

На гистограмме рис. 2 в столбцах отображаются последовательные попытки прохождения теста. Отметим, что за исключением студента 5, тестируемые выполнили больше одной попытки, и усредненная итоговая оценка, обозначенная на диаграмме точками, выше результатов начальных попыток. Тестируемый «студент 5» приступил к тестированию одним из последних, возможно уже располагал «типовым» решением. «Студент 8» прекратил попытки, как только смог набрать минимальный балл. На гистограмме рис. 3 в столбцах отображаются время выполнения теста в попытке каждым студентом. Как и следовало ожидать, в целом время тестирования сокращается при каждой следующей попытке.



**Рис. 2.** Результат тестирования



**Рис. 3.** Результат тестирования

Опыт использования автоматизированных тестов в рамках системы электронного обучения в курсе общей физики в первом семестре 2020-2021 учебного года уже показал, введение рейтинговой системы оценки определенно является фактором, стимулирующим мотивацию учебной деятельности части студентов. Достаточно большое время выполнения студентами теста может свидетельствовать о том, что процесс выполнения был самостоятельным, так как в случае несамостоятельного выполнения обычно предпринимается только одна попытка, которая сразу является успешной. Напомним, что в повторных попытках изменяются числовые параметры условия заданий, поэтому студент повторяет повторный расчет и в части правильно решенных задач, закрепляя навык получения правильного решения.

В заключение отметим, что основной целью тестирования как составного элемента балльно-рейтинговой системы является отслеживание прогресса и оценка результатов работы обучающихся, которые позволяют

- студенту – адекватно представлять свой уровень полученных знаний и, учитывая набранные баллы, прогнозировать свою итоговую оценку за курс;
- преподавателю – контролировать самостоятельную работу студентов, получать оценку усвоения пройденного материала и, при необходимости, корректировать траекторию работы студента по изучению предмета «физика».

Интеграция автоматизированного тестирования в балльно-рейтинговую систему позволяет повысить роль самостоятельной работы студентов, как составной части всей системы обучения, и помогает оптимизировать внеаудиторную работу. И студенты, и преподаватели получают объективную и достоверную картину хода образовательного процесса. Это ведёт к повышению эффективности учебного процесса, а также способствует повышению качества обучения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Центр тестирования кафедры физики ТОГУ [Электронный ресурс]. URL: <http://fizika-test.khstu.ru>. 12.10.2020.
2. Насыров В. В., Насырова М. Г. Автоматизированная система тестирования и контроля знаний на базе LMS Moodle // Физика: Фундаментальные и прикладные исследования, образование: Двенадцатая региональная научная конференция, Хабаровск, 2013. С. 325
3. Система компьютерного контроля знаний студентов и банк тестовых заданий по физике: учеб. пособие / Насыров В. В., Брюханова Т. Н. Римлянд В. И.; под ред. В. В. Насырова. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2014. 195 с.
4. Калачев Н. В. Проблемы и особенности использования дистанционных образовательных технологий в преподавании естественнонаучных дисциплин в условиях открытого образования [Электронный ресурс]: монография. Электрон. текстовые данные. Москва: Издательский дом Московского физического общества, 2011. 103 с.
5. Чертов А. Г., Воробьев А. А. Задачник по физике: учебное пособие для вузов. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2003. 640 с.

УДК 378 : 37.09

## ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ В УСЛОВИЯХ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

**А. Б. Пагубко**

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail.ru: [005981@pnu.edu.ru](mailto:005981@pnu.edu.ru)

*Прогресс в развитии компьютерной техники и систем программирования явились решающим фактором широкого внедрения этих новых средств в процесс обучения.*

Одним из направлений применения компьютеров в учебном процессе – обеспечение лабораторного практикума по физике. Наиболее интересным оказался подход моделирования физических процессов, осуществляемых в лабораторных работах при изучении соответствующих разделов физики. На первых этапах в создании виртуальных лаборатор-

ных работ основную роль играли программисты, что негативно сказывалось на их качестве как обучающих систем. Наблюдалось излишнее увлечение эффектными деталями возможности компьютерной техники в ущерб более правдоподобной версии протекания физического процесса в учебном эксперименте. Только когда к разработке привлекались методисты, специалисты в области преподавания физики, виртуальный практикум превращался в добротный инструмент учебного процесса, повышая эффективность понимания физики изучаемого явления.

Процессу внедрения в обучение виртуальных лабораторных работ способствовали следующие факторы:

1. Возможность обходиться без физического приборного оборудования и лабораторной оснастки, особых требований охраны труда.

2. Отпадает необходимость иметь в наличии в учебном заведении чисто физических лабораторий.

3. Возможность сокращения времени на проведение учебных экспериментов физического практикума.

4. Возможность ознакомления обучающихся в ходе учебных экспериментов с опасными физическими явлениями, проведение которых требует специальных лабораторий с защитой от вредных факторов этих явлений.

5. Возможность выполнения лабораторных работ вне стен учебного заведения.

Однако анализ результатов усвоения обучающимися практических навыков работы с приборами и иным лабораторным оборудованием показал, что полная замена практикума на виртуальный не приемлема. Общение с приборами только на экране компьютера не позволяет студенту правильно осуществлять действия с реальным оборудованием с учетом реальной опасности при нарушении правил ТБ.

Кроме того, снимаемые в разное время в процессе выполнения лабораторной работы показания приборов были одинаковыми, отсутствовал разброс значений обусловленный в реальном эксперименте наличием случайных факторов, обеспечивая так называемую случайную погрешность. Немалое значение оказание вреда здоровью создает слишком длительное использование компьютера [1, 2].

Развитие информационных технологий расширило возможности в области трансляции информации визуального характера, которыми являются мультимедиа проекты. Изначально создаваемые как основа компьютерных игр данные технологии оказали существенный вклад в совершенствование учебного процесса [3, 4]. Современные средства компьютерного моделирования уже позволяют более детально воспроизводить саму лабораторную работу и обеспечивает наличие действия случайных факторов при снятии показаний. В качестве примера может служить компьютерное приложение, называемое Unreal Engine версии 4.24.3 со встроенным модулем физики (т.н. физический движок) NVIDIA PhysX [5-8].

Хотя новые возможности информационных технологий позволили избавиться от ряда негативных факторов виртуальных лабораторных работ, полностью отказываться от реального эксперимента еще рано. Предлагается использовать виртуальные работы совместно с реальным учебным практикумом [9] или в качестве тренажера перед проведением реальной лабораторной работы [10].

На основе успехов в области информационных технологий и существенных достижений в развитии сети Internet в образовательный процесс уверенно входит система дистанционного обучения. Однако, многих проблем обусловленных особенностью использования компьютерного моделирования эта система не решает. Кроме того, появляются новые проблемы, главная из которых контроль личного участия обучаемого в учебном процессе. При дистанционном обучении возникает сложность выполнения виртуальных лабораторных работ, так как компьютерная разработка накладывает определенные требования на техническое обеспечение. Так, например, для четвертой версии Unreal Engine, о

которой говорилось выше, необходимо иметь: 64 – битную операционную систему Windows 7; четырехъядерный процессор Intel или AMD с тактовой частотой 2.5 ГГц; видеокарту NVIDIA GeForce 470 GTX с поддержкой DirectX11 или AMD Radeon 6870; 8 Гб оперативной памяти.

И так, если при дистанционном обучении применять в качестве лабораторного практикума только виртуальные работы, то навыков использования физических приборов сформировано не будет, а главное нет однозначного доказательства справедливости изучаемых закономерностей физических явлений.

Безграничные возможности компьютерного моделирования позволяют создавать реалистично явления и действия, не имеющие место в действительности, из-за чего и в двадцать первом веке мы сталкиваемся с возрождением средневековых взглядов на окружающий мир.

Отсутствие умения пользоваться реальными приборами и другим физическим оборудованием порождает у обучающихся в основном два совершенно противоположных подхода к действию с реальными устройствами таких как «паническая боязнь» и «полное бесстрашие».

Конечно, есть студенты, адекватно реагирующие в такой ситуации, но число таких не является большинством особенно для направлений подготовки не связанных в основной деятельности с приборами. Разумная осторожность и является основой охраны труда и техники безопасности.

Таким образом, при дистанционном обучении нельзя лабораторный практикум по физике составлять только из виртуальных работ на основе компьютерного моделирования как бы реалистично они не выглядели.

Необходимо включать лабораторные работы, выполнения которых осуществляется без использования компьютеров.

Естественно возникает вопрос, где взять оборудование? Эта проблема не требует больших затрат студенту при проведении работ по разделам дисциплины «Физика», таким как, «Механика» (кинематика, динамика, механика вращательного движения, деформации твердых тел, гидро-(аэро-)статика и динамика), «Колебания и волны (механические)», «Молекулярная физика и термодинамика», «Оптика» (дифракция, геометрическая оптика).

Наиболее просто осуществить экспериментальное изучение физических закономерностей по разделу, посвященному колебаниям маятников. Из инструментов требуется линейка и секундомер.

Изготовление маятников (математического, пружинного, физического) по рекомендациям методических указаний несложно. Широкое распространение смартфонов и других мобильных компьютерных систем и измерительных приложений к ним, а также наличие видеокамер во многом решает вопрос о фиксации элементов движения физических тел в экспериментах по динамике. Возможность рассмотрения по кадрам с указанием времени поможет при проведении опытов на устройстве подобном машине Атвуда и так далее.

Такое приложение как «угломер» позволяет исследовать вопросы внешнего трения. Отражательную дифракционную решетку можно создать из лазерного диска для записи информации. При помощи данной решетки можно исследовать спектры ламп накаливания, люминесцентных ламп, светодиодов и других источников бытового освещения.

Наиболее сложно в домашних условиях осуществлять экспериментальное изучение разделов «Электричество и магнетизм», «Квантовая физика», «Ядерная физика». Большая часть лабораторных работ из этих разделов не может проводиться без специальных приборов и оборудования.

Один из возможных путей – это выполнение лабораторных работ на физическом оборудовании обычной средней школы в районе проживания обучаемого или использование специализированных наборов для юного техника (электрика и т.п.).

Основой лабораторных работ для дистанционного обучения могут послужить материалы, издаваемые под маркой «Занимательная физика» (например, [11, 12]) и «Самодельные физические приборы и демонстрационный эксперимент» [13, 14]. Причем учебная литература старых изданий или литература, предназначенная для школьников, является предпочтительной, так как позволяет формировать материальную основу лабораторных опытов из подручных средств, из широко распространённых материалов.

Таким образом, отказываться от лабораторного практикума, выполняемого на реальном оборудовании и приборах (традиционная форма проведения лабораторного практикума по физике), нельзя даже в условиях дистанционного обучения.

В тоже время как показывает опыт сочетание традиционной формы с компьютерным физическим практикумом в лучшей степени обеспечит усвоение физического материала и будет способствовать повышению роли самостоятельной работы студентов, а также укреплению межпредметных связей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Техника безопасности при работе на ПК. URL: <http://www.znakcomplect.ru/novosti/example/stati/tehnika-bezopasnosti-pri-rabote-na-pk.html>.
2. Техника безопасности при работе с компьютером. URL: <http://znaybiz.ru/kadry/oxrana-truda/ocenka-usloviy-truda/tehnika-bezopasnosti-pri-rabote-s-kompyuterom.html>.
3. Падерин В.Н. Использование мультимедиа технологий в обучении студентов вузов. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-multimediynyh-tehnologiy-v-obuchenii-studentov-vuzov/viewer>.
4. Кучай А. В. Интеграция мультимедийных технологий в процесс обучения // Балтийский гуманитарный журнал. 2014. № 4. С. 85-87.
5. Unreal Engine – игровой движок, разрабатываемый и поддерживаемый компанией Epic Game. URL: [https://gamegod.fandom.com/ru/wiki/Unreal\\_Engine](https://gamegod.fandom.com/ru/wiki/Unreal_Engine).
6. Блинцов А. Unreal Engine 4 для инди и прототипирования. URL: <https://vc.ru/pixonix/51306-ue4-guide>.
7. Документация по Unreal Engine 4. URL: <https://docs.unrealengine.com/en-US/index.html>.
8. Технология NVIDIA PhysX. URL: <https://hyperpc.ru/for-buyers/faq-and-articles/articles/nvidia/physx>.
9. Пагубко А. Б. Об опыте проведения реального и виртуального лабораторных практикумов по физике в вузе // Бюллетень научных сообщений. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2011. № 16. С. 35-40.
10. Кривоногов С. В., Петров В. А. Применение информационных технологий в обучении как средство повышения качества образования // Карельский научный журнал. 2015. № 3 (120). С. 15-19.
11. Горев Л. А. Занимательные опыты по физике в 6-7 классах. М.: Просвещение, 1977. 152 с.
12. Покровский С. Ф. Опыты и наблюдения в домашних заданиях по физике. М.: Изд-во АПН РСФСР, 1963. 415 с.
13. Резников З. М. Прикладная физика: учеб. пособие для учащихся по факультатив. Курсу 10 кл. М.: Просвещение, 1989. 239 с.
14. Терентьев М. М. Демонстрационный эксперимент по физике в проблемном обучении. М.: Просвещение, 1978. 104 с.

## ПРОБЛЕМЫ ПРЕПОДАВАНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ «ИСТОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ ФИЗИКИ»

А. Б. Пагубко

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск  
e-mail: [005981@pnu.edu.ru](mailto:005981@pnu.edu.ru)

*Главная трудность в преподавании дисциплины «История и методология физики» при самом удачном расположении ее в структуре учебного плана заключается в большой диспропорции между огромным фактическим материалом и количеством отпущенного на изучение времени.*

В учебном плане направления подготовки бакалавров физики на нее выделяется две зачетные единицы (это 72 часа). Конечно, в рамках истории физики этого недостаточно для полноценного ознакомления с историческим наследием науки. Как отмечают многие авторы [1-3], часто курс переходит в форму справочника по открытиям в физике с соответствующим списком имен ученых, или в изложение одного-двух из направлений в физике. Ни тот, ни другой подходы не могут быть приемлемы из-за свойственной им односторонности, что сужает поле возможной специализации выпускника.

История научного познания предполагает разъяснение, как появляется из незнания само знание, как развивается, его место и роль в обществе. То есть, предполагает поиск неких законов научного творчества. Однако довольно часто логика появления и развития физических идей входит в противоречие с хронологией исторических событий, что говорит о сложности процесса отражения в сознании факта познания. Нельзя не учитывать существенное влияние на научные исследования способ производства материальных благ (исторические условия). Все это в целом предполагает преподавание дисциплины строить не только как представление рождения и эволюции значительных физических идей, но и, в некотором роде, как философию естествознания с использованием методологических представлений. Дать разъяснения по вопросам методологии науки не является простым. Методология как наука относится к разряду философских наук, которая решает задачи объяснения (понимания) организации деятельности для достижения определенных целей, и тесно связана с теорией познания [4]. В последние десятилетия сильно вырос поток информации по методологическим проблемам, что подменять собой философа в плане преподавания по этим вопросам было бы неразумно, ибо знания в этой области у большинства специалистов-естествоиспытателей недостаточно глубокие [5]. Кстати, многие философы не отличаются большими познаниями в физике, идеи которой берутся интерпретировать. Поэтому в чистом виде методологию научного познания использовать также проблематично.

Одной из возможностей может быть привлечение в вопросах методологии общую обязательную дисциплину «Философия». Однако, возможности этой дисциплины также весьма ограничены временными рамками учебного плана. Остается только опираться в своей деятельности на результаты освоения студентами ответов на главные вопросы: что определяет сознание? В чем смысл жизни? Да надеяться, что обучающиеся будут иметь научное мировоззрение [6, 7]. Некоторые авторы предлагают привлекать к формированию мировоззрения весь спектр философских учений, даже религиозного толка [6]. Но, как показывает жизненный опыт современного этапа развития общества обращение к религии способствует возрождению «средневековых» взглядов на окружающий мир. Ока-

залось, что в двадцать первом веке сформировалась категория людей слепо верующих в догматы ортодоксальных религий: Земля – центр Вселенной, Земля плоская и т.п. Поэтому акцентировать внимание на положительную роль религиозных учений в современном мире и особенно в плане формирования научного мировоззрения излишне. А вот обеспечить строго научное понимание мироздания без привлечения каких-либо чудес и творцов задача посложнее. И не стоит для направлений подготовки физиков и других категорий естественно-научных и инженерно-технических специальностей расходовать на эти догматы время. Итак, дисциплина «Философия» помогает подготовить студентов к восприятию окружающего мира как целостного объекта и определиться со своим местом в нем, привлекая некоторые знания из физики. Однако об овладении методологией научного познания говорить не приходится.

Поэтому исходить надо с позиций частного представления о методологии – методологии физики и формировать у студентов общих идей изучения физических явлений. Исходя из основополагающих принципов физики в рамках постановки проблемы определяются круг задач и объект исследования.

Далее разрабатывается или выбирается метод (или методы) исследования, который представляет собой совокупность приемов и способов, применяемых в той или иной сфере деятельности. В завершении подготовки к изучению явления отрабатывается методика реализации метода, как последовательность действий по достижению требуемого результата. Примером могут служить работы по определению скорости света, начало которым положил разработанный Г. Галилеем способ экспериментального определения этой скорости. Реализация способа Галилея привела к созданию и совершенствованию целого ряда методов: метод прерываний Физо, метод вращающегося зеркала Фуко, метод радиогеодезии Аслаксона, микроволновая интерферометрия Фрума и других [8].

Кроме того, обучение профессиональному мастерству в рамках подготовки в высшем учебном заведении всегда сопровождается явной или неявной воспитательной работой студентов педагогическим коллективом, несмотря на все изменения в системе образования. Результатом обучения является не только формирование у выпускника соответствующих компетенций, но и привитие высокого корпоративного духа причастности к славной когорте профессионалов, в частности – к физикам.

Можно сказать, что это также работа на перспективу, которая заключается в привлечении выпускников школ и других образовательных организаций к поступлению на специальность, повышение имиджа направления подготовки, привлечение спонсоров, формирование сообщества выпускников и т.п. В первую очередь это достигается качественной системой преподавания, развитой инфраструктурой и добрыми отношениями между обучаемыми и преподавателями (личный пример, работа кураторов, организаций студенческого самоуправления, работа деканата и кафедр).

Большую роль в такой воспитательной работе могут играть многие обще профессиональные дисциплины при условии их общей направленности в формировании компетенций. И одной из таких дисциплин является «История и методология физики». Обращаясь в процессе преподавания дисциплины к знаниям студентов в области физических наук, к их умениям и навыкам приобретенным при научных исследованиях экспериментального и теоретического характера и происходит завершающая стадия формирования профессионала.

Таким образом, преподавание дисциплины «История и методология физики» в рамках отпущенного общей образовательной программой времени должно и может решать следующие задачи: доводить до студента логику возникновения и развития основных физических идей и взглядов; учить умению определять физическую проблему и искать пути решения подбором приемов и способов; формировать идею сопричастности наших выпускников к достижениям науки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев П. С. Курс истории физики. М.: Просвещение, 1974. 312 с.
2. Спасский Б. И. История физики. В 2 ч. М.: ВШ, 1979. Ч.1 320 с., Ч.2 308 с.
3. Милантьев В. П. История и методология физики. М.: РУДН, 2007. 351 с.
4. Новиков А. М., Новиков Д. А. Методология. М.: СИНТЕГ, 2007. 668 с.
5. Гинзбург В. Л. Замечания о методологии и развитии физики и астрофизики // «Диалектика в науках о природе и человеке / Диалектика, мировоззрение и методология современного естествознания» / Труды III Всесоюзного совещания по философским вопросам современного естествознания. М.: Наука, 1983. С.71-110.
6. Арутюнян М. П. Философия как мировоззрение и учебная дисциплина: традиции и современные проблемы высшей школы // Проблемы высшего образования : материалы междунар. науч.-метод. конф., Хабаровск, 6–8 апр. 2016 г. : в 2 т. / под ред. Т. В. Гомза. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. Т. 2. С. 10-13.
7. Селеверстова Г. А. Какая философия нужна студенту? // Проблемы высшего образования : материалы междунар. науч.-метод. конф., Хабаровск, 11–13 апр. 2018 г./ под ред. Т. В. Гомза. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. С.104-107.
8. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: Наука, 1976. 928 с.

УДК 378.147

### АСИНХРОННОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ КАК ИНДИКАТОР СТЕПЕНИ САМОСТОЯТЕЛЬНОСТИ И САМООРГАНИЗОВАННОСТИ СТУДЕНТОВ

А. С. Стукалова

Дальневосточный государственный медицинский университет, г. Хабаровск  
e-mail: [stukalovaanna@mail.ru](mailto:stukalovaanna@mail.ru)

*Асинхронное дистанционное обучение объективно требует от обучающихся умения самостоятельно получать знания, находить и эффективно использовать новые информационные ресурсы, быть готовым к освоению новых учебных приемов и методов. Переход к данной форме обучения успешно поддерживается студентами при наличии сформированных навыков самостоятельности и высокой самоорганизованности. Анализ результатов проведенного анкетирования студентов первого курса выявил ряд проблем, связанных с становлением и развитием самообразования в процессе дистанционного обучения.*

Временный переход на дистанционное обучение в сложных медико-социальных условиях в недавнем прошлом оказался своеобразным учебно-методическим и психолого-педагогическим вызовом для многих образовательных учреждений. Были выявлены и исправлены недочеты работы собственных электронных образовательных ресурсов, аккумулированы и переработаны с учетом новых требований имеющиеся дидактические материалы, найдены оптимальные формы общения студентов и педагогов. Новый формат учебного процесса потребовал от обучающихся проявить и развить такие личностные качества как самостоятельность, саморегуляцию, самоорганизованность.

С целью оценить эффективность применяемых дистанционных технологий, способы работы и формы общения участников образовательного процесса, определения уровня

самостоятельности и самоорганизованности студентов кафедрой физики, математики и информатики ДВГМУ было проведено анкетирование обучающихся.

Анкета представляла собой несколько блоков, состоящих из 10 тематических вопросов, ответы на которые включали систему баллов 0, 1 или 2, в зависимости от личной позиции опрашиваемого. В настоящей работе использовались материалы проводимого в конце 2 семестра 2019-2020 учебного года анкетирования 18 студентов 1 курса педиатрического факультета, которые в исследуемый период дистанционно обучались дисциплине «Физика, математика».

При анализе ответов респондентов было выявлено, что контент образовательной платформы (календарно-тематический план, представленные лекционные материалы, тестовые вопросы и практические задания) не полностью удовлетворяет опрашиваемых: 44% убеждены, что нужно иметь личные контакты (телефон, почта) преподавателя для решения учебных ситуаций, 44% возникающие вопросы предпочли обсуждать в рамках личного кабинета кафедры или личного кабинета студента. В случае технического сбоя работы образовательной платформы, 67% опрашиваемых считают необходимым информировать об этом преподавателя, 28% предпочли принять другие меры, поскольку техническое сопровождения не относится к компетенции педагога.

Функцию преподавателя опрашиваемые (11%) видят не только в подготовке содержания дисциплины в различных формах и еженедельном выставлении отметок, но и в регулярных комментариях выполненных заданий с целью устранения имеющихся пробелов образовании (89%). При работе с лекционным материалом 50% опрашиваемых студентов отмечали, что им не хватает живого непосредственного общения с преподавателем. Значимая часть респондентов (28%) считает, что педагог должен следить как содержательной стороной ответов студентов, так и временной, напоминать о сроках сдачи заданий. При этом тьюторскую службу для курирования этапов дистанционного обучения и решения вопросов организационного характера опрашиваемые практически отвергают (83% против, 17% считают возможным иногда обращаться к нему за помощью).

По вопросу создания и активной работы т.н. новостного форума (раздела с публикацией наиболее важных учебных сообщений и общих объявлений от преподавателей) для быстрого обмена учебной информацией мнения опрашиваемых разделились: 22% считают это излишним, поскольку необходимую информацию им сообщит староста группы, 45% все вопросы предпочитают решать в рамках личного кабинета кафедры/студента, 33% приветствуют работу данного раздела.

Анализ ответов по организации собственной самостоятельной работы студента выявил высокую степень технической оснащенности респондентов и недостаточно сформированную психологическую и организационную стороны. Компьютер с высокоскоростным доступом к сети Интернет имеют 95% опрашиваемых, также есть собственное рабочее место со всеми необходимыми учебными условиями (89%). Однако начало учебного дня у респондентов приходится на 10-11 часов утра (73%), соответственно, конец ежедневной учебной нагрузки приходится на более позднее время (10-11 часов вечера – 22%), в том числе и в ночное (61%). Перерывы в учебе на образовательной платформе университета респонденты заполняли не только выполнением домашних обязанностей (61%), но и перепиской с друзьями и общением в социальных сетях (28%).

Студенты отметили, что не успевали выполнять учебные поручения в срок в силу неумения правильно распределить свое время (33%), по причине непредвиденных ситуаций (50%) или не рассчитывали на трудоемкость и объем данного задания (17%). По их собственным оценкам, уровень собственной мотивации к самостоятельному обучению у них средний, периодически теряют интерес к обучению, приходится мобилизовать свои силы и энергию (50%), приемы и методы эффективного планирования пытаются использовать, но первоначальные планы рушатся (67%).

Таким образом, результаты проведенного опроса выявили ряд определенных проблем, связанных со способностью студентов формировать навыки самообразования.

Умение самостоятельно добывать необходимые знания в процессе получения высшего образования, находить и активно использовать новые источники информации являются ключевыми компетенциям будущих специалистов. Формирование навыков самообразования и самореализации личности являются, в числе прочих, основными целями и задачами образования согласно Национальной доктрине образования РФ [1]. Национальная доктрина образования для разностороннего и непрерывного развития детей и молодежи ставит задачу формирования целостного миропонимания и современного научного мировоззрения через систематическое обновление всех аспектов образования, отражающего изменения в сфере культуры, экономики, науки, техники и технологий. Умение самостоятельно получать знания, находить и эффективно использовать новые информационные ресурсы, быть готовым к освоению новых профессиональных приемов и методов – главный результат образования выпускника высшего учебного заведения. Вынужденный временны переход с традиционных форм обучения на дистанционные выдвинул на первое место не только роль информационных технологий в образовании, но и проблему образовательной самостоятельности обучающихся.

Под данной самостоятельностью учащихся, как правило, понимают его сформированную в достаточной мере способность осознавать конечную цель познавательной деятельности, умение формулировать конкретные задачи для ее достижения, выстраивания оптимальных алгоритмов действий для решения данных задач.

Автор [2] предлагает в содержание образовательной самостоятельности обучающихся внести пять составляющих: целевую, мотивационную, когнитивную, деятельностную и оценочную.

Первый компонент заключается в совпадении цели данной учебной деятельности и собственных задач саморазвивающейся личности, способности выработать новые значимые личностные качества под влиянием образовательного процесса. Целевой компонент диктует выбор способов и действий, выступает инструментом управления и сверки результатов действий с ожидаемым результатом.

Второй компонент, мотивационный, заключается в том, что если личностные задачи совпадают с предложенными образовательными, то удовлетворяется потребность в самореализации личности через формирование конструктивного интереса, развивается внутренняя мотивация к самостоятельным действиям учащегося, учебная деятельность становится одной из побудительных сил развития личности, его самостоятельности и творческому подходу к решению проблем.

Третья, когнитивная составляющая, диктует необходимость перехода новых знаний, вновь получаемой информации в собственный багаж знаний и умений через осознание ее ценности. Благодаря ей происходит совершенствования собственного образования через тщательный избирательный процесс обработки поступающего информационного потока.

Деятельностный компонент предполагает организацию учебной деятельности, выбор алгоритмов работы, планирование бюджета времени. Целью деятельностной составляющей является выработка и закрепление таких алгоритмов учебных действий и приемов, приводящих к умению самостоятельно и эффективно достигать цели, о развитии личностной креативности.

Пятый, оценочный компонент предусматривает сравнение результатов своей деятельности с целью. Завышенная или заниженная самооценка, по мнению автора [2], в условиях низкого уровня рефлексии собственной деятельности, нарушает адекватность выбранных форм оценивания своей и чужой проектной деятельности, вызывает несоответствие субъективных оценок личности объективным оценкам.

Отсутствие непосредственного контакта с педагогом и живого общения в образовательной деятельности в период дистанционного обучения не могло оставить без измене-

ния ни один из указанных компонентов образовательной самостоятельности обучающихся, как показал тщательный анализ результатов анкетирования.

Выявленные проблемы касаются, в основном, организации самостоятельной учебной деятельности, направленной на развитие и воспитание студенческой организационной и познавательной самостоятельности.

Первая проявляется в умении обучающихся грамотно распределить свой режим дня, поставить цель, спланировать и эффективно осуществить учебную работу.

Познавательная самостоятельность выражается в готовности изучать информацию без непосредственной помощи педагога, на основе конструктивных методов анализа, синтеза, самоконтроля. Показателями развития организационной и познавательной самостоятельности являются свободное и осознанное владение алгоритмами учебной работы, положительная динамика в развитии умений решать учебные и профессиональные задачи, рост степени независимости от педагогической помощи.

Дистанционные формы обучения уже в самой своей сути предполагают косвенное взаимодействие участников образовательного процесса средствами информатизации и телекоммуникаций.

Более того, обучение может иметь синхронный или асинхронный характер, что обусловлено объективными факторами, применением различных технических устройств при передаче образовательного контента. Синхронный подход (он-лайн обучение посредством видеолекций, чатов на практических занятиях и т.п.) практически идентичен аудиторному: идет непосредственный обмен информацией между всеми участниками, погружение в педагогический процесс в режиме реального времени. Асинхронное обучение не требует непосредственного взаимодействия обучающихся друг и другом и педагогом.

Предполагается, что они имеют строгий план предполагаемых действий и общаются, исходя из реальных сроков выполненных учебных задач и изученных материалов. Студент сам выстраивает свою образовательную траекторию, грамотно распределяя свои силы и время, сам контролирует сроки сдачи заданий, пользуясь современными средствами связи.

Асинхронное дистанционное обучение, на первый взгляд, выглядит привлекательным в силу своей независимостью от времени, возможностью обучаться в разном темпе усвоения материала и т.п. Навыки самостоятельной работы при этом становятся как ведущими, центральными факторами успешного обучения, так и необходимыми социально-востребованными качествами зрелой личности [3].

Отсутствие общего педагогического пространства от студентов первого курса потребовало максимальной целеустремленности и самоорганизованности, способности преодолевать трудности, с которыми они встречаются в процессе осуществления самостоятельной познавательной деятельности. Как показало анкетирование, значительная часть респондентов выявила незрелость и недостаточную сформированность личностных качеств (усидчивости, трудоспособности, внутренней мотивации).

В условиях асинхронного дистанционного обучения проблемы личностной дисциплины, отсутствие эмоционального контакта, ощущение собственной «изолированности» встали достаточно остро.

Выполнение данной работы предполагает уже устойчиво сформированных навыков самоорганизации, самопланирования и самоконтроля.

Для асинхронного дистанционного обучения студентов первого курса требуется переработка существующих традиционных форм самостоятельной работы, разработка новых нетрадиционных и дифференцированных приемов обучения, повышающих образовательную самостоятельность студентов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Национальная доктрина образования в Российской Федерации. URL: <http://sinncom.ru/content/reforma/index5.htm/> – 17.08.2020.
2. Глазова Ю. В. Компоненты и признаки образовательной самостоятельности учащихся // Психология, социология и педагогика. 2014. № 6 URL: <http://psychology.snauka.ru/2014/06/3319> – 26.09.2020.
3. Краснова Т. И. Моделирование асинхронного обучения // Молодой ученый. 2015. № 11. С. 1371-1373.

УДК 373.5.016

### ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТИВНОГО КУРСА «АЗБУКА АСТРОНОМИИ» ДЛЯ ОСНОВНОЙ ШКОЛЫ

**Н. С. Ткаченко, Т. А. Ерова**

Благовещенский государственный педагогический университет, г. Благовещенск  
e-mail: [natali0303044@gmail.com](mailto:natali0303044@gmail.com)

*Элективные курсы (курсы по выбору) – новый элемент учебного плана, играющий важную роль в системе профильного обучения в школе. В отличие от факультативных курсов, существующих сейчас в школе, элективные курсы обязаны оказать помощь учащимся основной школы повысить уровень изучения базового учебного предмета – «физика». Их введение – новый шаг построения системы современного школьного образования. Они решают проблемы актуализации и индивидуализации обучения. До последнего времени первая ступень курса физики 7-9 классов играла в основном роль базы для последующих систематических курсов физики старших классов (и астрономии, 11 класс). В физике описываются явления, закономерности, которые происходят в замкнутых, равновесных и обратимых процессах, однако окружающий мир един, в нём живое и не живое развивается по единым фундаментальным законам. Особенности протекания таких процессов, которые описываются законами самосохранения и самоорганизации можно изучать на элективных курсах. Предлагаемый элективный курс «Азбука астрономии» является подготовительным этапом для непрерывного изучения астрономических явлений и рассчитан на 17 часов. Элективный курс тесно связан с физикой и математикой, и опирается на ранее изученные предметы: окружающий мир, природоведение, географию и историю. В статье приведены цели, задачи курса, методы, формы работы, средства и результаты обучения.*

Преподавание астрономии в России имеет давнюю историю, которая прослеживается с петровских времен. В дореволюционных средних учебных заведениях был довольно солидный курс (космография, математическая география), рассчитанный на один год преподавания в старших классах (по 2 часа в неделю) и изложенный в десятках учебников, где основное внимание уделялось вопросам сферической и практической астрономии. В советской школе на протяжении десятилетий существовал курс астрономии (1 час в неделю) в выпускном классе.

В настоящее время астрономию перевели в число базовых предметов (до 2018 года в течение 20 лет в школах астрономия не преподавалась), что сыграло отрицательную роль на мировоззрение россиян (30 % считали, что Солнце вращается вокруг Земли). Иначе и быть не могло, поскольку мы уже живем в космической эре, которую открыла Человечеству наша страна 4 октября 1957 года. Современная астрономия выявила тесную взаимо-

связь между жизнью на Земле и свойствами космоса. Астрономия как «вершина» естествознания призвана обобщить и укрепить мировоззрение о Вселенной [1, 2]. Астрономическое образование должно начинаться с начальной школы, соблюдая преемственность и систематичность в обучении. Противоречия между советским курсом астрономии и настоящим существенны [3-8], что привело к изменению учебных программ, базовых учебников и методик преподавания. У учащихся интерес к Вселенной достигает максимума в 6-8 классах и спадает к 11 классу, т.к. у старшеклассников главным является сдача ЕГЭ, в котором по астрономии всего 2 вопроса. В связи с этим основные астрономические термины, явления, законы, формирующие мировоззрение о Космосе, должны рассматриваться и в основной школе по программам разной сложности. Для решения этой проблемы подходят элективные курсы, призванные способствовать формированию современной астрономической картины мира. Рассматриваемый в статье элективный курс «Азбука астрономии», является тем методическим арсеналом учителя, который направлен на повышение эффективности современного урока [9-14].

Курс рассчитан на 17 часов. Цель и задачи программы [5-7].

1. Образовательная цель: дать представление о развитии и структуре Вселенной и о месте Земли в ней.

2. Воспитательная цель: научить равному отношению к проблемам ввиду их незначительности в масштабах Вселенной.

3. Развивающая цель: развивать пространственное мышление через изучение положения объектов во Вселенной.

*Образовательные задачи:*

- а) ввести или продолжить формировать понятия, теории, закона, факта науки;
- б) ввести и продолжить формирование специальных умений и навыков;
- в) продолжить формирование общенаучных умений и навыков (планирование ответа, навыки работы с книгой, навыки самоконтроля, наблюдения).

*Воспитательные задачи:*

а) содействовать формированию основных мировоззренческих идей (материальность мира, причинно-следственные связи, развитие в природе, познаваемость мира и его закономерностей); б) воспитывать у учащихся бережное отношение к окружающему миру;

в) содействовать эстетическому воспитанию учащихся, знакомя их с эстетикой природы и науки.

*Развивающие задачи:*

а) для развития интеллекта научить выделять в материале главное, сравнивать и обобщать факты, логично излагать мысли, анализировать иллюстративный материал;

б) для развития воли и самостоятельности формировать умение преодолевать трудности (использовать при этом проблемные ситуации, творческие задания, наблюдения, и т. д.);

в) для развития эмоций создавать эмоциональные ситуации (удивление, радость, заинтересованность, парадоксальность), используя яркие примеры, иллюстрации;

г) для развития познавательных интересов регулярно сообщать на занятиях о новостях астрономии и космонавтики.

Содержание программы элективного курса предназначено для учащихся 6-9 классов. Элективный курс состоит из теоретической и практической частей. В теоретическую часть включено изложение основных тем курса. Практическая часть заключается в работе с подвижной картой звездного неба и школьным астрономическим календарем, наблюдениях, решении задач.

*Методы* проведения занятий разделены на четыре группы. Это методы информационные, наглядно-иллюстративные, дискуссионные и эвристические. Предпочтение на занятиях отдается наглядно-иллюстративным и дискуссионным методам.

*Формы работы:* лекции, видеопросмотры, беседы, экскурсии, практические занятия.

*Средства обучения*

- а) программы Физикона: «Открытая астрономия версия 2.6»
- б) подвижная карта звездного неба;
- в) школьный астрономический календарь;
- г) таблицы;
- д) слайд - фильмы и пояснительный материал, записанный на магнитную ленту;
- е) обучающая программа по астрономии по теме: «Эволюция Вселенной».

*Главные вопросы элективного курса:* предмет астрономии, что изучает астрономия, связь астрономии с другими науками, значение астрономии, творцы астрономии, основные объекты во Вселенной, звездное небо, мифы и легенды о звездном небе. Методы исследования небесных тел. Солнечная система, наша Галактика. Мир звезд [6, 7, 10].

Учащиеся, завершившие изучение элективного курса

*должны знать:*

- а) место астрономии в современной науке;
- б) строение Солнечной системы;
- в) законы движения небесных тел;
- г) физическую природу тел Солнечной системы;
- д) что такое звезды;
- е) виды галактик;
- ж) строение нашей галактики;
- з) о строении и эволюции Вселенной.

*должны уметь:*

- а) находить на небе основные созвездия Северного полушария;
- б) ориентироваться на местности;
- в) пользоваться подвижной картой звездного неба и школьным астрономическим календарем;
- г) решать простые астрономические задачи.

*Межпредметные связи:* география (географические координаты, часовые пояса), история (историческое развитие представлений о Вселенной), химия (состав, строение и свойства веществ, из которых состоят небесные тела), математика (знания тригонометрических функций, радианные меры углов, о пропорции и логарифме), физикой (кинематика, динамика, гравитация, магнитное поле).

Форма контроля и методы оценки знаний, умений и навыков учащихся: отчетность по итогам курса проводится в виде зачетных работ в конце каждого раздела (практическое задание или защита реферата).

На практических занятиях решаем, например, такие задачи [3, 10, 12]:

1. Какой наибольшей высоты достигает звезда Вега в Москве ( $\lambda=+38^{\circ}42'$ ;  $\phi=55^{\circ}45'$ ):

- а)  $56^{\circ}$ ; г)  $29^{\circ}$ ;
- б)  $45^{\circ}$ ; д)  $25^{\circ} 35'$ ;
- в)  $35^{\circ} 25'$ ; е)  $72^{\circ} 57'$ .

2. Видимое движение планет происходит:

- а) по окружности;
- б) по эллипсу;
- в) петлеобразно.

3. Большая полуось орбиты Марса 1,5 а.е. Чему равен звездный период его обращения вокруг Солнца:

- а) 2,76 г.; г) 0,74 г.;
- б) 1,32 г.; д) 1,96 г.;
- в) 7,41 г.; е) 1,86 г.

4. Перенос энергии из недр Солнца наружу осуществляется:

- а) теплопроводностью и излучением;

- б) теплопроводностью и конвекцией;
- в) излучением и конвекцией.

Теоретические вопросы, например:

1. От чего зависит светимость звезд?
2. Чем объясняется изменение яркости некоторых двойных звезд?
3. Как называются пульсирующие звезды, которые периодически изменяют линейные размеры?
4. Как должна была бы вращаться вокруг оси Луна, чтобы одна ее половина всегда освещалась Солнцем?

*Форма контроля и методы оценки знаний являются тесты, например [6, 10]:*

1. Астрономия изучает:
  - А. Звезды и другие небесные тела.
  - Б. Законы строения, движения и эволюции небесных тел.
  - В. Законы движения ИСЗ и применение небесных законов на практике.
2. Астрономию необходимо знать:
  - А. Для того, чтобы ориентироваться по звездам.
  - Б. Чтобы сформировать научное мировоззрение.
  - В. Так как интересно узнать как устроен мир.
3. По каким орбитам движутся большие планеты вокруг Солнца?
  - А. По окружностям.
  - Б. По эллипсам, близким к окружностям.
  - В. По параболам.
4. Как изменяются периоды обращения планет с удалением планеты от Солнца?
  - А. Чем дальше от Солнца, тем больше период обращения планеты вокруг Солнца.
  - Б. Период обращения планеты не зависит от ее расстояния до Солнца.
  - В. Чем дальше планета от Солнца, тем меньше ее период обращения.
5. Кроме Солнца и больших планет в Солнечную систему входят:
  - А. Звезды.
  - Б. Кометы.
  - В. Спутники планет.
6. Первой космической скоростью является:
  - А. Скорость движения по окружности для данного расстояния от притягивающего центра.
  - Б. Круговая скорость для поверхности Земли.
  - В. Параболическая скорость для поверхности Земли.
7. Без какого утверждения немыслима гелиоцентрическая теория:
  - А. Планеты вращаются вокруг Солнца.
  - Б. Планеты вращаются вокруг Земли.
  - В. Земля имеет форму шара.
8. Почему мы видим с Земли только одну сторону Луны?
  - А. Луна не вращается вокруг своей оси.
  - Б. Звездный период Луны равен одному обороту вокруг оси.
  - В. Земля и Луна одинаково вращаются вокруг оси.
9. Почему Солнечные затмения происходят редко?
  - А. Луна вращается вокруг Земли по эллипсу.
  - Б. Луна неравномерно вращается вокруг Земли.
  - В. Плоскость орбиты Луны наклонена к плоскости орбиты Земли.
10. Какова продолжительность суток на луне с точки зрения Земли?
  - А. Около двух недель.
  - Б. Около месяца.
  - В. Около недели.

#### 11. Сколько времени идет свет от Солнца до Земли?

А. Проходит мгновенно.

Б. Примерно 8 минут.

В. 1 световой год.

В заключении следует отметить. Элективные курсы выбираются самими учащимися и они должны соответствовать их потребностям, желаниям. Цель проведенной работы заключалась в том, чтобы выявить степень заинтересованности учащихся, их родителей, проведение элективного курса «Азбука астрономии». Анонимное анкетирование школьников, по результатам которого было определено желание посещения курса, показало. 59 % подростков выявили желание обучаться элективному курсу по астрономии. Школьники (родители – 65 %) не только положительно высказались об астрономии, но также отвечая на вопросы: почему нужна астрономия? Как устроен Космос? Что такое черные дыры? Есть ли на самом деле НЛО? – ответили, что им действительно хотелось бы получить правильный ответ на эти вопросы. Остальные 41 % школьников указали, что они не хотят тратить на это время. Мы считаем, что предлагаемый элективный курс «Азбука астрономии» поможет сформировать представления о материальном единстве мира, единстве всех физических законов и явлений в целом во Вселенной, а также позволит повысить качество обучения у подростков основной школы.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Астахова В. Г., Дубровский Е. В., Жерневская И. И. Мир вокруг нас: Беседы о мире и его законах. М.: Политиздат. 1983. 175 с.
2. Винник М. А. К вопросу о роли астрономического образования учащихся // Вестник Московского государственного областного университета. Сер. Педагогика. 2010. № 2. С. 169-173.
3. Воронцов-Вельяминов Б. А. Сборник вопросов и задач по астрономии. М.: Просвещение. 1980. 56 с.
4. Воронцов-Вельяминов Б. А., Страут Е. К. Астрономия: Учебник для 11-го кл. сред. шк. М.: Дрофа. 2018. 238 с.
5. Дробчик Т. Ю., Невзоров Б. П. Преподавание астрономии школьникам: проблемы и перспективы // Профессиональное образование в России и за рубежом. 2018. № 1. С. 109-113.
6. Иванов А. А., Иванов З. И. Тесты по астрономии. Саратов: Изд-во «Лицей». 2002. 80 с.
7. Каспржак А. Г. Проблема выбора: элективные курсы в школе. М.: Новая школа. 2004. 160 с.
8. Кунаш М. А. Астрономия: Методическое пособие к учебнику Воронцова-Вельяминова Б. А., Страута Е.К.: 11 класс. М.: Дрофа. 2018. 217 с.
9. Левитан Е. П. Быть или не быть школьной астрономии // Земля и Вселенная. 2010. № 1. С. 41-48.
10. Малахов Г. И., Страут Е. К. Дидактический материал по астрономии: пособие для учителя. М.: Просвещение. 1989. 93 с.
11. Тихомирова Е. Н., Иродова И. А. Формирование астрономической картины мира школьникам // Ярославский педагогический вестник. 2017. № 3. С. 85-89.
12. Перельман Я. И. Занимательная астрономия. СПб.: СЭКЭО. 2017. 224 с.
13. Чаручин В. М. Астрономия. 10-11 классы: учебник для общеобразоват. организаций: базовый уровень. М.: Просвещение. 2018. 147 с.
14. Язев С. А., Комарова Е. С. Уровень астрономических знаний в обществе // Земля и Вселенная. 2009. № 5. С. 74-83.

## СОВРЕМЕННОЕ АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В РОССИИ

**В. В. Юрков**

Благовещенский государственный педагогический университет, г. Благовещенск  
e-mail: [stella@ascnet.ru](mailto:stella@ascnet.ru)

*В работе рассматриваются особенности изучения астрономии в российской школе на разных этапах её развития. Показана важность формирования астрономических представлений и их роль в формировании современной научной картины мира. Исследование показало, что, учитывая доступность различных информационных источников и наличия в них большого количества ненаучной, а часто антинаучной информации, возникает проблема формирования у школьников основ современного миропонимания и умения критически относиться к источникам этой информации.*

Астрономия – наука особая, она дает возможность показать картину мира в наиболее крупном масштабе, т.е. наиболее полно. Современное научное мировоззрение в большой мере основано именно на знании астрономии. Для понимания места человека во Вселенной в первую очередь важны астрономические знания. Изучение астрономии позволяет легко заинтересовать школьников (да и студентов) естественными науками, хотя бы из-за красоты самой науки: космические объекты часто завораживают своей красотой. Поэтому астрономия являлась обобщающим курсом, завершающим школьное естественнонаучное образование.

Современная астрономия – это в основном астрофизика, которая, по сути является частью «большой физики» и использует те же физические методы исследования. Особенность астрономии, ее непохожесть на другие науки заключается в том, что у нас нет возможности непосредственно экспериментировать с объектами своих исследований. Галактику, звезду или хотя бы планету нельзя воссоздать в лаборатории, как нельзя повлиять на их строение и свойства. Астрономы могут только наблюдать со стороны за явлениями и процессами, происходящими во Вселенной. Да и в смысле преподавания астрономия не совсем похожа на физику, математику и другие естественные науки.

В советской школе астрономия никогда не была особенно популярным предметом. Несмотря на то, что она всегда присутствовала в учебном плане и оценка по астрономии выставлялась в аттестатах, ее преподавание в основном велось по остаточному принципу. Элементы астрономии изучались в начальных и средних профессиональных учебных заведениях. Объективных причин этому две, и даже в какой-то мере они уважительны. Во-первых, астрономию не нужно было сдавать ни на выпускных экзаменах в школе, ни на вступительных в вуз, а во-вторых, астрономия велась всего один час в неделю и только в выпускном классе. Учителя астрономии практически никто не готовил, кроме классических университетов и нескольких педвузов. В тоже время она являлась и является очень важной мировоззренческой составляющей, позволяющей формировать у учащихся современную научную картину мира.

За годы рыночных реформ ситуация с преподаванием астрономии в большинстве школ в лучшую сторону не изменилась. В связи с появлением различных новых предметов и как следствие возросшей нагрузки на школьников. В 90-х годах астрономию исключили из перечня обязательных предметов. В некоторых школах в течение 20 лет этот

предмет изучался как элективный курс. Вместе с этим астрономия как специальная дисциплина практически полностью исчезает и из программ большинства педагогических вузов.

Обучение астрономии в советской школе велось по одному единственному учебнику (Воронцов-Вельяминов Б. А. «Астрономия»), который периодически обновлялся. В ПТУ использовался учебник Е. П. Левитана. Учитывая тенденцию возможности выбора учебников в период реформирования образования, стали появляться другие учебники, которые использовались как в основной, так и профильных школах (классах). Следует отметить появление большого числа энциклопедий и справочников самого разного уровня и качества, а также зарубежных иллюстрированных книг как удачных, так и не очень.

Таким образом, с точки зрения наличия учебной и популярной литературы ситуация в какой-то мере даже улучшилась. В то же время практически совершенно исчезли серьезные научно-популярные книги, особенно написанные ведущими отечественными учеными, что явилось очень тревожным фактом, на фоне бурного развития современной науки.

Такой провал выглядел просто угрожающе для будущего наших науки и образования, поскольку многое создается в популярной литературе именно на базе таких изданий. Таким образом, мы получили довольно большой выбор учебников и различных учебных пособий, но при этом астрономия в массовой школе практически не преподавалась. На самом деле, увеличение возможностей не всегда приводит к бурному росту их использования. Но те, кто стремятся эти возможности реализовать, получают при наличии широкого выбора большую свободу в действиях.

Возникают даже специальные школы и классы с углубленным изучением физико-математических дисциплин.

В настоящее время астрономия одна из самых бурно развивающихся наук, что связано с развитием ее экспериментальной базы. Поскольку главное – это получение новых наблюдательных данных, то возможность построения все более крупных телескопов в разных спектральных диапазонах, электронных приемников излучения и открытие для наблюдений новых диапазонов (например, гравитационные волны) позволяет быстро получать множество новых экспериментальных фактов.

Кроме этого, благодаря развитию компьютерной техники, огромный прогресс существует в моделирование астрофизических процессов. Практически любой крупный наблюдательный проект имеет мощную поддержку в виде компьютерного моделирования изучаемых данным проектом явлений, поскольку, затратив незначительную часть стоимости эксперимента, можно избежать досадных (и дорогих) ошибок, а также, используя полученную в расчетах информацию, улучшить качество экспериментальных данных.

В 2017 году при широкой поддержке общественности приказом Министерства образования после более двадцатилетнего отсутствия астрономия вернулась в школьные программы в качестве обязательного предмета.

За период отсутствия астрономии в школе выросло целое поколение россиян, не получивших базовых знаний о нашей Вселенной. И это серьезная проблема, поскольку отсутствие у населения научных знаний недопустимо при наличии огромных возможностей, которые предоставляют сегодня средства массовой коммуникации, зачастую «вольно» трактуя научные достижения и информацию не всегда заботясь о её достоверности. Поэтому одной из важных задач астрономии в школе является формирование у учащихся современных научных представлений о ближнем и дальнем космосе, позволяющих критически относиться к массиву доступной информации.

Для решения этой задачи нужны, как минимум, переподготовка учителей по предмету, хорошие учебники и возможность использования современными технологиями обучения. Использование ИКТ, в частности, компьютерное моделирование, существенно облегчает процесс изучения астрофизических объектов и процессов, продемонстрировать

которые не только на уроке, но в специализированных обсерваториях практически невозможно. Учитель и учащиеся должны освоить возможности и технологии использования компьютерных моделей для получения информации о Вселенной.

Сегодня в школе действуют государственный образовательный стандарт и три учебника, допущенные Министерством просвещения для использования при изучении астрономии. Это учебники, написанные Б. А. Воронцовым-Вельяминовым и Е. К. Страутом, В. М. Чаругиным, Е. П. Левитаном.

Существуют разработанные на их базе учебно-методические комплексы.

Опыт работы на курсах повышения квалификации на базе института развития образования Амурской области показывает необходимость обучения учителей использованию современных интерактивных средств обучения астрономии. К сожалению, большинство интерактивных компьютерных программ, которые можно использовать на уроках астрономии, представлены в интернете зарубежными разработчиками на английском языке, и для их использования необходима соответствующая подготовка учителя в области перевода с иностранного языка, а также адаптация этих программ к возможностям школы и уровню подготовки учащихся.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Астрономия и астрофизика начала XXI века // Материалы Девятого съезда Астрономического общества и Международной конференции. Москва, 1-5 июня 2008 г. М.: Изд-во МГУ, 2008. 128 с.
2. Емец Н. П. Интерактивные модели в обучении астрономии // Материалы Девятого съезда Астрономического общества и Международной конференции. Москва, 1-5 июня 2008 г. М.: Изд-во МГУ, 2008. С. 19-20.
3. Ярмак Ю. Г. Формирование астрономических знаний у учащихся старших классов в условиях современной информационной среды // Автореф. дис. канд. пед. наук. М., 2007. 17 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция «Общая и техническая физика. Оптика»

<b>Авербух Б. Б.</b> Распространение электромагнитной волны в наноцилиндре .....	3
<b>Авербух Б. Б.</b> Усиление электромагнитного излучения зонной пластинкой из метаматериала.....	6
<b>Авербух Б. Б.</b> Преломление и отражение плоской электромагнитной волны монослоем из линейных электрических квадрупольей .....	8
<b>Авербух Б. Б., Ишмияров Т. А.</b> Магнитное зеркало на границе среды из элементов Гюйгенса .....	10
<b>Базылев П. В., Луговой В. А., Римлянд В. И., Шарыпов Р. Э.</b> Измерение параметров ультразвуковых волн на основе метода корреляционных функций .....	12
<b>Бондарева Т. В., Пячин С. А., Егоришин И. Н., Круглов М. С., Астапов И. А., Штарев Д. С.</b> Релаксация отражательной способности оксида висмута, подверженного воздействию плазмы ВЧ разряда .....	17
<b>Долгополов И. С., Петрова М. С., Сюй А. В., Антонычева Е. А.</b> Исследование работы фильтра на основе глубокой рельефной структуры в инфракрасном диапазоне .....	20
<b>Драчев К. А.</b> Акустические свойства эпоксидных составов на базе модифицированной эпоксидной смолы ХТ-116А .....	23
<b>Калинов Д. Г., Римлянд В. И., Болоховцев А. В.</b> Метод преобразования состояния временного фазового интерполятора в значение времени .....	27
<b>Кожмяко Н. В., Пячин С. А., Бондарева Т. В., Егоришин И. Н.</b> Влияние облучения плазмой высокочастотного разряда на оптические свойства оксида висмута .....	33
<b>Ливашвили А. И., Виноградова П. В., Криштон В. А., Манжула И. С., Якунина М. И.</b> Моделирование работы солнечного коллектора прямого поглощения .....	35
<b>Лобарева В. А., Пупатенко В. В., Насыров В. В.</b> Статистическая оценка точности метода микросейсмического зондирования по данным близко расположенных стационарных сейсмических станций .....	38

<b><i>Петрова М. С., Долгополов И. С., Сую А. В., Прокопиев Н. Н.</i></b> Влияние эффекта электрострикции при определении электрооптического коэффициента $r_{22}$ кристаллов класса $3m$ .....	42
<b><i>Пупатенко В. В.</i></b> Параметры затухания сейсмических колебаний в районе Бурейской ГЭС .....	44
<b><i>Рябинкин К. С., Пупатенко В. В., Бронников А. К.</i></b> Изучение глубинного строения Курского разлома и Преображенковского грабена методом микросейсмического зондирования по профилю Биджан-Новотроицкое ...	47
<b><i>Трусенко М. С., Диденко А. Н.</i></b> Петромагнитные исследования пород подводной вулканической группы софу (Идзу-Бонинская островная дуга) .....	49
<b><i>Ульянычев В. Ф., Ульянычева Н. В.</i></b> Беспроводная система холтеровского мониторинга дыхательных шумов и тонов сердца .....	53
<b>Секция «Теоретическая физика и вычислительная математика»</b>	
<b><i>Белозеров А. О., Мазур А. И.</i></b> Методы машинного обучения в задачах ядерной физики .....	58
<b><i>Жуков Е. А., Жукова В. И.</i></b> Вклады объемного и поверхностного механизмов в генерацию волн Лэмба доменной границей .....	63
<b><i>Жукова В. И., Жуков Е. А.</i></b> Исследование оператора переноса с переменными коэффициентами .....	65
<b><i>Зайцев С. А., Зайцева Д. С., Зайцев А. С., Крамарь Е. И., Кузаков К. А.</i></b> Поляризационный потенциал зона в представлении параболических квазиштурмовских функций .....	68
<b><i>Капитан В. Ю., Васильев Е. В., Король А. О., Капитан Д. Ю., Рыбин А. Е., Падалко М. А.</i></b> Численные расчеты основных состояний спиновых стекол .....	73
<b><i>Носырев М. Ю., Кравченко С. И.</i></b> Плотностная модель земной коры района Малмыжского месторождения и ее использование для выделения перспективных площадей .....	75
<b><i>Прохоренко А. В., Гниденко А. А., Чибисов А. Н., Чибисова М. А.</i></b> Квантово-механическое исследование электронной и магнитной структуры Si:P ..	78
<b><i>Ремесловский В. О., Жуков Е. А.</i></b> Тепловые эффекты, сопровождающие четырех волновое взаимодействие .....	82
<b><i>Соловьев С. В., Павлов К. И.</i></b> Теплообмен и магнитная гидродинамика жидкости в сферическом слое при подводе тепла к внешней поверхности .....	84

<b>Соловьев С. В., Павлова А. И.</b> Теплообмен и магнитная гидродинамика жидкости в сферическом слое при отводе тепла от внешней поверхности .....	89
<b>Секция «Физика конденсированных сред»</b>	
<b>Адамова М. Е.</b> Распространение объемных акустических волн в ромбоэдрических кристаллах ...	94
<b>Зо Хтет Аунг, Кочура А. В., Захвалинский В. С.</b> Структура магнетронных пленок арсенида кадмия .....	99
<b>Аунг Ней Вин, Мамонтов В. А., Пугачевский М. А., Тан Мьо Мин</b> Самоорганизация нанопленочных структур в коллоидной углеродной системе в стабилизированном электрическом поле .....	103
<b>Барышников С. В., Антонов А. А.</b> Исследование магнониобата-скандониобата свинца методом нелинейной диэлектрической спектроскопии .....	105
<b>Верхотурова И. В., Юрина В. Ю., Нецименко В. В., Ли Чундун</b> Влияние последовательного и одновременного облучения протонами и электронами на образование радиационных дефектов в оксиде цинка .....	109
<b>Дудин А. Н., Нецименко В. В.</b> Компьютерное моделирование радиационного воздействия низкоэнергетических протонов на полые частицы ZnO и ZnO/SiO <sub>2</sub> .....	113
<b>Капустина Г. Г.</b> Формирование упорядоченных структур золота при лазерной обработке .....	116
<b>Мамонтов В. А., Пугачевский М. А., Кузьменко А. П.,</b> Исследование антиокислительных свойств наночастиц диоксида церия в зависимости от времени и режимов центрофугирования .....	121
<b>Мерделина Т. А.</b> Квазилинейчатые спектры люминесценции как метод исследования углеродных модификаций .....	125
<b>Насыров В. В., Насырова М. Г.</b> Поправки к закону Стокса .....	127
<b>Новгородцев Н. С., Фомин Д. В., Дубов В. Л., Пячин С. А.</b> Формирование BaSi <sub>2</sub> на Si(111) и исследование кристаллической структуры дисилицида методом рентгеновской дифракции .....	133
<b>Новиков Е. А., Кузьменко А. П., Крыльский Д. В., Дежуров Д. В.</b> Ленгмюровские монослои (CdSe/CdS/ZnS)/SiO <sub>2</sub> из коллоидных квантовых точек ...	137
<b>Стукова Е. В., Барышников С. В.</b> Исследование диэлектрических свойств композитов (CuO) <sub>1-x</sub> /(BaTiO <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> .....	141

<b>Син Вин Тант, Кузьменко А. П., Тан Мьо Мин</b> Влияние условий отжига на свойства тонкой пленки гафния методом магнетронного распыления .....	146
<b>Фролов А. М., Крайнова Г. С., Ансович А. В., Ткачев В. В., Ильин Н. В., Должиков С. В., Плотников В. С.</b> Корреляция морфологии и магнитных характеристик лент типа фанмет в зависимости от состава .....	151
<b>Чжо Аунг Хеин, Мамонтов В. А., Пугачевский М. А.</b> Фотокаталитические свойства нанотрубок оксида меди, полученных методом электрофоретического синтеза .....	155
<b>Юрина В. Ю., Нецименко В. В.</b> Отражательная способность покрытий на основе диоксида кремния .....	158
<b>Секция «Физическое материаловедение»</b>	
<b>Галкин Н. Г., Ян Д. Т., Галкин К. Н., Чусовитина С. В.,</b> Связь спектров фотолюминесценции и ИК-спектроскопии образцов мезопористого кремния при длительном хранении: эффект погружения в растворы LiBr и Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ..	160
<b>Пикуль О. Ю., Сидоров Н. В., Палатников М. Н.</b> Оптическая однородность кристаллов LiNbO <sub>3</sub> с двойным легированием катионами Cu и Gd .....	164
<b>Скирута А. Е., Дворник М.</b> Применение пресс-форм, изготовленных методом 3D печати для создания твердосплавных изделий методом порошковой металлургии .....	167
<b>Чернечкин И. А., Милинский А. Ю.</b> Фазовые переходы в KNO <sub>3</sub> , введённого в углеродные нанотрубки .....	171
<b>Секция «Физическое образование (школьное и вузовское)»</b>	
<b>Алешин М. С.</b> Лабораторные работы по теме «Поляризация» в рамках курса дистанционного обучения .....	174
<b>Алешин М. С.</b> Лабораторные работы по темам «Интерференция» и «Дифракция» в рамках курса дистанционного обучения .....	178
<b>Герман А. С., Струков Д. О., Фомин Д. В., Веселова Д. М.</b> Применение EXCEL и MATLAB/SIMULINK в научно-образовательной деятельности .....	182
<b>Горбанева Л. В., Актанко Л. Ю.</b> Преимущества и недостатки использования виртуальных рабочих тетрадей по физике в современном образовании .....	185

<b>Горбанева Л. В., Книга К. В.</b> Методика подготовки ОГЭ по физике с помощью внеурочной деятельности .....	188
<b>Горбанева Л. В., Сон М. А.</b> Натурные и виртуальные опыты при изучении волновой оптики в школьном курсе физики .....	192
<b>Дейнекина Н. А., Кравченко О. В.</b> Использование дистанционных технологий при преподавании физики в 10-11 классах .	195
<b>Драчев К. А., Губин С. В.</b> Лабораторные работы по разделу физики «Механика» для студентов дистанционной формы обучения .....	198
<b>Егоршин И. Н., Кожемяко Н. В.</b> Демонстрационный эксперимент при изучении физики плазмы в школе .....	201
<b>Иванюк И. О., Ланкин С. В.</b> Проектно-исследовательская деятельность обучающихся колледжа .....	205
<b>Казарбин А. В., Лунина Ю. В.</b> Принцип интеграции в образовательном процессе как способ развития инженерного мышления .....	210
<b>Капустина Г. Г.</b> Методическое обеспечение курса физики для бакалавров .....	214
<b>Копылова И. Б.</b> Дистанционное обучение: замечания и выводы .....	216
<b>Ланкин С. В.</b> Причины снижения и методы повышения познавательного интереса в процессе решения физических задач .....	218
<b>Насыров В. В., Насырова М. Г.</b> Использование дистанционных технологий при традиционном обучении в вузе ...	219
<b>Пагубко А. Б.</b> Лабораторный практикум в условиях дистанционного обучения .....	223
<b>Пагубко А. Б.</b> Проблемы преподавания дисциплины «История и методология физики» .....	227
<b>Стукалова А. С.</b> Асинхронное дистанционное обучение как индикатор степени самостоятельности и самоорганизованности студентов .....	229
<b>Ткаченко Н. С., Ерова Т. А.</b> Организация и методика проведения элективного курса «Азбука астрономии» для основной школы .....	233
<b>Юрков В. В.</b> Современное астрономическое образование в России .....	238



*Научное издание*

**ФИЗИКА: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ,  
ОБРАЗОВАНИЕ**

Материалы XVII региональной научной конференции

Хабаровск  
10–12 ноября 2020 г.

Отпечатано с авторских оригиналов  
Компьютерная верстка *Е. А. Кулагиной*

Подписано в печать 17.12.20. Формат 60x84  $\frac{1}{16}$ . Усл. печ. л. 14,06. Тираж 100 экз. Заказ 229.

Издательство Тихоокеанского государственного университета.  
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.  
Отдел оперативной полиграфии издательства Тихоокеанского государственного университета.  
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.