

ISSN 2415-7058

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ
*Основан
в 1997 году*

Серия А
**Естественные
науки**

3/2016

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

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

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

Ответственные секретари: канд. физ.-мат. наук, доц. **Е.В. Алтухов**; канд. физ.-мат. наук **М.В. Фоменко**

Члены редколлегии: д-р хим. наук, проф. **А.С. Алемасова**; д-р экон. наук, проф. **В.Н. Андриенко**; д-р техн. наук, проф. **В.В. Белоусов**; д-р биол. наук, проф. **М.И. Бойко**; д-р физ.-мат. наук, проф. **Б.В. Бондарев**; д-р физ.-мат. наук, проф. **Вал.В. Волчков**; д-р физ.-мат. наук, проф. **Вит.В. Волчков**; д-р биол. наук, проф. **А.З. Глухов**; д-р физ.-мат. наук, проф. **А.С. Гольцев**; д-р физ.-мат. наук, проф. **Г.В. Горр**; д-р техн. наук, проф. **В.В. Данилов**; д-р физ.-мат. наук, проф. **С.А. Калоеров**; д-р физ.-мат. наук, проф. **А.Г. Милославский**; д-р хим. наук, проф. **В.М. Михальчук**; д-р техн. наук, проф. **Ф.В. Недопекин**; д-р техн. наук, проф. **А.Н. Семко**; д-р техн. наук, проф. **В.И. Сторожев**; д-р физ.-мат. наук, д-р техн. наук, проф. **В.К. Толстых**; д-р хим. наук, проф. **Т.Г. Тюрина**; д-р биол. наук, проф. **Н.Н. Ярошенко**.

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

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

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

Executive Secretaries: Cand. of phys. and math., docent **E.V. Altukhov**, Cand. of phys. and math. **M.V. Fomenko**

The Members of the Editorial Board: Dr. of chem., prof. **A.S. Alemasova**; Dr. of econ., prof. **V.N. Andrienko**; Dr. of tech., prof. **V.V. Belousov**; Dr. of biol., prof. **M.I. Boyko**; Dr. of phys. and math., prof. **B.V. Bondarev**; Dr. of phys. and math., prof. **Val.V. Volchkov**; Dr. of phys. and math., prof. **Vit.V. Volchkov**; Dr. of biol., prof. **A.Z. Glukhov**; Dr. of phys. and math., prof. **A.S. Goltsev**; Dr. of phys. and math., prof. **G.V. Gorr**; Dr. of tech., prof. **V.V. Danilov**; Dr. of phys. and math., prof. **S.A. Kaloerov**; Dr. of phys. and math., prof. **A.G. Miloslavsky**; Dr. of chem., prof. **V.M. Mikhal'chuk**; Dr. of tech., prof. **F.V. Nedopiokin**; Dr. of tech., prof. **A.N. Semko**; Dr. of tech., prof. **V.I. Storozhev**; Dr. of phys. and math., Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh**; Dr. of chem., prof. **T.G. Tyurina**; Dr. of biol., prof. **N.N. Jaroshenko**.

Адрес редакции: ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»

ул. Университетская, 24
283001, г. Донецк

Тел: (062) 302-92-56, 302-92-93

E-mail: vestnikdonnu_a@mail.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikA>

*Печатается по решению Ученого совета ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»
Протокол № 9 от 28.10.2016 г.*

© ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», 2016

Вестник Донецкого национального университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Серия А. Естественные науки

№ 3

Донецк 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Механика

- Калоеров С.А., Кошкин А.А. Решение задачи об изгибе плиты с эллиптическим или линейным включением 3
- Нескородев Р.Н. Преобразование интегральных уравнений состояния вязкоупругих горных пород к временным уравнениям закона Гука 10

Физика

- Алехов Ю.А., Пересадченко А.Н., Волошанович И.Н. Электрофизические характеристики композиционных радиопоглощающих материалов, полученных на основе NiZn ферритов 22
- Пойманов В.Д. Особенности распространения волн в периодическом невязком кристалле 27

Информатика, вычислительная техника и управление

- Николаенко Д.В., Плешкова О.А. Построение объектной модели информационной системы внешнего автопилотирования 32
- Третьяков И.А., Павлов М.Л., Тебенева Т.С., Данилов В.В. Оптические информационные технологии. Обработка радиосигналов 40
- Шкодина Л.Н. Построение хэш-функции и создание электронно-цифровой подписи с использованием симметричного и асимметричного шифров 50

Химические науки

- Алемасова А.С., Щетина Н.Д. Сравнительная оценка эффективности химических модификаторов при атомно-абсорбционном определении следов молибдена 55
- Ломов Д.А., Абрамянц М.Г. Синтез рибозильных производных имидазо[4,5-*b*]- и [4,5-*c*] пиридинов 64
- Шептун И.Г., Дмитрук Н.П. Определение размеров наночастиц методом электротермической атомно-абсорбционной спектроскопии 71

Биологические науки

- Ветрова Е.В., Гринёва О.О. Динамика физических и бактериологических показателей воды реки Северский Донец в 2010–2012 годах 76
- Кочура Д.А., Романенко В.А. Нейродинамические корреляты различных типов репродукции следов памяти 82
- Правила для авторов 90

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997

Series A. Natural Sciences

No 3

Donetsk 2016

CONTENTS

Mechanics

Kaloerov S.A., Koshkin A.A. Solution of bending plates problem for plate with elliptical or linear inclusions 3

Neskorodev R.N. Transformation of integral equations of viscoelastic state of rocks to equation of time Hooke's law 10

Physics

Alekhov I A., Peresadchenko A.N., Voloshanovich I.N. Electrophysical characteristics of the composite radio-wave absorptive materials which have been created on the basis of NiZn ferrites 22

Poimanov V.D. Features of wave propagation in periodic non-reciprocal crystal 27

Computer science, computer engineering and control

Nikolaenko D.V., Pleshkova O.A. Building an object model of information system external automatic pilot 32

Tretyakov I., Pavlov M., Tiebienieva T., Danilov V. Optical information technologies. Processing of radio signals 40

Shkodina L.N. Build a hash function and creating a digital signature using a symmetric and asymmetric ciphers 50

Chemical sciences

Alemasova A.S., Shchepina N.D. The comparative estimation of chemical modifiers efficiency during trace molybdenum atomic absorption determination 55

Lomov D.A., Abramyan M.G. Synthesis of ribiofuranosyl derivatives imidazo[4,5-b]- and [4,5-c]pyridines 64

Sheptun I.G., Dmitruk N.D. Determination the size of nanoparticles by electrothermal atomic absorption spectrometry 71

Biological sciences

Vetrova Y.V., Grinyova O.A. The dynamics of physical and bacteriological indicators of water in the Seversky Donets river in 2010–2012 76

Kochura D.A., Romanenko V.A. Neural correlates of different types of memory reproduction 82

Instructions for authors 90

М Е Х А Н И К А

УДК 539.3

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ ИЗГИБЕ ПЛИТЫ С ЭЛЛИПТИЧЕСКИМ
ИЛИ ЛИНЕЙНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ

© 2016. С.А. Калоеров, А.А. Кошкин

Решена задача теории изгиба тонких плит для анизотропной плиты с эллиптическим или линейным упругим включением. С использованием обобщенных комплексных потенциалов, разложений функций в ряды Лорана и по полиномам Фабера получено точное аналитическое решение задачи. В случае линейного включения найдена формула для вычисления коэффициентов интенсивности моментов для его концов. Описаны результаты численных исследований, позволивших выявить влияние на значения возникающих в плите значений изгибающих моментов жесткости материала включения, отношения его полуосей. Для линейного упругого включения установлено, что особенности моментов вблизи концов включения, описываемых коэффициентами интенсивности моментов, возникают только в случаях существенно жестких и мягких включений, и говорить об особенностях этих моментов для других случаев упругих включений, как это делается в работах некоторых авторов, некорректно. Изотропные плиты рассматриваются как частный случай анизотропных.

Ключевые слова: анизотропная плита; изгиб плит; упругие включения; линейные включения; коэффициенты интенсивности моментов; комплексные потенциалы.

Введение. Несмотря на значительные успехи в деле разработки прикладной теории изгиба тонких анизотропных плит [1–3], до сих пор мало решенных задачи для плит с инородными включениями, особенно в случае линейных включений, когда необходимо исследовать сингулярность основных характеристик в концах включений. В случае многосвязных плит это до сих пор остается трудной математической задачей, а для случая плиты с одним включением удастся получить точное решение этой задачи, рассматривая линейное включение как предельный случай эллиптического, когда одна из полуосей равна нулю.

В данной статье с использованием методов конформных отображений, разложений функций в ряды Лорана и по полиномам Фабера дано решение задачи об изгибе анизотропной плиты с эллиптическим, в том числе и линейным упругим включением. Дана формула для нахождения коэффициентов интенсивности моментов (КИМ). Описаны результаты многочисленных расчетов, позволивших выявить влияние на значения возникающих в плите изгибающих моментов жесткости упругого включения, отношения полуосей включения, анизотропии материалов плиты и включения.

Постановка и метод решения задачи. Рассмотрим бесконечную анизотропную плиту-матрицу с эллиптическим отверстием L_1 с центром в начале выбранной прямоугольной системы координат Oxy и полуосями a_1 , b_1 вдоль осей координат (рис. 1). В отверстие без предварительного натяжения вставлено упругое включение из другого материала, находящееся с плитой в условиях идеального механического контакта. Плита на бесконечности находится под действием постоянных моментов M_x^∞ , M_y^∞ , H_{xy}^∞ .

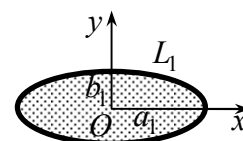


Рис. 1

Для решения задачи используются комплексные потенциалы теории изгиба анизотропных плит [1, 3]. Область, занятую плитой-матрицей, обозначим через S , упругим включением – через S^1 .

При использовании комплексных потенциалов решение рассматриваемой задачи сводится к нахождению производных функций обобщенных комплексных переменных $W'_k(z_k)$ для плиты-матрицы и $W_k^1(z_k^1)$ для включений из соответствующих граничных условий.

Производные комплексных потенциалов $W'_k(z_k)$ для плиты-матрицы являются функциями обобщенных комплексных переменных

$$z_k = x + \mu_k y, \quad (1)$$

где μ_k – корни характеристического уравнения

$$D_{22}\mu^4 + 4D_{26}\mu^3 + 2(D_{12} + 2D_{66})\mu^2 + 4D_{16}\mu + D_{11} = 0; \quad (2)$$

$D_{ij} = B_{ij}D_0$ – жесткости материала, в которых

$$\begin{aligned} B_{11} &= (a_{22}a_{66} - a_{26}^2)/\Delta, \quad B_{12} = (a_{16}a_{26} - a_{12}a_{66})/\Delta, \quad B_{16} = (a_{12}a_{26} - a_{16}a_{22})/\Delta, \\ B_{22} &= (a_{11}a_{66} - a_{16}^2)/\Delta, \quad B_{26} = (a_{12}a_{16} - a_{26}a_{11})/\Delta, \quad B_{66} = (a_{11}a_{22} - a_{12}^2)/\Delta, \\ \Delta &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{vmatrix}; \end{aligned} \quad (3)$$

a_{ij} – коэффициенты деформации для материала плиты; $D_0 = 2h^3/3$; h – полутолщина плиты.

Функции $W'_k(z_k)$ определены в областях S_k , получаемых из заданной области S аффинными преобразованиями (1) и в данном случае имеют вид [1]

$$W'_k(z_k) = \Gamma_k z_k + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_{k1n}}{\zeta_{k1}^n}, \quad (4)$$

в котором Γ_k – постоянные, определяемые из решения системы уравнений

$$\begin{aligned} 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \Gamma_k &= A_{11}M_x^\infty + A_{21}M_y^\infty + A_{31}H_{xy}^\infty, \quad 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \mu_k \Gamma_k = A_{12}M_x^\infty + A_{22}M_y^\infty + A_{32}H_{xy}^\infty, \\ 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \mu_k^2 \Gamma_k &= A_{13}M_x^\infty + A_{23}M_y^\infty + A_{33}H_{xy}^\infty, \quad 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \frac{1}{\mu_k} \Gamma_k = 0; \\ A_{11} &= (2D_{22}D_{66} - 2D_{26}^2)/\Delta_1, \quad A_{21} = (2D_{16}D_{26} - 2D_{12}D_{66})/\Delta_1, \\ A_{31} &= (2D_{12}D_{26} - 2D_{12}D_{22})/\Delta_1, \quad A_{12} = (D_{12}D_{26} - D_{16}D_{22})/\Delta_1, \\ A_{22} &= (D_{12}D_{16} - D_{11}D_{26})/\Delta_1, \quad A_{32} = (D_{11}D_{22} - D_{12}^2)/\Delta_1, \\ A_{13} &= (2D_{16}D_{26} - 2D_{12}D_{66})/\Delta_1, \quad A_{23} = (2D_{11}D_{66} - 2D_{16}^2)/\Delta_1, \end{aligned} \quad (5)$$

$$A_{33} = (2D_{12}D_{16} - 2D_{11}D_{26})/\Delta_1, \\ \Delta_1 = \begin{vmatrix} D_{11} & 2D_{16} & D_{12} \\ D_{12} & 2D_{26} & D_{22} \\ D_{16} & 2D_{66} & D_{26} \end{vmatrix}, \quad A_i = \sum_{j=1}^3 A_{ij} / D_{11}; \quad (6)$$

a_{k1n} – неизвестные постоянные; ζ_{k1} – переменные, определяемые из конформных отображений внешности единичного круга $|\zeta_{k1}| \geq 1$ на внешности эллипсов L_{k1} [4]:

$$z_k = R_{k1} \left(\zeta_{k1} + \frac{m_{k1}}{\zeta_{k1}} \right), \quad (7)$$

где

$$R_{k1} = \frac{a_1 - i\mu_k b_1}{2}, \quad m_{k1} = \frac{a_1 + i\mu_k b_1}{2R_{k1}}. \quad (8)$$

Если функции $W'_k(z_k)$ определены, то изгибающие моменты и поперечные силы в точках плиты вычисляются по формулам

$$(M_x, M_y, H_{xy}) = -2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 (p_k, q_k, r_k) W_k''(z_k); \quad (9)$$

$$(N_x, N_y) = -2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 (\mu_k s_k, -s_k) W_k''(z_k), \quad (10)$$

в которых

$$p_k = D_{11} + 2D_{16}\mu_k + D_{12}\mu_k^2, \quad q_k = D_{12} + 2D_{26}\mu_k + D_{22}\mu_k^2 \\ r_k = D_{16} + 2D_{66}\mu_k + D_{26}\mu_k^2, \quad s_k = -D_{16} - (D_{12} + 2D_{66})\mu_k - 3D_{26}\mu_k^2 - D_{22}\mu_k^3. \quad (11)$$

Для изгибающих же моментов на произвольной площадке с нормалью n имеет место формула

$$M_n = M_x \cos^2 nx + M_y \cos^2 ny + 2H_{xy} \sin nx \cos nx \quad (12)$$

Производные комплексных потенциалов $W_k^1(z_k^1)$ для включения являются функциями обобщенных комплексных переменных

$$z_k^1 = x + \mu_k^1 y, \quad (13)$$

где μ_k^1 – корни характеристического уравнения вида (2), в котором коэффициенты D_{ij} заменены на жесткости D_{ij}^1 для включения. Эти функции определены в областях S_k^1 , получаемых из области S^1 аффинными преобразованиями (13), они голоморфны в этих конечных односвязных областях и могут быть разложены в ряды по полиномам Фабера, которые после преобразований представляются степенными рядами вида [5]

$$W_k^1(z_k^1) = \sum_{n=0}^{\infty} a_{kn}^1 \left(\frac{z_k^1}{R_k^1} \right)^n. \quad (14)$$

Здесь a_{kn}^1 – неизвестные постоянные; R_k^1 – постоянные, вычисляемые в соответствии с формулами (8).

Неизвестные постоянные a_{kn}^1 определим из граничных условий на контуре включения [1, 3]

$$2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 \left(g_{k1i} W'_k(z_k) - g_{ki}^1 W_k'^1(z_k^1) \right) = 0, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} g_{k11} &= 1, \quad g_{k1}^1 = 1, \quad g_{k12} = \mu_k, \quad g_{k2}^1 \mu_k^1, \\ g_{k13} &= p_k / \mu_k, \quad g_{k3}^1 = p_k^1 / \mu_k^1, \quad g_{k14} = q_k, \quad g_{k4}^1 = q_k^1. \end{aligned}$$

Подставляя функции (4) и (14) в граничные условия (15), учитывая, что на контуре включения $\zeta_{k1} = \sigma$ и применяя метод рядов, получим, что $a_{k1n} = a_{kn}^1 = 0$ при $n \geq 2$, а для определения a_{k11} и a_{k1}^1 имеет место система алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^2 \left(a_{k11} - m_k^1 a_{k1}^1 - \bar{a}_{k1}^1 \right) &= - \sum_{k=1}^2 \left[\Gamma_k R_{k1} m_{k1} + \bar{\Gamma}_k \bar{R}_{k1} \right], \\ \sum_{k=1}^2 \left(\mu_k a_{k11} - \mu_k^1 m_k^1 a_{k1}^1 - \bar{\mu}_k^1 \bar{a}_{k1}^1 \right) &= - \sum_{k=1}^2 \left[\mu_k \Gamma_k R_{k1} m_{k1} + \bar{\mu}_k \bar{\Gamma}_k \bar{R}_{k1} \right], \\ \sum_{k=1}^2 \left(\frac{p_k}{\mu_k} a_{k11} - \frac{p_k^1}{\mu_k^1} m_k^1 a_{k1}^1 - \frac{\bar{p}_k^1}{\bar{\mu}_k^1} \bar{a}_{k1}^1 \right) &= - \sum_{k=1}^2 \left[\frac{p_k}{\mu_k} \Gamma_k R_{k1} m_{k1} + \frac{\bar{p}_k}{\bar{\mu}_k} \bar{\Gamma}_k \bar{R}_{k1} \right], \\ \sum_{k=1}^2 \left(q_k a_{k11} - q_k^1 m_k^1 a_{k1}^1 - \bar{q}_k^1 \bar{a}_{k1}^1 \right) &= - \sum_{k=1}^2 \left[q_k \Gamma_k R_{k1} m_{k1} + \bar{q}_k \bar{\Gamma}_k \bar{R}_{k1} \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Следовательно, производные комплексных потенциалов имеют вид

$$W'_k(z_k) = \Gamma_k z_k + \frac{a_{k11}}{\zeta_{k1}}, \quad W_k'^1(z_k^1) = a_{k1}^1 \frac{z_k^1}{R_k^1}, \quad (17)$$

а для моментов в плите-матрице и во включении найдем выражения

$$\begin{aligned} (M_x, M_y, H_{xy}) &= -2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 (p_k, q_k, r_k) \left(\Gamma_k - \frac{a_{k11}}{R_{k1} (\zeta_{k1}^2 - m_{k1})} \right), \\ (M_x^1, M_y^1, H_{xy}^1) &= -2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 (p_k^1, q_k^1, r_k^1) \frac{a_{k1}^1}{R_k^1}. \end{aligned} \quad (18)$$

Если отверстие переходит в прямолинейный разрез, (включение в упругую линию), то можно вычислить и КИМ k_{m1} (для моментов M_y) и k_{m2} (для моментов H_{xy}). Для них по аналогии с выводами КИН для напряжений в случае плоской задачи [6] получаем

$$(k_{m1}, k_{m2}) = \frac{1}{\sqrt{a_1}} 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^2 (q_k, r_k) a_{k11}. \quad (19)$$

Заметим, что, зная КИМ, на основе выражений [3]

$$\sigma_y = \frac{3M_y}{2h^3}z, \quad \tau_{xy} = \frac{3H_{xy}}{2h^3}z,$$

можно найти, как это делают многие авторы, максимальные значения КИН (при $z = h$)

$$(k_1, k_2) = \frac{3}{2h^2}(k_{m1}, k_{m2}).$$

Были проведены численные исследования значений изгибающих моментов для плиты из материалов [7] КАСТ-В изотропный (материал М1) и стеклопластик косоугольной намотки (материал М2). Коэффициенты деформаций для этих материалов приведены в табл. 1. Коэффициенты деформации для материала включения выбирались таким образом: $a_{ij}^{(l)} = \lambda^{(l)} a_{ij}$, где $\lambda^{(l)}$ – параметр относительной жесткости.

Таблица 1

Материал	$a_{11} \cdot 10^{-4}, \text{МПа}^{-1}$	$a_{22} \cdot 10^{-4}, \text{МПа}^{-1}$	$a_{12} \cdot 10^{-4}, \text{МПа}^{-1}$	$a_{66} \cdot 10^{-4}, \text{МПа}^{-1}$
М1	72,100	72,100	-8,600	161,500
М2	10000	2,800	-0,770	27,000

Для плиты с круговым включением радиуса a_1 ($b_1 = a_1$) (рис. 2) с различными значениями параметра относительной жесткости $\lambda^{(1)}$ под действием изгибающих моментов $M_y^\infty = m_y$ с точностью до множителя m_y в табл. 2 приведены значения моментов M_s от напряжений σ_s в точках контакта плиты с включением на площадках, перпендикулярных контуру включения. При этом θ – центральный угол отверстия, отсчитываемый от положительного направления оси Ox против часовой стрелки. Значения $\lambda^{(1)}$, равные 0 и ∞ , соответствуют случаям плиты с абсолютно жестким включением и абсолютно мягким включением (отверстием). Из табл. 2 видно, что с уменьшением жесткости включения (с увеличением $\lambda^{(1)}$) значения моментов M_s в точках вблизи $\theta = 0$ растут, в точках вблизи $\theta = \pi/2$ они сперва убывают (при $\lambda^{(1)} > 1$), затем растут (при $\lambda^{(1)} < 1$). При $\lambda^{(1)} < 10^{-2}$ включение можно считать

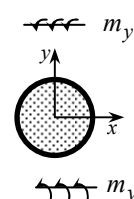


Рис. 2

Таблица 2

Материал	$\lambda^{(1)}$	θ , рад						
		0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$
М1	0	-0,164	-0,128	-0,029	0,107	0,242	0,341	0,377
	10^{-2}	-0,124	-0,092	-0,005	0,114	0,235	0,319	0,351
	10^{-1}	0,159	0,161	0,166	0,172	0,178	0,183	0,184
	0.5	0,720	0,671	0,539	0,359	0,179	0,046	-0,002
	2	1,248	1,169	0,951	0,653	0,355	0,137	0,058
	10	1,590	1,497	1,245	0,899	0,554	0,301	0,209
	10^2	1,704	1,608	1,346	0,989	0,631	0,370	0,274
	∞	1,718	1,622	1,359	1,000	0,641	0,378	0,283
М2	0	-0,222	-0,254	0,007	0,464	0,511	0,303	0,190
	10^{-2}	-0,185	-0,215	0,034	0,463	0,496	0,288	0,176
	10^{-1}	0,078	0,056	0,215	0,461	0,403	0,192	0,090
	0.5	0,653	0,616	0,568	0,476	0,275	0,074	-0,006
	2	1,369	1,257	0,925	0,534	0,256	0,098	0,046
	10	2,032	1,820	1,212	0,608	0,312	0,208	0,184
	10^2	2,311	2,053	1,328	0,641	0,344	0,266	0,253
	∞	2,348	2,084	1,343	0,646	0,349	0,274	0,263

абсолютно жестким, при $\lambda^{(1)} > 10^2$ – абсолютно гибким (отверстием). Концентрация моментов в анизотропной плите выше чем в изотропной.

В табл. 3. для различных отношений полуосей b_1/a_1 эллиптического включения и параметра относительной жесткости $\lambda^{(1)}$ приведены значения моментов в точках плиты

Таблица 3

Материал	$\lambda^{(1)}$	b_1/a_1						КИМ $k_{m1}^{\pm}$
		1	0,5	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	
M1	0	-0,16	-0,19	-0,42	-3,02	-29,00	-288,69	-0,136
	10^{-2}	-0,12	-0,16	-0,33	-0,97	-1,32	-1,38	-0,001
	0,5	0,72	0,63	0,53	0,50	0,49	0,49	0,000
	2	1,25	1,40	1,77	1,97	1,99	1,99	0,000
	10^2	1,70	2,40	7,62	42,10	86,81	97,28	0,013
	∞	1,72	2,44	8,18	72,78	718,83	7178,87	1,000
M2	0	-0,22	-0,27	-0,69	-5,37	-52,18	-520,13	-0,170
	10^{-2}	-0,19	-0,24	-0,53	-1,51	-1,99	-2,06	-0,001
	0,5	0,65	0,58	0,51	0,49	0,49	0,49	0,000
	2	1,37	1,55	1,86	1,97	1,99	1,99	0,000
	10^2	2,31	3,59	12,71	57,10	91,35	97,22	0,007
	∞	2,35	3,70	14,48	135,77	1348,63	13475,67	1,000

вблизи включения, а также КИМ (при $b_1/a_1 = 10^{-5}$). Видно, что с уменьшением отношения b_1/a_1 значения моментов M_s вблизи концов большой полуоси по модулю резко растут; при $b_1/a_1 < 10^{-3}$ можно включение считать линейным и вычислять для него КИМ. При этом КИМ возникает, если относительная жесткость включения велика или мала. На рис. 3 изображены графики изменения КИМ ($k_{m1}^{\pm}$) в зависимости от жесткости материала включения (параметра $\lambda^{(1)}$). Видно, что, как и в плоской задаче [5], для линейного упругого включения влияние параметра $\lambda^{(1)}$ такое же, как и для упругого кругового ядра: $\lambda^{(1)} < 10^{-3}$

включение можно считать абсолютно жестким, при $\lambda^{(1)} > 10^3$ – абсолютно мягким (трещиной). При $10^{-4} < \lambda^{(1)} < 10^4$ значения КИМ весьма малы и ими можно пренебречь. Поэтому говорить о КИМ для линейных упругих включений, когда жесткость материала включения отличается от жесткости материала плиты менее чем 10^3 раз, нет смысла. Естественно, нужно иметь в виду, что для неподкрепленного разреза берега при изгибе контактируют и для корректности задачи нужно прикладывать и растягивающие усилия, как это делают многие авторы.

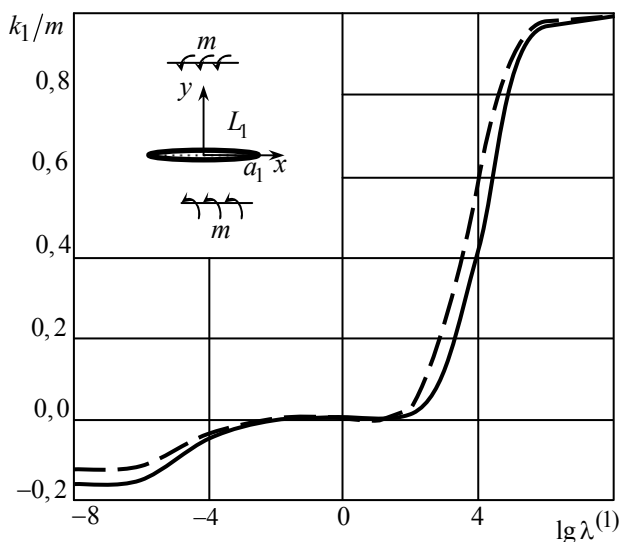


Рис. 3

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калоеров С.А. Комплексные потенциалы теории изгиба многосвязных анизотропных плит / С.А. Калоеров // Теорет. и прикладная механика. – 2012. – № 4 (50). – С. 115–136.
2. Космодамианский А.С. Плоская задача теории упругости для пластин с отверстиями, вырезами и выступами / А.С. Космодамианский. – К.: Вища шк., 1975. – 227 с.
3. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела / С.Г. Лехницкий. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
4. Калоеров С.А. Двумерное напряженное состояние многосвязного анизотропного тела с полостями и трещинами / С.А. Калоеров, Е.С. Горянская // Теорет. и прикладная механика. – 1995. – Вып. 25. – С. 45–56.
5. Калоеров С.А. Концентрация напряжений в многосвязных изотропных пластинках / С.А. Калоеров, Е.В. Авдюшина, А.Б. Мироненко. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2013. – 440 с.
6. Калоеров С.А. Определение коэффициентов интенсивности напряжений, индукции и напряженности для многосвязных электроупругих многосвязных сред / С.А. Калоеров // Прикладная механика. – 2007. – Т. 43, № 6. – С. 56–62.
7. Космодамианский А.С. Температурные напряжения в многосвязных пластинках / А.С. Космодамианский, С.А. Калоеров. – Киев-Донецк: Вища шк., 1983. – 160 с.

Поступила в редакцию 30.05.2016 г.

SOLUTION OF BENDING PLATES PROBLEM FOR PLATE WITH ELLIPTICAL OR LINEAR INCLUSIONS

S. A. Kaloerov, A. A. Koshkin

The problem of the theory of bending of thin plates for an anisotropic plate with an elliptic or linear elastic inclusion was solved. An exact analytical solution was obtained by using generalized complex potentials, Laurent series expansions and Faber polynomials. In the case of linear inclusion the formula for ratio of moments intensity was obtained. The results of numerical investigations are given. It shows the impact of materials stiffness and ratio of semiaxes on bending moments. For linear elastic inclusions it was found that moments singularity near the edges arises only in cases of rigid or non-rigid inclusions, so for case of elastic inclusions it is not correct to use “ratio of moments intensity” term as it done in works of other authors. Isotropic plates are treated as a special case of anisotropic.

Keywords: anisotropic plate; bending of plates; elastic inclusions; linear inclusions; the ratio of moments intensity; the complex potentials.

Калоеров Стефан Алексеевич

доктор физико-математических наук, профессор,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
г. Донецк, профессор кафедры теории упругости и
вычислительной математики,
E-mail: kaloerov@mail.ru

Kaloerov Stefan Alekseevich

Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Full Professor,
Donetsk National University, Donetsk,
Professor at the Department of Elasticity Theory and
Computational Mathematics

Кошкин Андрей Александрович

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
г. Донецк, аспирант кафедры теории упругости и
вычислительной математики,
E-mail: koshkin.andrey.aleksandrovich@gmail.com

Koshkin Andrey Aleksandrovich

Donetsk National University, Donetsk,
Postgraduate at the Department of Elasticity Theory
and Computational Mathematics

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ВЯЗКОУПРУГИХ ГОРНЫХ ПОРОД К ВРЕМЕННЫМ УРАВНЕНИЯМ ЗАКОНА ГУКА

© 2016. Р. Н. Нескородев

В работе предложена методика преобразования интегральных уравнений состояния задач вязкоупругости для случая деформации анизотропного массива горных пород к временным уравнениям закона Гука. Такой подход не требует построения аналитического представления ядер ползучести и релаксации в специальной форме. Построены кривые ползучести и релаксации для алевролита и песчаника. Экспериментальные данные использованы для нахождения всех элементов временной матрицы коэффициентов деформации.

Ключевые слова: ползучесть, релаксация, вязкоупругость, анизотропный горный массив.

Введение. Свойства ползучести горных пород проявляются в условиях их естественного залегания, сказываясь непосредственно на устойчивости и надежной работе подземных сооружений. В работе [1] приведены результаты экспериментов по деформированию образцов различных изотропных горных пород. Показано, что свойства ползучести горных пород подчиняются уравнениям линейной наследственности Вольтерра. При использовании принципа Вольтерра к решению задач ползучести большое значение имеет аналитическая форма задания ядер ползучести и релаксации. Экспериментально найденные значения этих ядер задаются дискретным набором значений, соответствующих некоторым временам. По этим значениям строят аналитические аппроксимации ядер в специальной форме. Такая аппроксимация часто является источником дополнительных погрешностей. Так, наиболее эффективное и часто используемое ядро Работнова Ю.Н. $\lambda \mathcal{E}_\alpha(-\beta; t - \tau)$ имеет произвол, содержащий всего три константы λ , α и β . Это обстоятельство не всегда позволяет построить функцию, хорошо описывающую экспериментально найденные величины на достаточно большом временном интервале. Поэтому точное описание вязкоупругих свойств реальных тел должно приводить к операторам с ядром более сложной природы. Для таких операторов построение резольвенты в аналитической форме наталкивается на непреодолимые трудности. В работе Громова В. Г. [2] показано, что построение алгебры операторов Вольтерра не связано с каким-либо их специальным видом и может быть осуществлено для любых резольвентных операторов. Это обстоятельство делает возможным реализацию решений граничных задач теории вязкоупругости во времени проводить алгебраическими методами. Решение может быть осуществлено с использованием произвольных исходных операторов и выражено через значения этих операторов, заданных непосредственно таблицей экспериментальных данных.

В работе [3] предложен новый подход решения задач об обобщенном плоском напряженном состоянии анизотропной пластинки. Предложенный подход не требует построения аналитического представления ядер ползучести и релаксации в специальной форме. Метод основан на построении матриц уравнений закона Р. Гука, исходя из интегральных уравнений состояния.

В данной работе предложена методика преобразования интегральных уравнений состояния задач вязкоупругости для случая деформации анизотропного массива горных пород к временным уравнениям закона Р. Гука. Предложенный подход не требует построения аналитического представления ядер ползучести и релаксации в специальной форме. Построены кривые ползучести и релаксации для алевролита и песчаника. Полученные экспериментальные данные использованы для нахождения всех элементов временной матрицы коэффициентов деформации.

Основные уравнения трехмерной теории вязкоупругости. Рассмотрим упругое равновесие анизотропного тела, отнесенного к декартовой системе координат $Ox_1x_2x_3$. В момент приложения внешних усилий или деформаций (время $t = 0$) упругие постоянные исследуемого материала характеризуются матрицей **A** (модулей упругости) или **a** (коэффициентов деформации), а решение является упругим. Дальнейшее поддержание усилий или деформаций (время $t > 0$) приводит к тому, что материал продолжает деформироваться. Для описания этого процесса используем теорию вязкоупругости, учитывающую свойство материала деформироваться во времени. Эта теория включает в себя такие группы уравнений:

- дифференциальные уравнения равновесия

$$\partial_1 s_1 + \partial_2 s_6 + \partial_3 s_5 + X = 0, \quad \partial_1 s_6 + \partial_2 s_2 + \partial_3 s_4 + Y = 0, \quad \partial_1 s_5 + \partial_2 s_4 + \partial_3 s_3 + Z = 0; \quad (1)$$

- уравнения связи между составляющими деформации и перемещений

$$\begin{aligned} e_1 &= \partial_1 U_1, \quad e_2 = \partial_2 U_2, \quad e_3 = \partial_3 U_3, \quad e_4 = \partial_2 U_3 + \partial_3 U_2, \\ e_5 &= \partial_1 U_3 + \partial_3 U_1, \quad e_6 = \partial_1 U_2 + \partial_2 U_1; \end{aligned} \quad (2)$$

- уравнения состояния, выражающие связь между напряжениями и деформациями

$$e_m(t) = a_{mk} s_k(t) + \int_0^t \frac{dP_{mk}(t-\tau)}{d(t-\tau)} s_k(\tau) d\tau; \quad (3)$$

$$s_m(t) = A_{mk} e_k(t) + \int_0^t \frac{dR_{mk}(t-\tau)}{d(t-\tau)} e_k(\tau) d\tau \quad (m, k = \overline{1,6}), \quad (4)$$

- граничные условия, заданные на частях поверхности тела

$$s_1 n_1 + s_6 n_2 + s_5 n_3 = P_1, \quad s_6 n_1 + s_2 n_2 + s_4 n_3 = P_2, \quad s_5 n_1 + s_4 n_2 + s_3 n_3 = P_3 \quad \text{на } \Sigma_P;$$

$$U_i = \tilde{U}_i \quad (i = \overline{1,3}) \quad \text{на } \Sigma_U. \quad (5)$$

В уравнениях (3), (4) используется суммирование по повторяющимся индексам.

В соотношениях (1)–(5) введены обозначения: $\mathbf{s}(t) = s_m(t) = [s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6]$, $\mathbf{e}(t) = e_m(t) = [e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6]$, $\mathbf{U}(t) = U_i(t) = [U_1, U_2, U_3]$ – векторы напряжений, деформаций и смещений в произвольный момент времени t ; $\mathbf{R} = R_{mk}$ и $\mathbf{P} = P_{mk}$ – регулярные части матриц функций релаксации и ползучести. Они характеризуют вязкоупругий материал так же, как их упругие аналоги, то есть модули упругости $\mathbf{R}(0) = \mathbf{A} = A_{mk}$ и коэффициенты деформации $\mathbf{P}(0) = \mathbf{a} = a_{mk}$ – характеризуют свойства упругого материала; $\partial_i = \partial / \partial x_i$, $n_i = \cos(n, x_i)$, n – внешняя нормаль к контуру.

Заданные объемные X , Y , Z и поверхностные P_1 , P_2 , P_3 силы, а также перемещения $\tilde{U}_i$ являются известными функциями времени.

Закон Гука для задачи теории упругости получаем из уравнений (3) и (4) в предположении, что $t = 0$. В компактной форме он представляется так:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon} \quad \text{или} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{a}\boldsymbol{\sigma}, \quad (6)$$

где $\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_m = s_m(0)$, $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_m = e_m(0)$ – векторы напряжений и деформаций в момент времени $t = 0$.

Мгновенные значения функций ползучести $\mathbf{P}(0) = \mathbf{a} = a_{mk}$, релаксации $\mathbf{R}(0) = \mathbf{A} = A_{mk}$, напряжений $s(0) = \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_m$ и деформаций $e(0) = \boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_m$ показывают, что функции времени наделяются начальными значениями, являющимися решением упругой задачи.

Соотношения (1)–(5) образуют полную систему дифференциально-алгебраических уравнений, описывающих вязкоупругие процессы в трехмерных анизотропных средах.

В работе предлагается привести решение задачи вязкоупругости к решению задач теории упругости в произвольно заданный момент времени. Это можно осуществить путем преобразования интегральных уравнений состояния (3) и (4) к уравнениям закона Гука с элементами матриц, зависящих от времени.

Преобразование уравнений состояния. Полагаем, что матрицы функций релаксации и ползучести представляются в форме

$$\mathbf{R}(t) = R_{mk}(t) = A_{mk}r_{mk}(t), \quad \mathbf{P}(t) = P_{mk}(t) = a_{mk}p_{mk}(t). \quad (7)$$

Соотношения (3) и (4) представим в форме

$$e_m = \bar{a}_{mk} s_k, \quad \bar{a}_{mk} = a_{mk} (1 + p_{mk}^*) \quad (m, k = \overline{1, 6}); \quad (8)$$

$$s_m = \bar{A}_{mk} e_k, \quad \bar{A}_{mk} = A_{mk} (1 - r_{mk}^*) \quad (m, k = \overline{1, 6}). \quad (9)$$

Каждый из временных операторов $\bar{A}_{mk}$ или $\bar{a}_{mk}$ состоит из двух элементов: упругой постоянной матрицы A_{mk} или a_{mk} , а также интегрального оператора $A_{mk}r_{mk}^*$ или $a_{mk}p_{mk}^*$, где

$$r_{mk}^* e_k(t) = - \int_0^t \frac{dr_{mk}(t-\tau)}{d(t-\tau)} e_k(\tau) d\tau, \quad (10)$$

$$p_{mk}^* s_k(t) = \int_0^t \frac{dp_{mk}(t-\tau)}{d(t-\tau)} s_k(\tau) d\tau. \quad (11)$$

Рассмотрим оператор $\bar{a}_{mk} = a_{mk} (1 + p_{mk}^*)$. Представляет интерес получения значений операторов p_{mk}^* . Рассмотрение задач установившейся ползучести осуществляется при нагрузках, постоянных во времени. Если нагрузки постоянны, то напряжения $s_k(\tau)$ в (11) можно принять зависимыми от верхнего предела и вынести из

под знака интеграла. Оператор (11) в этом случае будет таким:

$$p_{mk}^* \bullet 1 = \int_0^t \frac{dp_{mk}(t-\tau)}{d(t-\tau)} \bullet 1 d\tau = p_{mk}(t) - 1. \quad (12)$$

В опытах на релаксацию мгновенно прикладываются и поддерживаются постоянными деформации. Полагаем их зависимыми от верхнего предела и выносим за знак интеграла в уравнении (10). Оператор (10) в этом случае будет таким:

$$r_{mk}^* \bullet 1 = - \int_0^t \frac{dr_{mk}(t-\tau)}{d(t-\tau)} \bullet 1 d\tau = 1 - r_{mk}(t). \quad (13)$$

Значения функций ползучести $p_{mk}(t)$ и релаксации $r_{mk}(t)$ находятся из экспериментов. Значения операторов $p_{mk}^*(t)$ и $r_{mk}^*(t)$ определяются через функции ползучести и релаксации по формулам (12) и (13). Это дает возможность строить матрицы упругих коэффициентов уравнений состояния (8) – (9)

$$\bar{a}_{mk} = a_{mk} (1 + p_{mk}^*) = a_{mk} p_{mk}(t), \quad (14)$$

$$\bar{A}_{mk} = A_{mk} (1 - r_{mk}^*) = A_{mk} r_{mk}(t). \quad (15)$$

Уравнения состояния (8) – (9) имеют форму обычных уравнений закона Гука. Компоненты матриц упругих коэффициентов $\bar{a}_{mk}$ и $\bar{A}_{mk}$ вычисляются по формулам (14) и (15) и зависят от времени. Поэтому систему уравнений (1), (2), (8), (9), (5) следует рассматривать как систему теории упругости, зависящей от времени. Решение этой системы можно осуществлять в любой задаваемый момент времени t .

Определение реологических параметров. Отметим, что экспериментально найденные величины $p_{mk}(t)$ и $r_{mk}(t)$ позволяют сформировать матрицы $P(t)$ и $R(t)$ по формулам (7). Элементы этих матриц задаются таблично, дискретным набором значений, соответствующих некоторым фиксированным временам. При использовании таких данных в вычислениях, для обеспечения точности расчетов, необходимо осуществить математическую обработку табличных данных. Такая обработка включает в себя сглаживание кривых ползучести или релаксации и восполнение табличных данных путем увеличения числа точек разбиения временного отрезка $[0, t]$. Эти вопросы рассмотрены в работе [3].

Получение опытных данных из экспериментов по ползучести и релаксации, которые позволили бы определить все величины, входящие в правые части соотношений (14) и (15), наталкивается на значительные математические и технические трудности. Поэтому в литературе, как правило, полный набор таких данных отсутствует. Это приводит к необходимости прибегать к различным допущениям для уменьшения числа параметров, определяющихся из экспериментов. При решении конкретных задач применяются различные упрощающие предположения относительно реологического поведения материала. Остановимся на некоторых из них.

1. Связь между матрицами $P(t)$ и $R(t)$ установлена в работах [4, 5]

$$R_k = A - \sum_{i=1}^k R_{k-i} (P_i - P_{i-1}) A \quad (k = 0, 1, \dots, N); \quad (16)$$

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{a} - \sum_{i=1}^k \mathbf{P}_{k-i} (\mathbf{R}_i - \mathbf{R}_{i-1}) \mathbf{a} \quad (k = 0, 1, \dots, N), \quad (17)$$

где $\mathbf{P}_i = \mathbf{P}(t_i)$, $\mathbf{R}_i = \mathbf{R}(t_i)$, $\mathbf{P}_{k-i} = \mathbf{P}(t_k - t_i)$, $\mathbf{R}_{k-i} = \mathbf{R}(t_k - t_i)$ – значения функций в соответствующие моменты времени.

С помощью представлений (16) по экспериментально полученным значениям функции ползучести в точках сетки находим функции релаксации, а с помощью (17) – наоборот. Таким образом, соотношения (16) и (17) полностью решают задачу обращения уравнений (3) или (4). С другой стороны соотношения (16) и (17) позволяют вдвое сократить число функций, определяемых из эксперимента.

Связь между функциями ползучести и релаксации в одномерном случае имеет тот же вид (16) и (17), где матрицы следует заменить их элементами.

2. Положим в операторах (12)–(15) $t = 0$ и $t \rightarrow \infty$. Получим матрицы мгновенных и длительных коэффициентов упругости. Эти матрицы симметричны, то есть $\bar{a}_{mk}(0) = \bar{a}_{km}(0)$, $\bar{a}_{mk}(\infty) = \bar{a}_{km}(\infty)$, $\bar{A}_{mk}(0) = \bar{A}_{km}(0)$, $\bar{A}_{mk}(\infty) = \bar{A}_{km}(\infty)$ [6]. Симметрия операторных модулей для других значений времени не выполняется. Однако в большинстве приложений и в данной работе симметрия матрицы операторных модулей и податливостей постулируется для всех значений времени [6]. Из соотношений (7), (14) и (15) следует, что в этом случае симметричными будут и матрицы $\mathbf{P}(t)$ и $\mathbf{R}(t)$. Симметрия этих матриц показывает, что должны выполняться равенства $P_{mk} = P_{km}$, $R_{mk} = R_{km}$. Отсюда следует, что количество параметров, определяемых из эксперимента, значительно уменьшилось.

3. В случае изотропного материала часто используется допущение об упруго сжимаемом материале. Это позволяет по заданному интегральному оператору $\bar{\mathbf{v}}$ определять оператор $\bar{\mathbf{E}}$ и наоборот [7].

Для анизотропного материала введем допущения, аналогичные принятым предположениям для изотропного материала. Рассмотрим величину обратную модулю объемной деформации при гидростатическом давлении [8]

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{2} \left[\frac{1-2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1-2\nu_{21}}{E_2} + \frac{1-2\nu_{23}}{E_2} + \frac{1-2\nu_{32}}{E_3} + \frac{1-2\nu_{31}}{E_3} + \frac{1-2\nu_{13}}{E_1} \right]. \quad (18)$$

Упругие постоянные, входящие в представление (18), для всякого однородного анизотропного тела удовлетворяют условию [9]

$$\frac{1-2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1-2\nu_{21}}{E_2} + \frac{1-2\nu_{23}}{E_2} + \frac{1-2\nu_{32}}{E_3} + \frac{1-2\nu_{31}}{E_3} + \frac{1-2\nu_{13}}{E_1} \geq 0. \quad (19)$$

Следуя [7], потребуем, чтобы оператор, соответствующий величине (18), был постоянным

$$1/\bar{K} = 1/K = \text{const}. \quad (20)$$

Считая объемную деформацию упругой, полагаем приведенные ниже слагаемые представления (19) постоянными

$$\frac{1-2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1-2\nu_{21}}{E_2} = \frac{1-2\bar{\nu}_{12}}{\bar{E}_1} + \frac{1-2\bar{\nu}_{21}}{\bar{E}_2}, \quad \frac{1-2\nu_{23}}{E_2} + \frac{1-2\nu_{32}}{E_3} = \frac{1-2\bar{\nu}_{23}}{\bar{E}_2} + \frac{1-2\bar{\nu}_{32}}{\bar{E}_3},$$

$$\frac{1-2\nu_{31}}{E_3} + \frac{1-2\nu_{13}}{E_1} = \frac{1-2\bar{\nu}_{31}}{\bar{E}_3} + \frac{1-2\bar{\nu}_{13}}{\bar{E}_1}. \quad (21)$$

Условия (21) дают постоянство соотношению (20), а из условия (19) следует, что анизотропное тело в условиях ползучести находится в упругом состоянии. Соотношения (21) позволяют определить величины $\bar{\nu}_{ik}$ по известному значению операторов $\bar{E}_i$ и наоборот. Возможны и другие предположения [10].

Модель массива горных пород. Массив горных пород рассматривается как нижнее полупространство, отнесенное к декартовой системе координат $Ox_1x_2x_3$. Начало системы поместим на глубине H , ось Ox_2 направим вертикально вверх, а плоскость Ox_1x_3 параллельна плоскости, ограничивающей полупространство. Массив обладает анизотропией общего вида. Наиболее часто массив горных пород является трансверсально-изотропной средой. Такая среда может служить моделью слоистого массива осадочного происхождения с плоскостями изотропии, параллельными слоям. В предположении, что толщина слоя на порядок меньше характерного поперечного размера горной выработки, модель допускает ее использование при исследовании напряженно-деформированного состояния вблизи горных выработок [11]. Рассмотрим более подробно такую среду.

При испытании образцов горных пород на ползучесть их относят к системе координат $Oxuz$, когда плоскость Oxu совпадает с плоскостью изотропии и она горизонтальна, а ось Oz – нормальна к этой плоскости. В этой системе координат уравнения закона Гука примут вид

$$\varepsilon_m^1 = C_{mk} \sigma_k^1 \quad (m, k = \overline{1, 6}). \quad (22)$$

Ниже приведены значения элементов матрицы C_{mk} , отличные от нуля:

$$\begin{aligned} C_{11} = C_{22} = 1/E_1, \quad C_{12} = C_{21} = -\nu_1/E_1, \quad C_{33} = 1/E_2, \quad C_{44} = C_{55} = 1/G_2, \\ C_{13} = C_{31} = C_{23} = C_{32} = -\nu_2/E_2, \quad C_{66} = 1/G_1 = 2(1+\nu_1)/E_1, \end{aligned} \quad (23)$$

где E_1, E_2 – модули Юнга для растяжения - сжатия в направлении плоскости изотропии и нормальном к ней; ν_1 – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в плоскости изотропии при растяжении в этой плоскости, а ν_2 – при растяжении в направлении нормальном к плоскости изотропии; G_1, G_2 – модули сдвига для плоскости изотропии и нормальной к ней.

Пусть на глубине H пройдена горизонтальная выработка произвольного поперечного сечения. Полагаем, что плоскость изотропии расположена под углом φ к горизонту, а выработка направлена под углом ψ к плоскости изотропии. Систему координат $Ox_1x_2x_3$ удобнее связать с выработкой. Плоскость Ox_1x_2 совместим с поперечным сечением выработки, ось Ox_2 направим вертикально вверх, а Ox_3 – вдоль выработки. Переход от системы координат $Oxuz$ к системе $Ox_1x_2x_3$ осуществляется путем поворота на угол φ вокруг оси $Oy = Ox_3$, а затем вокруг оси $Oz = Ox_2$ на угол

ψ . В системе координат $Ox_1x_2x_3$ уравнения закона Гука (22) примут вид второго соотношения (6). Упругие постоянные a_{mk} получаются из постоянных C_{mk} путем преобразований, возникающих при повороте координатных осей на углы φ и ψ . Если угол наклона плоскости изотропии отличен от нуля ($\varphi \neq 0$), то в зависимости от направления оси выработки к плоскости изотропии (угол ψ – произволен) уравнения закона Гука в системе координат $Ox_1x_2x_3$ будут иметь вид уравнений для материала, обладающего общей анизотропией [12].

Формирование матрицы $\bar{C}_{mk}$. При решении задач вязкоупругости уравнения закона Гука (22) необходимо трансформировать в уравнения состояния вида (8). Рассмотрим уравнение

$$e_m^1 = \bar{C}_{mk} s_k^1 \quad (m, k = \overline{1, 6}). \quad (24)$$

Упругие постоянные C_{mk} заменяются операторами вида (8) $\bar{C}_{mk} = C_{mk} (1 + p_{mk}^*)$, а напряжения и деформации определяются соотношениями $s_k^1(t=0) = \sigma_k^1$, $e_m^1(t=0) = \varepsilon_m^1$.

Рассмотрим задачу определения значений интегральных операторов p_{mk}^* , входящих в представления для величин $\bar{C}_{mk}$. Для этого используем свойства резольвентных операторов. В работе [7] построена алгебра операторов Вольтерра для специального класса операторов с дробно-экспоненциальными ядрами. В статье [2] показано, что построение алгебры операторов Вольтерра не связано с каким-либо специальным видом ядра и может быть осуществлено для любых резольвентных операторов. Интегральные операторы с произвольными ядрами обладают теми же свойствами, которые были доказаны для операторов с дробно-экспоненциальными ядрами.

Интегральные операторы вязкоупругости являются взаимно резольвентными. Это следует из однозначной взаимнообратимости уравнений состояния (3) и (4). Из этого факта и свойств операторов с произвольными ядрами следует, что при решении граничных задач вязкоупругости нет необходимости строить конкретный вид резольвентных операторов и изучать их свойства. Процедура построения решения связана с алгебраическими свойствами операторов и может быть осуществлена независимо от их вида. Решение выражается через значения резольвентного оператора. Покажем, что реализация решений граничных задач вязкоупругости может быть осуществлена без каких-либо конкретных аналитических заданий исходных операторов.

Матрица $\bar{C}_{mk}$ формируется с помощью технических упругих постоянных (23), которые в процессе длительного нагружения заменяются временными интегральными операторами. Из экспериментов на ползучесть или релаксацию определяются операторы именно технических упругих постоянных. В работе [1] приведены результаты экспериментов на ползучесть для образцов различных изотропных горных пород. Экспериментам были подвергнуты образцы наиболее распространенных видов донбасских горных пород: алевролит, аргиллит, песчаник и известняк. В результате опытов установлено, что горные породы под воздействием нагрузок, не превосходящих 70 % разрушающих, обнаруживают свойства ползучести. Величины деформаций

ползучести ко времени ее стабилизации достигают 150–370 % упругих деформаций. Продолжительность ползучести алевролита и аргиллита составляет до 600 час., песчаника – до 860, а известняка – 50 час. Процесс ползучести горных пород подчиняется общему закону линейного деформирования, определяемого уравнениями состояния теории наследственности Вольтерра. Из элементов C_{mk} матрицы (22) формируются временные операторы $\bar{C}_{mk}$ в форме (8), т. е. $\bar{C}_{mk} = C_{mk} \left[1 + p_{mk}^*(\delta_{mk}) \right]$, где δ_{mk} – регулярная точка [2].

Предположим, что из опыта получена кривая ползучести для величины

$$\bar{C}_{11} = \bar{C}_{22} = 1 / \bar{E}_1 = \frac{1}{E_1} \left[1 + p_{11}^*(\delta_{11}) \right] = \frac{1}{E_1} p_{E1}(t). \quad (25)$$

Здесь $p_{E1}(t)$ – таблично заданная кривая ползучести для величины $1 / E_1$, полученная из эксперимента.

Из соотношения (25) найдем значение интегрального оператора

$$p_{11}^*(\delta_{11}) = p_{E1}(t) - 1. \quad (26)$$

Аналогичным образом из соотношения

$$\bar{v}_1 = v_1 \left[1 + p_{v1}^*(\delta_{v1}) \right] = v_1 p_{v1}(t) \quad (27)$$

определяется интегральный оператор $p_{v1}^*(\delta_{v1})$ по заданной кривой ползучести $p_{v1}(t)$

$$p_{v1}^*(\delta_{v1}) = p_{v1}(t) - 1. \quad (28)$$

Оператор $\bar{C}_{12} = \bar{C}_{21} = -\bar{v}_1 / \bar{E}_1$ определяется путем использования представлений (25), (27), свойств операторов с произвольными ядрами и представляется в форме

$$\bar{v}_1 / \bar{E}_1 = \frac{v_1}{E_1} \left[1 + \lambda_{11} p_{11}^*(\delta_{11}) + \lambda_{v1} p_{v1}^*(\delta_{v1}) \right], \quad (29)$$

$$\lambda_{11} = 1 + 1 / (\delta_{11} - \delta_{v1}), \quad \lambda_{v1} = 1 - 1 / (\delta_{11} - \delta_{v1}).$$

Значение оператора (29) получим путем замены в правой части интегральных операторов их значениями по формулам (26) и (28).

При решении граничных задач анизотропной теории вязкоупругости возникают трудности, связанные с экспериментальным определением реологических параметров материалов. Опытные данные, которые имеются в литературе, не содержат полной информации о величинах, необходимых для решения задач вязкоупругости. Поэтому используются различные допущения относительно реологических параметров. Например, если экспериментальные значения величины $\bar{v}_1$ не известны, то они могут быть определены согласно предположению, что оператор объемного сжатия является постоянной величиной [7]. Это означает, что имеют место соотношения (21). Из первого равенства этих соотношений находим

$$\bar{C}_{12} = \bar{C}_{21} = \frac{\bar{v}_1}{\bar{E}_1} = \frac{v_1}{E_1} \left[1 + \frac{1}{2v_1} (p_{E1}(t) - 1) \right]. \quad (30)$$

Второе и третье равенства соотношений (21) приводятся к виду

$$\frac{1}{E_1} - \frac{2v_2}{E_2} + \frac{1}{E_2} - \frac{2v_2}{E_2} = \frac{1}{\bar{E}_1} - \frac{2\bar{v}_2}{\bar{E}_2} + \frac{1}{\bar{E}_2} - \frac{2\bar{v}_2}{\bar{E}_2}. \quad (31)$$

Из уравнения (31), в предположении, что $\frac{1}{E_1} - \frac{2v_2}{E_2} = \frac{1}{\bar{E}_1} - \frac{2\bar{v}_2}{\bar{E}_2}$, находим

$$\frac{\bar{v}_2}{\bar{E}_2} = \frac{v_2}{E_2} \left[1 + \frac{E_2}{2E_1 v_2} (p_{E1} - 1) \right], \quad \frac{1}{\bar{E}_2} = \frac{1}{E_2} \left[1 + \frac{E_2}{E_1} (p_{E1} - 1) \right]. \quad (32)$$

Значение оператора $\bar{C}_{66}$ определяется через известные операторы по формуле

$$\bar{C}_{66} = 2 \left(\frac{1}{\bar{E}_1} + \frac{\bar{v}_1}{\bar{E}_1} \right). \quad (33)$$

Экспериментальные данные о ползучести элементов матрицы $C_{44} = C_{55} = 1/G_2$ отсутствуют. Поэтому будем считать, что $1/G_2 = 1/\bar{G}_2$.

Таким образом, получены значения интегральных операторов для компонент матрицы (22). Дальнейшее преобразование матрицы $\bar{C}_{mk}$ осуществляется при переходе к другим системам координат, поворотом на угол φ , а затем на угол ψ . В результате получается матрица операторных функций $\mathbf{P}(t) = \bar{\mathbf{a}}_{mk}$. После определения матрицы ползучести $\mathbf{P}(t)$ матрицу релаксации $\mathbf{R}(t)$ построим путем использования соотношений (16).

Как видно, в предложенной методике не ставится вопрос о выборе ядер ползучести или релаксации для реальных материалов, обладающих ползучестью. На основе свойств резольвентных операторов для интегральных уравнений с ядрами произвольного вида предложен метод получения решения задач вязкоупругости путем использования непосредственно экспериментальных данных, заданных таблично. Предварительно табличные данные подвергаются сглаживанию и восполнению.

В работе [1] приведены результаты экспериментов по ползучести образцов указанных выше изотропных горных пород. Измерялась только продольная деформация. Оператор $1/\bar{E}_1$ аппроксимировался с помощью соотношения

$$\frac{1}{\bar{E}_1} = \frac{1}{E_1} \left[1 + \frac{\delta}{1-\alpha} t^{1-\alpha} \right], \quad (34)$$

где значения реологических величин δ и α для двух из указанных выше изотропных горных пород приведены в таблице.

Таблица

Материал	$\delta, (сек)^{\alpha-1}$	α	$e_1 = E_1 / (9.81 \times 10^3 \text{ МПа})$	v_1	$\rho, \text{ кг/м}^3$
алевролит 1	0,0094	0,726	0,62	0,2	2500
песчаник 1	0,0021	0,670	2,95	0,16	2500

Соотношение (34) не имеет асимптоты, и при достижении стабилизации процесса ползучести – для алевролита $t_{st} = 600$ часов, а для песчаника – $t_{st} = 860$, формула (34) не может быть применена. Поэтому для описания реального процесса ползучести предлагается использовать формулу, которая имеет асимптоту и дает близкие с формулой (34) результаты:

$$\frac{1}{E_1} = \frac{1}{E_1} \left[\left(1 + \frac{\delta}{1-\alpha} t^{1-\alpha} \right) r + \left(1 + \frac{\delta}{1-\alpha} t_{st}^{1-\alpha} \right) (1-r) \right] = \frac{1}{E_1} p_{E_1}(t), \quad (35)$$

где величина $r = (t_{st} - t) / t_{st}$, если $t \leq t_{st}$, и $r = 0$, если $t > t_{st}$.

Операторный коэффициент Пуассона $\bar{\nu}_1$ не определялся. Поэтому матричные элементы $\bar{C}_{12} = \bar{C}_{21}$ следует определять из представления (30). Операторный коэффициент $\bar{C}_{66} = 1 / \bar{G}_1$ определяется из соотношения (33). Поскольку для изотропного материала имеют место равенства $\nu_1 = \nu_2$, $E_1 = E_2$, то матрица уравнений состояния изотропного материала сформирована.

Горные породы по своей структуре анизотропны. Экспериментальные данные о параметрах ползучести пород – малочисленны. В пределах точности измерений для образцов транстропных пород не установлены различия параметров ползучести по разным направлениям [13]. В данной работе при проведении расчетов для транстропных пород используются реологические постоянные, полученные для изотропных материалов. В качестве таких пород приняты алевролит и песчаник транстропные [11]:

алевролит 2

$$e_1 = 1.074, \quad e_2 = 0.523, \quad g_2 = 0.120, \quad \rho = 2500, \\ \nu_1 = 0.413, \quad \nu_2 = 0.198, \quad \delta = 0.0094, \quad \alpha = 0.726;$$

песчаник 2

$$e_1 = 2.987, \quad e_2 = 3.411, \quad g_2 = 0.215, \quad \rho = 2500, \\ \nu_1 = 0.134, \quad \nu_2 = 0.150, \quad \delta = 0.0021, \quad \alpha = 0.670.$$

Значения величин E_1 , E_2 , G_2 выражаются через безразмерные величины e_1 , e_2 , g_2 по формулам $E_1 = e_1 \times 9.81 \times 10^3$ МПа, $E_2 = e_2 \times 9.81 \times 10^3$ МПа, $G_2 = g_2 \times 9.81 \times 10^3$ МПа.

Анализ результатов. На рис. 1 приведены кривые ползучести: кривая 1 – для материала алевролит 2; кривая 2 – для материала песчаник 2. Эти экспериментальные кривые построены по формуле (35). Соответствующие кривые релаксации – 3 для материала алевролит 2 и 4 для материала песчаник 2 – построены путем использования соотношений (16). Из рис. 1 видно, что в начальные моменты времени процесс ползучести для материала алевролит 2 происходит быстрее, чем для материала песчаник 2. Полученные экспериментальные кривые могут быть использованы для нахождения всех элементов временной матрицы уравнений состояния по формулам (35), (30), (32), (33).

На рис. 2 с точностью до 9.8×10^3 МПа представлены кривые изменения во времени всех элементов матрицы уравнений состояния для материала алевролит 2.

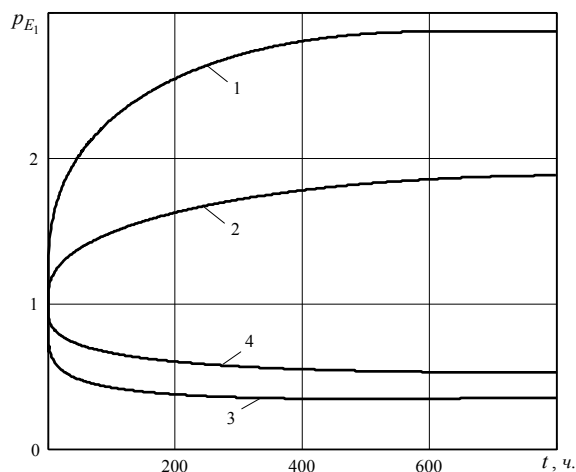


Рис. 1

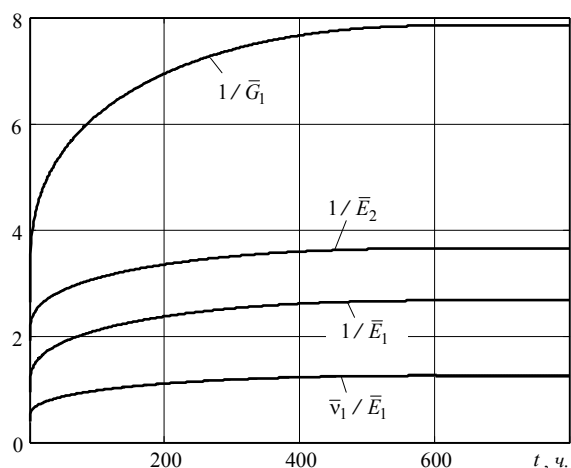


Рис. 2

Элемент $1/\bar{G}_2$ полагается не изменяющимся во времени, поэтому на рис. 2 он не приведен. Кривые для $\bar{v}_1/\bar{E}_1$ и $\bar{v}_2/\bar{E}_2$ на рисунке совпали. Видно, что наибольшее изменение получает кривая ползучести для элемента матрицы состояния $1/\bar{G}_1$.

Выводы. В работе предложена методика преобразования интегральных уравнений состояния задач вязкоупругости для случая деформации анизотропного массива горных пород к временным уравнениям закона Гука. Показано, что реализация решений граничных задач вязкоупругости может быть осуществлена без каких-либо конкретных аналитических заданий исходных операторов. Предложены упрощающие предположения, которые позволяют уменьшить число параметров, определяющихся из эксперимента. На основе свойств резольвентных операторов для интегральных уравнений с ядрами произвольного вида предложен метод получения кривых ползучести и релаксации путем использования непосредственно экспериментальных данных, заданных таблично. Предварительно табличные данные сглаживаются и восполняются. Показано, как на основании экспериментальных данных можно получить элементы матрицы состояния в любой момент времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ержанов Ж.С. Теория ползучести горных пород и ее приложения / Ж.С. Ержанов. – Алма-Ата: Наука, 1964. – 175 с.
2. Громов В.Г. Алгебра операторов Вольтерра и ее применение в задачах вязкоупругости / В.Г. Громов // Доклады АН СССР. – 1968. – Т. 182, № 1. – С. 56 – 59.
3. Шевченко В.П. Численно-аналитический метод решения задач линейной теории вязкоупругости / В.П. Шевченко, Р.Н. Нескороев // Прикл. механика. – 2014. – Т. 50, № 3. – С. 42 – 53.
4. Нескороев Р.Н. О новом численно-аналитическом методе решения задач теории вязкоупругости анизотропных сред / Р.Н. Нескороев // Вісник Донецького національного університету. Сер.А: Природн. науки. – 2009. – Вип. 2. – С. 7 – 15.
5. Шевченко В.П., Нескороев Р.Н. Новый метод решения задач вязкоупругости анизотропных сред / В.П. Шевченко, Р.Н. Нескороев // Доповіді НАН України. – 2010. – № 11. – С. 51 – 58.
6. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
7. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
8. Ашкенази Е.К. Анизотропия конструкционных материалов: Справочник / Е.К. Ашкенази, Э.В. Ганов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 247 с.
9. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела / С.Г. Лехницкий. – М.: Наука, 1977. – 415 с.
10. Каминский А. А. Неклассические проблемы механики разрушения: В 4 т. Т.1. Разрушения вязкоупругих тел с трещинами / А.А. Каминский. – К.: Наук. думка, 1990. – 312 с.

11. Ержанов Ж.С. Сейсмонапряженное состояние подземных сооружений в анизотропном слоистом массиве / Ж.С. Ержанов, Ш.М. Айталиев, Ж.К. Масанов. – Алма-Ата: Наука, 1980. – 212 с.
12. Нескороев Н.М. Напряжения вокруг выработок в анизотропном горном массиве / Н.М. Нескороев, Р.Н. Нескороев. – Донецк: ДонНУ, 2003. – 148 с.
13. Айталиев Ш.М. Развитие механики подземных и специальных сооружений в Казахстане за последние 40 лет / Ш.М. Айталиев // Прикл. механика. – 2004. – Т. 40, № 10. – С. 3 – 36.

Поступила в редакцию 06.06.2016 г.

TRANSFORMATION OF INTEGRAL EQUATIONS OF VISCOELASTIC STATE OF ROCKS TO EQUATION OF TIME HOOKE'S LAW

R.N. Neskorodev

The paper propose a method of conversion of integral equations status of viscoelasticity tasks for the case of anisotropic deformation of the rock mass to the equation of time Hooke's law. This approach does not require the construction of an analytic representation of the kernel of creep and relaxation in a special form. Curves creep and relaxation for siltstone and sandstone. The experimental data were used to find all the elements of the matrix time deformation coefficients.

Keywords: creep, relaxation, viscoelasticity, anisotropic rock mass.

Нескороев Роман Николаевич

кандидат физико-математических наук, доцент,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
г. Донецк, доцент кафедры теории упругости и
вычислительной математики
E-mail: nromn@i.ua
Тел.: 050-284-87-08

Neskorodev Roman Nikolaevich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent,
Donetsk national university, Donetsk, Associate
Professor at the Department of Elasticity Theory and
Computational Mathematics

Ф И З И К А

УДК 621.318.134

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ
РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ
NiZn ФЕРРИТОВ**

© 2016. *Ю.А. Алехов, А.Н. Пересадченко, И.Н. Волошанович*

Экспериментально исследовано влияние концентрации Zn на магнитные спектры никель-цинкового феррита. Установлено влияние концентрации и крупности ферритового наполнителя на радиопоглощающие свойства испытываемых материалов.

Ключевые слова: ферритовые радиопоглощающие материалы, NiZn, радиофизические характеристики, композиты.

Введение. Интенсивное развитие радио- и электронной техники в СВЧ диапазоне потребовало решения проблем защиты радиотехнического оборудования и объектов от внешних электромагнитных излучений. Радиопоглощающие материалы (РПМ) являются основным средством решения этих проблем. На сегодня не существуют универсальных РПМ способных обеспечить приемлемые свойства во всем частотном диапазоне электромагнитных волн. Происходит непрерывный поиск материалов, которые обеспечивают эффективное экранирование и поглощение электромагнитных волн [1]. С целью расширения частотного диапазона РПМ, управления их характеристиками все большую роль придают разработке и изучению магнитоэлектрических свойств композиционных материалов [2]. В диапазоне частот от десятков МГц до десятка ГГц наилучшие показатели поглощения электромагнитного излучения демонстрируют поликристаллические ферриты никель – цинковой системы [3], что дает основание для выбора вышеуказанных ферритов в качестве основы для композитных радиопоглощающих материалов с управляемыми свойствами. Это обеспечивает расширение функциональных возможностей поглотителей радиоволн благодаря сочетанию разнообразных механизмов, приводящих к потерям энергии электромагнитного поля. Добиться повышения уровня и расширения полосы эффективного поглощения можно за счет комбинирования различных исходных компонентов. Изучение спектров диэлектрической и магнитной проницаемости композиционных материалов на основе гранулированных NiZn ферритов в парафине, поливинилацетатном клее и силиконовом герметике показало, что микроволновые свойства композита соответствуют поведению компонентов композита [4]. Физические свойства ферритов во многом зависят от условий изготовления, например, времени спекания, температуры, типа и количества добавок [5], что не позволяет с приемлемой точностью рассчитать основной параметр радиопоглощающих материалов – коэффициент ослабления отраженного электромагнитного излучения.

В работе исследуется влияние состава никель-цинкового феррита на магнитные спектры, а также влияние концентрации и крупности ферритового наполнителя на коэффициент ослабления отраженного электромагнитного излучения композита. Обсуждается возможность управления поглощающими свойствами композита.

Методика эксперимента. Процесс получения композиционных материалов состоит из следующих операций: приготовление порошка (магнитного наполнителя),

изолирование частиц порошка путем смешения его со связующим, прессование изделий необходимой формы.

Для изготовления композиционных материалов на основе керамических ферритов из смеси оксидов никеля, цинка и железа по керамическому методу при температуре спекания 1250 °С синтезировали ферриты состава $\text{Ni}_{1-n}\text{Zn}_n\text{Fe}_2\text{O}_4$, где $n = 0,2; 0,5; 0,7$. Рентгенофазовый анализ синтезированных керамических образцов, проведенный на дифрактометре ДРОН-3, показал, что все они имеют однофазную структуру шпинели. Полученные ферриты подвергли измельчению до состояния порошка с размером частиц меньше 100 мкм. Ферритовый порошок смешали с полипропиленовым порошком в соотношении 85:15 и методом осевого одностороннего горячего прессования в жесткой металлической пресс-форме под давлением 0,8 т/см² изготовили композиционные кольцевые образцы. На изготовленных таким образом образцах измерены магнитные спектры в диапазоне частот 10–7500 МГц на лабораторном стенде с использованием измерителей полных сопротивлений РЗ-32, РЗ-34 и коаксиального резонатора переменной длины – измерителя параметров диэлектриков и ферритов ИПДФ – 1М.

Для исследования частотной зависимости коэффициентов отражения плоской электромагнитной волны от однослойных композиционных пластин, изготовлены образцы одинаковой толщины с различным содержанием ферритового порошка состава $\text{Ni}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ в композите – (95 % масс, 80 % масс, 70 % масс).

Ферритовый порошок состава $\text{Ni}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ разделили на следующие фракции: от 125 до 250 мкм, от 40 до 125 мкм, менее 40 мкм. Каждую фракцию смешали с полипропиленовым порошком в соотношении 10:1 и изготовили композиционные пластины для измерения коэффициентов отражения плоской электромагнитной волны.

Для измерения свойств радиопоглощающих покрытий в диапазоне частот 750–15000 МГц применили рупорный метод измерения коэффициента отражения электромагнитного излучения, как наиболее соответствующий условиям предполагаемой эксплуатации исследуемого материала. Метод основан на фазовой селекции отраженной волны в линии, имеющей неподвижный электрический зонд и перемещающуюся нагрузку в виде поверхности испытываемого материала [6]. Установку калибровали по эталонным образцам органического стекла с $\epsilon' = 2,64$.

Результаты эксперимента. На рис. 1 показаны магнитные спектры композиционных материалов, изготовленных на основе керамических никель-цинковых ферритов состава $\text{Ni}_{1-n}\text{Zn}_n\text{Fe}_2\text{O}_4$, где числа у кривых n последовательно равны 0,2, 0,5, 0,7. Диапазон частоты f составляет от 10 до 7500 МГц.

По данным рис. 1 видно, что увеличение содержания цинка в феррите приводит к увеличению действительной и мнимой составляющей комплексной магнитной проницаемости при одновременном смещении максимума в низкочастотную область. В области измерений величина действительной составляющей μ' при n равном 0,5 и 0,7 с ростом частоты довольно быстро спадает. При концентрации цинка 0,2 наблюдается область частот, где величина μ' постоянна. Мнимая часть начальной магнитной проницаемости μ'' имеет ярко выраженный максимум, особенно при n равном 0,5 и 0,7.

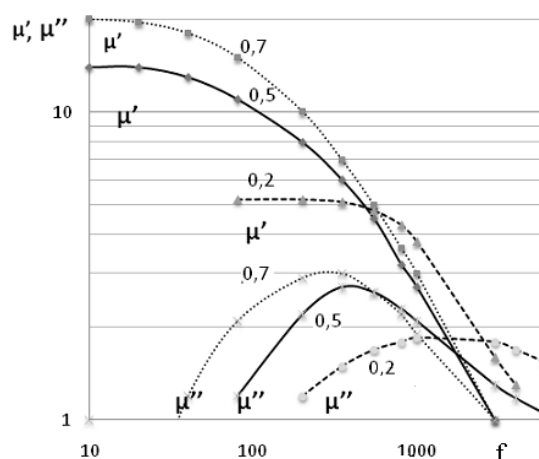


Рис. 1

Уменьшение доли цинка в феррите приводит к сдвигу мнимой части начальной магнитной проницаемости в область высоких частот при одновременном уменьшении ее величины. Кривые μ'' незначительно ассиметричны, имеют более пологий спад в сторону высоких частот.

На рис. 2 и 3 показана частотная зависимость модуля коэффициента отражения по мощности плоской электромагнитной волны в процентах от однослойных композиционных пластин одинаковой толщины (5 мм) изготовленных на основе ферритового порошка состава $\text{Ni}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$. Результаты измерения коэффициента поглощения композита при разной концентрации ферритового порошка показаны на рис. 2. Кривая 1 показывает результаты измерения поглощения композита, в котором феррит составляет 95 % массы. Кривые 2 и 3 показывают результаты измерений отражающих свойств композитов при доли феррита в составах соответственно 80 % и 70 % массы. Как видно из рисунка уменьшение концентрации ферритового наполнителя от 95 % масс. до 70 % масс. приводит к смещению основного минимума частотной зависимости коэффициентов отражения от 2 ГГц до 8 ГГц. Кроме того ширина диапазона поглощения при значении коэффициента поглощения менее 20 % увеличивается при уменьшении концентрации феррита.

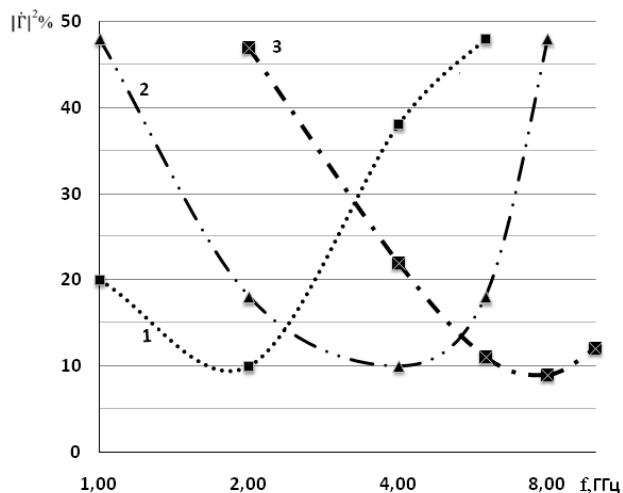


Рис. 2

Результаты измерения модуля коэффициента отражения композита при различной крупности феррита показаны на рис. 3, где кривая 1 соответствует размеру частиц от 125 до 250 мкм, 2 – размеру от 40 до 125 мкм; 3 – менее 40 мкм.

По данным рис. 3 видно, что уменьшение размера частиц ферритового порошка $\text{Ni}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ приводит к смещению основного минимума частотной зависимости коэффициентов отражения в частотном диапазоне 0,3–3 ГГц в более высокочастотную область.

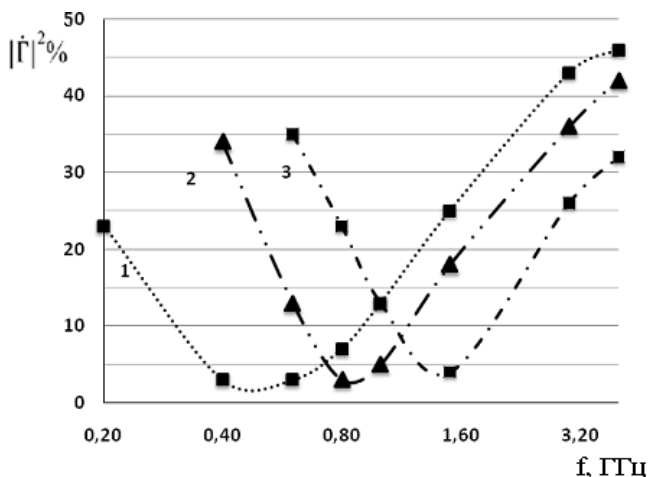


Рис. 3

Обсуждение результатов. Магнитные свойства оксидов со структурой шпинели во многом зависят от распределения катионов по подрешоткам кристаллической структуры. В никель-цинковых ферритах ионы Ni^{2+} размещаются в октаэдрических B – позициях, а ионы Zn^{2+} в тетраэдрических A – позициях в соответствии с их энергиями предпочтения. При последовательном замещении ионов никеля ионами цинка в никель-цинковом феррите происходит постепенное изменение ферромагнитного упорядочения на антиферромагнитное. Никелевый феррит является коллинеарным ферромагнетиком, а цинковый феррит антиферромагнетиком [7]. Магнитное состояние никель-цинковых ферритов в области больших концентраций цинка, где в результате конкуренции меж- и внутривузловых отрицательных обменных взаимодействий наблюдается

отклонение от неелевского ферримагнитного упорядочения, является предметом многолетних дискуссий. Ферриты с содержанием цинка 0,90 и 1,0 не являются ферримагнитными. Согласно [8] детальное исследование никель-цинковых ферритов с помощью нейтронографических и магнитных методов показало, что при концентрации цинка 0,90 отсутствует какой-либо тип дальнего магнитного порядка. Изучение магнитного состояния никель-цинковых ферритов в области больших концентраций цинка показывает резкое уменьшение магнитного момента при концентрации цинка в интервале 0,6–0,8 [8].

Выбор ферритов никель-цинковой системы обусловлен тем, что магнитный спектр данной системы максимально удовлетворяет условиям поглощения электромагнитной энергии СВЧ диапазона [3, 9]. Для определения оптимального состава никель – цинкового феррита синтезирован следующий ряд ферритов $\text{Ni}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4$, $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, $\text{Ni}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$. Из измерения магнитного спектра композита согласно данным рис. 1 видно, что увеличение содержания цинка в феррите приводит к увеличению действительной и мнимой составляющей комплексной магнитной проницаемости композита при одновременном смещении максимума последней в менее высокочастотную область. Это дало основание для выбора поликристаллического феррита состава $\text{Ni}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ как магнитного наполнителя композиционного радиопоглощающего материала.

Поглощение энергии радиоволн в феррите происходит вследствие магнитных потерь при движении стенок доменов или вращении магнитных моментов. На величину комплексной магнитной проницаемости влияют немагнитные включения, поры, а в поликристаллических материалах – размер зерна. Законченной теории магнитной проницаемости до настоящего времени не существует ввиду трудности аналитического описания роли структурных факторов. Кроме структурных параметров, на величину магнитной проницаемости влияют температура, напряженность и частота электромагнитного поля.

Магнитные потери поликристаллического ферритового материала зависят от среднего размера зерна. Чем крупнее зерна, тем больше мнимая часть μ'' комплексной магнитной проницаемости [5]:

$$\mu^* = \mu' - j\mu'',$$

определяющая потери электромагнитной энергии. Управляя средним размером зерна, можно управлять величиной магнитных потерь поликристаллического ферритового материала.

Уменьшение концентрации ферритового наполнителя от 95 % масс. до 70 % масс. приводит к смещению основного минимума частотной зависимости коэффициентов отражения от 2 ГГц до 8 ГГц (рис. 2). Это обусловлено уменьшением взаимодействия между отдельными частицами ферритовой фазы.

Известно, что магнитные свойства поликристаллического ферритового зависят от среднего размера зерна [9]. Чем крупнее зерна, тем больше мнимая часть комплексной магнитной проницаемости никель-цинкового наполнителя композиционного материала. По данным рис. 3 видно, что уменьшение размера частиц ферритового порошка $\text{Ni}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ приводит к смещению основного минимума частотной зависимости коэффициентов отражения в частотном диапазоне 0,3–3 ГГц в более высокочастотную область при относительно постоянной широкодиапазонности.

Выводы. Таким образом, установлено, что состав $\text{Ni}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ является оптимальным для композитного радиопоглощающего материала, работающего, в исследованном диапазоне. Показано, что изменяя гранулометрический состав порошка-наполнителя от 250 мкм до 40 мкм и менее 40 мкм и его концентрацию от

95 % масс. до 70 % масс., можно корректировать рабочий диапазон композиционного радиопоглощающего покрытия в диапазоне 0,3–8 ГГц, т.е. получать радиопоглощающий материал с заранее заданными радиотехническими свойствами. Таким образом показан путь управления коэффициентом поглощения электромагнитного излучения композитного радиопоглощающего материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gama A.M. Complex permeability and permittivity variation of carbonyl iron rubber in the frequency range of 2 to 18 GHz / A.M. Gama, M.C. Rezende // Journal of Aerospace Technology and Management. – 2010. – Vol. 2, N 1. – P. 59–62.
2. Электромагнитные излучения методы и средства защиты / В.А. Богуш, Т.В. Торботько, А.В. Гусинский и др.; Под ред. Л. М. Лынькова. – Минск.: Бестпринт. – 2003. – 406 с.
3. Полтинников С.А. К вопросу о применении ферритов в качестве радиопоглощающего материала. / С.А. Полтинников // Специальная электроника. – 1966. – Серия 7, «Ферритовая техника». – Вып.1. – С. 27–38.
4. Dielectric and Magnetic Properties of Two-Phase Composite System: Mn-Zn or Ni-Zn ferrites in Dielectric Matrices / M.M. Salem, A.T. Morchenko, L.V. Panina and ets. // Physics Procedia 20th International Conference on Magnetism. – 2015. – Vol. 75. – P. 1360–1369.
5. Влияние параметров микроструктуры на радиофизические характеристики NI-ZN-ферритовых материалов / С.Б. Меньшова, Э.В. Лапшин, С.Б. Бибилов и др. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 3. – С. 123–134.
6. ГОСТ 30381-95 Совместимость технических средств электромагнитная. Поглотители электромагнитных волн для экранированных камер. Общие технические условия. – Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Москва: Изд-во стандартов. – 2004. – 23 с.
7. Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. В 2-х т. / С. Крупичка. – Пер. с нем. под ред. А. С. Пахомова. – М.: Изд-во "Мир", 1976. – Т. 1. – 353 с.
8. Чукалкин Ю.Г. Магнитное состояние никель-цинковых ферритов в области больших концентраций цинка / Ю.Г. Чукалкин, А.Е. Теплых // Физика твердого тела. – 1984. – Т. 4, № 8. – С. 1503–1504.
9. Смит Я. Ферриты / Я. Смит, Х. Вейн. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1962. – 503 с.
10. Крутогин Д.Г. Элементы и устройства магнитоэлектроники : лабораторный практикум / Д.Г. Крутогин. – М.: МИСИС. – 2008. – 81 с.

Поступила в редакцию 21.06.2016 г.

ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE COMPOSITE RADIO-WAVE ABSORPTIVE MATERIALS WHICH HAVE BEEN CREATED ON THE BASIS OF NiZn FERRITES

I.A. Alekhov, A.N. Peresadchenko, I.N. Voloshanovich

It was experimentally studied an influence of the Zn concentration on ferrite nickel-zinc magnetic spectra. It was ascertained an influence of concentration and size of the ferrite filler on radio-wave absorptive properties of the materials which have been tested.

Keywords: ferrite radio-wave absorptive materials, NiZn, radio physical characteristics, composites.

Алехов Юрий Александрович

старший научный сотрудник,

E-mail: alehov@ukr.net, Тел: +38-066-5864110

Пересадченко Алексей Николаевич

старший научный сотрудник

Волошанович Ирина Николаевна

научный сотрудник

ГУ НИИ «Реактивэлектрон» г. Донецк, ул. Бакинских комиссаров, 17а, г. Донецк, 283049

Alekhov Iurii Aleksandrovich,

Senior Research Officer

Peresadchenko Aleksei Nikolaevich,

Senior Research Officer

Voloshanovich Irina Nikolaevna,

Research Officer,

State Institution "Reaktivelektron Research Institute", Donetsk

УДК 538.11

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В ПЕРИОДИЧЕСКОМ НЕВЗАИМНОМ КРИСТАЛЛЕ

© 2016. В.Д. Пойманов

В данной работе исследовано влияние невязимности прямой и обратной волн на спектр пропускания периодического кристалла произвольной природы. Показано, что наличие невязимности приводит к образованию дополнительной запрещенной зоны в длинноволновой области спектра.

Ключевые слова: невязимный кристалл; слоистая периодическая структура; метод Т-матрицы, запрещенная зона.

Введение. К настоящему времени исследование распространения волн в слоистых средах уже давно выделилось в самостоятельную область физики волновых процессов. Возможность варьирования как геометрических, так и материальных параметров ячеек в сверхрешетках открывает широкие возможности для получения волноводов с заданными характеристиками (шириной запрещенных зон, коэффициента пропускания и т.п.) [1–5]. Вместе с тем, для исследования таких структур развито достаточно много и математических методов [6, 7], наиболее распространенным из которых является метод матрицы переноса (или Т-матрицы). Он предполагает использование условия периодичности (теорема Флоке) и вводит понятие блоховского волнового вектора, ответственного за распространение волны в данной структуре [8–11]. Природа возникновения запрещенных зон заключается в том, что интерферирующие в пределах одной ячейки прямая и обратная волны при некоторых условиях находятся в противофазе.

В [6, 7] метод Т-матрицы реализован для анализа распространения электромагнитных волн, однако в действительности он имеет гораздо большую общность. В качестве динамических переменных можно выбирать скалярные поля (будем называть их общим термином «волновая функция»), соответствующие данному волновому процессу. При этом сам метод реализуется безотносительно к физической природе этих полей. Например, в качестве такой переменной можно выбирать компоненту динамической намагниченности при исследовании спиновых волн в магнитных кристаллах, для звуковой волны в качестве «волновой функции» можно выбрать распределение давления, и т.д.

Как правило, во всех расчетах предполагается, что прямая и обратная волны в пределах одной ячейки имеют одинаковую длину. Однако уже доказана возможность существования условий, при которых волновые вектора прямой и обратной волн различны [1, 5]. В частности, уже указывалось на наблюдение данного эффекта для распространения спиновых волн в четырехкомпонентной антенне, а природа этого явления подробно обсуждалась в [1].

Исходя из сказанного, целью данной работы является исследование влияния указанной невязимности на спектр пропускания сверхрешетки и анализ частотной зависимости блоховского волнового вектора.

Постановка и метод решения задачи. В качестве модели выберем двухкомпонентную периодическую структуру вида AB , где A означает «невязимную» ячейку с $k_+ \neq k_-$, B – ячейку из «вязимного» материала с $k_+ = k_- = k_b$.

Следуя методу Т-матрицы [6, 7], и не уточняя физику волнового процесса, в качестве динамической переменной выберем волновую функцию (в указанном выше смысле), для которой решение соответствующего волнового уравнения в каждой ячейке при нормальном падении волны имеет вид:

$$\psi_n(x) = \begin{cases} a_{n1}^+ e^{ik_+(x-nd)} + a_{n1}^- e^{-ik_-(x-nd)}, & nd \leq x \leq nd + a, \\ b_{n+} e^{ik_b(x-nd-a)} + b_{n-} e^{-ik_b(x-nd-a)}, & nd + a \leq x \leq (n+1)d. \end{cases}$$

Запишем для нее граничные условия непрерывности $\psi_n(x)$ и $\psi'_n(x)$ на двух границах $x = nd + a, (n+1)d$ в виде матричных уравнений, связывающих амплитуды волн по обе стороны границы:

$$\begin{pmatrix} e^{ik_+a} & e^{-ik_-a} \\ k_+ e^{ik_+a} & -k_- e^{-ik_-a} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{n1}^+ \\ a_{n1}^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ k_b & -k_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_{n+} \\ b_{n-} \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} e^{ik_{b0}b} & e^{-ik_{b0}b} \\ k_b e^{ik_{b0}b} & -k_b e^{-ik_{b0}b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_{n+} \\ b_{n-} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ k_+ & -k_- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{(n+1)1}^+ \\ a_{(n+1)1}^- \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Закон дисперсии в каждой ячейке $k(\omega)$ определяется физической моделью волнового процесса.

Отметим, что выполнение условий непрерывности «волновой функции» в каждой точке границы требует непрерывности касательной составляющей волнового вектора. В результате этого получаем, что в общем случае при отражении от обычного материала ячейки угол отражения уже не будет равен углу падения.

Решая полученную систему матричных уравнений (1), находим связь между амплитудами прямой и обратной волн через период структуры:

$$\begin{pmatrix} a_{n1}^+ \\ a_{n1}^- \end{pmatrix} = \hat{T} \begin{pmatrix} a_{(n+1)1}^+ \\ a_{(n+1)1}^- \end{pmatrix},$$

где

$$\hat{T} = \hat{T}_a \hat{T}_b = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{pmatrix},$$

а матричные элементы $\hat{T}$ имеют вид:

$$\begin{aligned} t_{11} &= \left(\cos(k_b b) - i \frac{k_b^2 + k_+ k_-}{k_b(k_+ + k_-)} \sin(k_b b) \right) e^{-ik_+ a}, \\ t_{12} &= i \cdot \sin(k_b b) \frac{k_-^2 - k_b^2}{k_b(k_+ + k_-)} e^{-ik_+ a}, \\ t_{21} &= i \cdot \sin(k_b b) \frac{k_b^2 - k_+^2}{k_b(k_+ + k_-)} e^{ik_- a}, \\ t_{22} &= \left(\cos(k_b b) + i \frac{k_b^2 + k_+ k_-}{k_b(k_+ + k_-)} \sin(k_b b) \right) e^{ik_- a}. \end{aligned}$$

где

$$L = \frac{k_b^2 + k_+ k_-}{k_b(k_+ + k_-)}, \quad M_{\pm} = \frac{k_{\pm}^2 - k_b^2}{k_b(k_+ + k_-)}$$

связаны между собой соотношением:

$$L^2 - M_+ M_- = 1.$$

Для анализа спектра (в частности – предельных случаев) удобнее перейти от волновых векторов ячейки k_+ и k_- к новым переменным $k_{\pm} = k_a \pm \Delta k$. В новых переменных величины L и $M_{\pm}$ запишутся как:

$$L = \frac{1}{2} \left(\frac{k_a}{k_b} + \frac{k_b}{k_a} - \frac{\Delta k^2}{k_a k_b} \right), \quad M_{\pm} = \frac{1}{2} \left(\frac{k_a}{k_b} - \frac{k_b}{k_a} - \frac{\Delta k^2}{k_a k_b} \pm \frac{2\Delta k}{k_b} \right)$$

а след и определитель Т-матрицы:

$$\begin{aligned} \text{Det}(T) &= e^{-2i\Delta k a}, \\ \text{Sp}(T) &= 2R \cdot e^{-i\Delta k a}, \end{aligned}$$

где

$$R = \cos(k_a a + k_b b) - \frac{((k_a - k_b)^2 - \Delta k^2)}{2k_a k_b} \cdot \sin(k_a a) \cdot \sin(k_b b). \quad (2)$$

Отметим, что наличие невзаимности приводит только к фазовому сдвигу в определителе, в результате чего унимодулярность Т-матрицы не нарушается. Однако при этом появляются дополнительные слагаемые в ее элементах, существенно влияющих на структуру спектра.

Для нахождения запрещенных зон структуры воспользуемся теоремой Флоке, определяющей блоховский волновой вектор через элементы Т-матрицы [1, 2]:

$$\det \begin{pmatrix} t_{11} - e^{iKd} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} - e^{iKd} \end{pmatrix} = 0.$$

Из данного уравнения следует

$$K = \frac{1}{d} (\arccos(R(k_a, k_b, \Delta k)) + 2\pi n - \Delta k a).$$

Отметим, что наличие невзаимности ($k_+ \neq k_-$), помимо изменения структуры спектра по сравнению с взаимным кристаллом, дополнительно сдвигает его по K влево на величину $\Delta k a/d$. Запрещенные зоны определяются условием

$$|R(k_a, k_b, \Delta k)| \geq 1, \quad (3)$$

а зоны пропускания – обратным неравенством.

Результаты расчета и анализ. Для анализа условий и особенностей распространения волн в рассматриваемой невзаимной структуре перейдем к безразмерным волновым числам $k_a a = \xi_a$, $k_b b = \xi_b$, $\Delta k a = \Delta \xi$, $\sigma = a/b$. Тогда

$$R(\xi_a, \xi_b, \Delta \xi) = \cos(\xi_a + \xi_b) - \frac{(\xi_a - \Delta \xi)^2 - (\sigma \xi_b)^2}{2\sigma \xi_a \xi_b} \sin(\xi_a) \sin(\xi_b).$$

Как следует из (2), зоны пропускания формируются вблизи значений волновых чисел ячеек, для которых $k_b \approx k_{\pm}$ (в переменных ξ им соответствуют прямые $\xi_a = \sigma \xi_b \pm \Delta \xi$ в плоскости переменных $\xi_a \xi_b$). В длинноволновом приближении:

$$R(0, 0, \Delta \xi) = 1 + \frac{\Delta \xi^2}{2\sigma} > 1$$

и, таким образом, наличие невзаимности приводит к формированию запрещенной зоны в области длинных волн (вблизи начала координат), которая при $\Delta \xi = 0$ была бы зоной пропускания. Связано это с тем, что из-за рассогласования волновых чисел прямой и обратной волн они уже не могут интерферировать так эффективно, как при $\Delta \xi = 0$. Области же вблизи $\xi_a = \pi n_a$, $\xi_b = \pi n_b$, $n_a, n_b = 1, 2, \dots$ всегда будут зонами пропускания. Что касается окрестностей точек $\xi_a = \frac{\pi}{2}(1 + 2n_a)$, $\xi_b = \frac{\pi}{2}(1 + 2n_b)$, то анализ показывает наличие запрещенных зон при условии $\Delta \xi > |\xi_a - \sigma \xi_b|$.

Результаты численного моделирования на основании неравенства (3) для некоторых значений параметров изображены на рис. 1 и 2. Здесь, помимо невзаимности, учтен еще дополнительный фактор – отношение толщин «невзаимного» и обыкновенного слоев. Очевидно, с ростом параметра невзаимности $\Delta \xi$ происходит

рост запрещенной зоны в длинноволновой области и, напротив – уменьшение ее в окрестностях границ зон Бриллюэна.

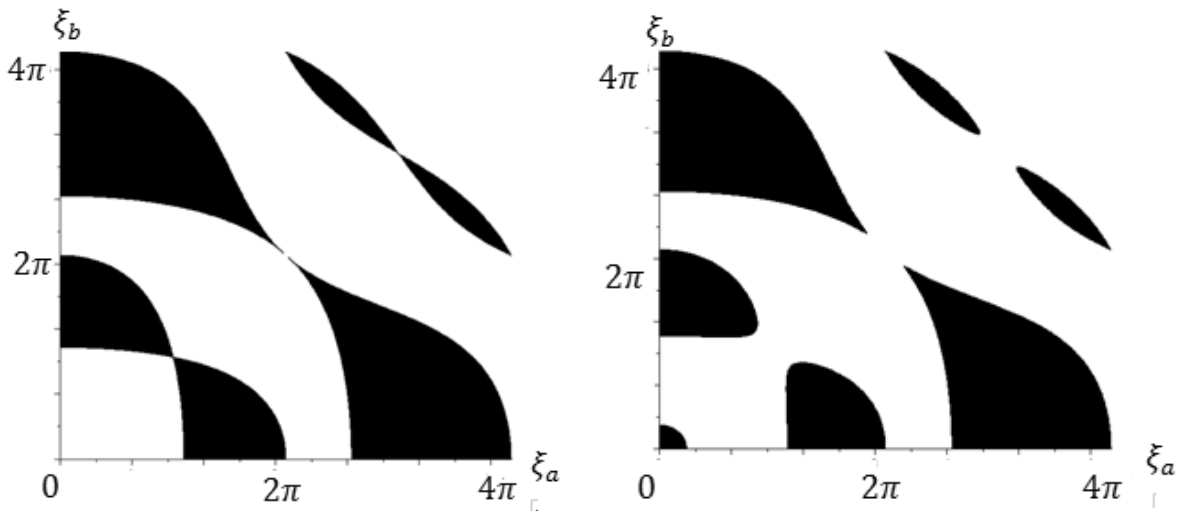


Рис 1. Распределение запрещенных зон (выделены черным) и зон пропускания двухкомпонентной структуры в плоскости переменных (ξ_a, ξ_b) в первых двух зонах Бриллюэна для $a = b$. Слева приведен результат для $\Delta\xi = 0$, справа – для $\Delta\xi = \pi/6$

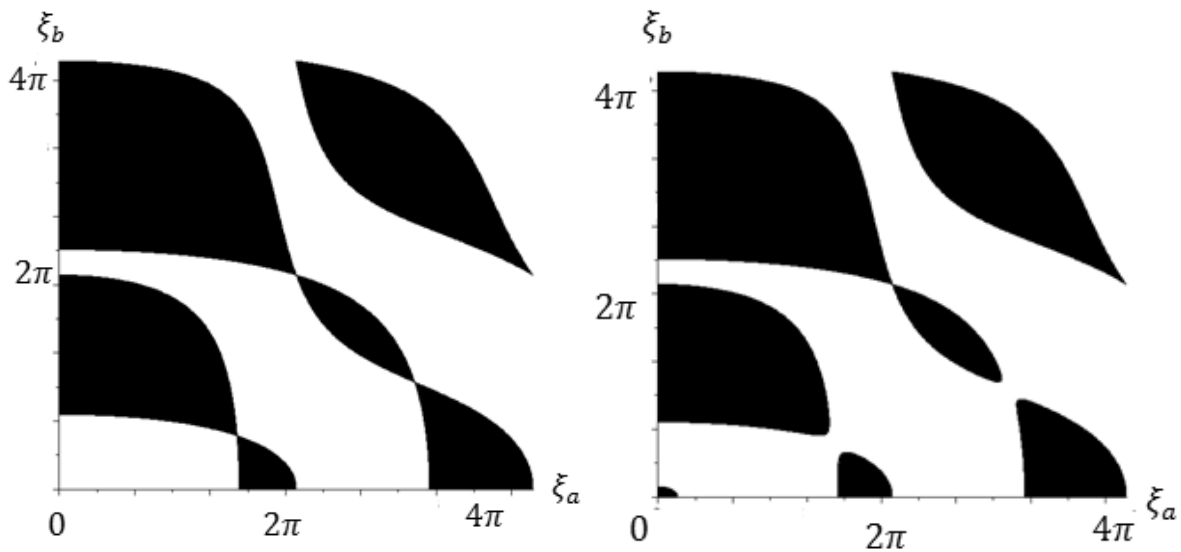


Рис 2. Распределение запрещенных зон (выделены черным) и зон пропускания двухкомпонентной структуры в плоскости переменных (ξ_a, ξ_b) в первых двух зонах Бриллюэна для $a = 3b$. Справа приведен результат для $\Delta\xi = 0$, слева – для $\Delta\xi = \pi/6$

Четырехкомпонентная структура. В заключение приведем также результат расчета для четырехкомпонентной структуры вида $ABAC$, где «невзаимная» ячейка A , «разбавлена» «обыкновенными» ячейками B и C .

$$\text{Det}(T) = e^{-4i\Delta ka},$$

$$\text{Sp}(T) = 2R \cdot e^{-2i\Delta ka}$$

$$R = [\cos(k_0(b+c))\cos(2k_a a) - L \sin(k_0(b+c)) \sin(2k_a a) + \\ + 2M_+ M_- \sin(k_0 b) \sin(k_0 c) \sin^2(k_a a)] e^{-2i\Delta ka}$$

Здесь $k_b = k_c = k_0$ – волновое число «обыкновенной» ячейки.

Выводы. Наличие невязимности существенно изменяет структуру спектра ввиду рассогласования волновых чисел прямой и обратной волн. В частности – в области длинных волн это приводит к формированию запрещенной зоны, а остальные, формирующиеся вблизи границ зон Бриллюэна, уменьшаются по мере роста параметра невязимности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геворгян А.А. Невязимость волн в поглощающих многослойных средах / А.А. Геворгян // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29, вып. 19. – С. 60-68.
2. Невязимное распространение гибридных электромагнитных волн в слоистой структуре феррит-сегнетоэлектрик конечной ширины / А.В. Садовников, К.В. Бубликов, Е.Н. Бегинин и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2015. – Т. 102, вып. 3. – С. 167-172.
3. Стоячие волны в невязимных гиротропных средах / А.Г. Глущенко, Е.П. Глущенко, Н.Л. Казанский, Л.В. Топорова // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 4. – С. 415-418
4. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М., Наука, 1982. – 621 с.
5. Observation of magnonic band gaps in magnonic crystals with nonreciprocal dispersion relation / M. Mruczkiewicz, E.S. Pavlov, S.L. Vysotsky et al. // Physical Review B. – 2014. – Vol. 90. – P. 174416
6. Басс Ф.Г. Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками / Ф.Г. Басс, А.А. Булгаков, А.П. Тетервов. – М.: Наука, 1989. – 288 с.
7. Ярив А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх. – М., Мир. – 1987. – 616 с.
8. Spin-wave spectrum of a magnonic crystal with an isolated defect / V.V. Kruglyak, M.L. Sokolovsky, V.S. Tkachenko, A.N. Kuchko // Journal of applied physics. – 2006. – Vol. 99. – P. 08C906.
9. Kruglyak V.V. Spectrum of spin waves propagating in a periodic magnetic structure / V.V. Kruglyak, A.N. Kuchko // Physica B. – 2003. – Vol. 339. – P. 130-133
10. Kruglyak V.V. Spin-Wave Spectrum of an Ideal Multilayer Magnet upon Modulation of All Parameters of the Landau–Lifshitz Equation / V.V. Kruglyak, A.N. Kuchko, V.I. Finokhin // Physics of solid state. – 2004. – Vol. 46, No 5. – P. 867-871.
11. Propagation and scattering of spin waves in curved magnonic waveguides / V.S. Tkachenko, A.N. Kuchko, M. Dvornik, V.V. Kruglyak // Applied physics letters. – 2012. – Vol. 101. – P. 152402.

Поступила в редакцию 04.07.2016 г.

FEATURES OF WAVE PROPAGATION IN PERIODIC NON-RECIPROCAL CRYSTAL

V.D. Poimanov

The influence of non-reciprocity of forward and backward waves on the transmission spectrum of a periodic arbitrary nature crystal was studied in this paper. It is shown that the presence of non-reciprocity causes the formation of additional band gaps.

Keywords: non-reciprocal crystal; layered periodic structure; T-matrix method.

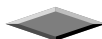
Пойманов Владислав Дмитриевич

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
г. Донецк, старший преподаватель кафедры
Теоретической физики и нанотехнологий;
283001, г. Донецк, пр. Театральный 13;
E-mail: Vladislav.Poimanov@yandex.ru
Тел: +38-050-9762600

Poimanov Vladyslav Dmitrievich

Donetsk National University, Donetsk,
Senior lector of the Department of theoretical physics
and nanotechnology

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ



УДК 007.52:625.7:004.94

ПОСТРОЕНИЕ ОБЪЕКТНОЙ МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ВНЕШНЕГО АВТОПИЛОТИРОВАНИЯ

© 2016. *Д.В. Николаенко, О.А. Плешкова*

В статье сформулированы понятия, позволяющие произвести дальнейшую разработку информационной системы внешнего автопилотирования. Рассмотрено схематическое представление воздействия дорожного примитива на транспортное средство. Построена объектная модель информационной системы внешнего автопилотирования, иллюстрирующая взаимосвязи между отдельными сущностями и описывающая внутреннюю структуру и типы отношений между классами системы.

Ключевые слова: автопилотирование, дорожный примитив, интеллектуальная транспортная система, информационное поле, объектная модель, управление транспортом.

Введение. В современном мире существует устойчивая тенденция интеллектуализации информационных технологий, которые морально устаревают значительно меньшими темпами, чем новое оборудование и изделия, и, следовательно, вложения в эту технологию являются более эффективными [1].

Информация является важнейшим фактором, определяющим развитие технологии и ресурсов. Поэтому важно понимание не только взаимосвязи развития сфер деятельности компьютеризации, информационных телекоммуникаций с процессом информатизации, но и определение степени воздействия процесса информатизации на индустрию управления и интеллектуальную работу человека.

До настоящего времени мониторинг и обработка информации о составляющих транспортной системы в реальном масштабе времени не проводилась из-за недоразвитости материально-технической, экономической и научной структур. Однако, сейчас наступил существенный качественный прогресс в развитии и производстве мощных информационных вычислительных систем, разработке разнообразных новейших видов связи и коммуникаций, технических устройств сбора и обработки информации о параметрах транспортных потоков и дорожной инфраструктуре.

Бурное и постоянное развитие инфраструктуры современного производственного процесса, его трудность и загромождение характерными операциями являются объективной непременной условием сложности систем. Таким образом, на данный момент времени все более актуальной оказывается проблематика выбора целесообразного метода анализа и проектирования транспортных систем [2].

Для представления структурного ракурса моделей управления транспортными средствами преимущественно используются графические методы, задачей которых является гарантия представление информации об элементах системы. Одним из главных требований к графическим методам документирования – простота. Графические методы должны предусматривать способность к структурной декомпозиции спецификаций системы с максимально возможным уровнем детализации и согласований характеристик на смежных уровнях декомпозиции [3].

Одной из исходных задач является задача выбора языка моделирования. Под языком моделирования подразумевают нотацию, в большей степени графическую, которую применяют для описания проектов. Нотация является совокупностью графических объектов, используемых в модели, и также выступает синтаксисом языка моделирования.

Язык моделирования должен предоставлять проектировщикам понятные им решения, с другой стороны, предоставлять средства достаточно формализованного и однозначного определения проектных решений, подлежащих реализации в виде программных комплексов, образующих единую целостную систему.

Изучением вопроса моделирования транспортных систем занимаются такие отечественные и зарубежные авторы: Грановский Б., Семенов В., Швецов В., Сильянов В., Дрю Д., Капитанов В., Пригожин И., Буслаев А., Михеева Т. и другие. Наиболее перспективным считается направление развития интеллектуальных дорог, при котором покрытие и дорожные примитивы снабжаются детекторами способными осуществлять двусторонний обмен потоком информации с транспортным средством. При таком подходе необходимо обеспечить обмен потоком информации между движущимися автомобилями и дорожной инфраструктурой для обеспечения контроля и управления процессами в дорожном полотне [3].

Актуальным вопросом остаётся моделирование и разработка такой информационной системы автопилотирования, которая бы с одной стороны обладала основными возможностями, присущими уже существующим системам, с другой – позволяла минимизировать финансовые расходы.

Целью данной работы является построение объектной модели информационной системы внешнего автопилотирования.

Основное содержание. С целью построения информационной системы внешнего автопилотирования введём такие понятия как «информационное поле дороги» и «дорожный примитив», обеспечивающий автоматизацию процесса управления транспортным средством.

Информационное поле дороги – совокупность банков и баз данных, технологий их сопровождения и использования, информационных телекоммуникационных систем, функционирующих на основе общепринятых принципах и обеспечивающих:

- информационное взаимодействие дорожного полотна и транспортного средства;
- удовлетворение их информационных потребностей.

Основными элементами информационного поля дороги являются: дорожные примитивы, информационные ресурсы, средства информационного взаимодействия и информационная инфраструктура.

Под дорожными примитивами будем понимать элементы информационного поля, посредством которых осуществляется воздействие на внешнюю систему автопилотирования транспортного средства.

Дорожные примитивы (информаторы дорожного движения) могут быть как постоянного, так и временного (изменяющегося со временем, зависящие от ситуации на улично-дорожной сети) действия. Примитивы классифицируются по дорожному движению на три группы: дорожную, внедорожную и обеспечиваемую на рабочем месте водителя.

Дорожная информация – это все то, что доносится до информирования участников дорожного движения (водители, пешеходы, велосипедисты и т.д.) с помощью технических устройств и средств организации дорожного движения.

Внедорожная информация состоит из специальных карт-схем и путеводителей, информации по каналам радиовещания, направленная к участникам дорожного

движения о типичных маршрутах следования, метеорологических условиях, состоянии дорожного полотна, оперативных изменениях в схемах организации движения и т.д.

К информации на рабочем месте водителя можно отнести визуальную и звуковую, которые предоставляются автоматически разными детекторами, осуществляющими контроль показателей режима движения: например, скорость движения, соблюдение безопасной дистанции до впереди движущегося в транспортном потоке автомобиля-лидера. В настоящее время все большего развития набирают навигационные системы, использующие бортовые ЭВМ и спутниковую связь [4].

Рассмотрим схематическое представление воздействия дорожного примитива на транспортное средство (рис. 1). В качестве дорожного примитива могут выступать такие информаторы дорожного движения как дорожные знаки, все примитивы обладают своим информационным полем и областью его распространения.

На рис. 1 указаны: точка входа в зону воздействия информационного поля дорожного примитива (точка А), точка перехода от предварительного управления к активному (точка Б), точка выполнения условия дорожного примитива информационного поля (точка В), участок предварительного управления (отрезок АВ), участок активного управления (отрезок БВ), зона действия информационного поля дорожного примитива (отрезок АВ).

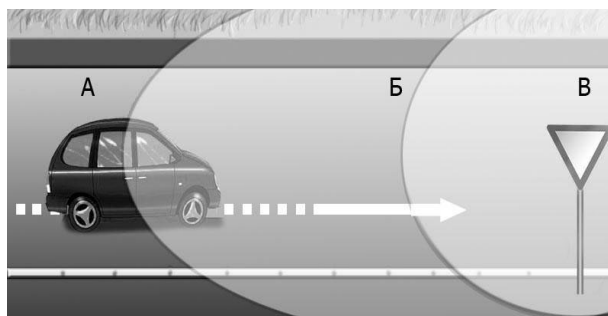


Рис. 1

Попадая в информационное поле дорожного примитива, транспортное средство считывает и анализирует полученную от него информацию (участок АВ), и, в конечном счёте, принимает и выполняет управленческое решение (участок БВ). Для принятия которого, следует привести динамические свойства транспортного средства к ряду заданных характеристик, удовлетворяющих критериям дорожного примитива.

Для моделирования информационной системы внешнего автопилотирования воспользуемся объектно-ориентированным подходом, который предоставляет возможность создавать расширяемые системы, отличается быстротой и многообразием написания использованием программного кода, позволяет сократить временные затраты на разработку и обеспечивает возможность структурной декомпозиции спецификаций системы с максимальной степенью детализации.

Неоднократное применение объектно-ориентированного подхода позволяет разрабатывать достаточно структурированные, надёжные в эксплуатации, довольно просто модифицируемые программные системы. Этим объясняется заинтересованность программистов к объектно-ориентированному подходу и объектно-ориентированным языкам программирования. Объектно-ориентированные языки программирования в настоящее время очень востребованы и популярны в среде программистов, потому что они позволяют применять достоинства объектно-ориентированного подхода не лишь на стадиях проектирования и построения программных компонент и систем, но и на стадиях их внедрения, отладки и поддержки. На данном этапе внедрения информатизации и интеллектуализации в различные сферы деятельности человека объектно-ориентированный подход становится одним из лидеров развивающихся направлений теоретического и прикладного программирования.

На основе объектного анализа и моделирования сложных систем рассмотрим проблематику построения графических проекций системы в пространство прецедентов (вариантов использования) в контексте внешнего автопилотирования.

Диаграмма вариантов использования является концептуальной моделью данной системы в процессе ее проектирования и разработки. «Диаграммы вариантов использования – основной вид диаграмм при моделировании поведения системы, подсистемы или класса. Каждая из которых показывает набор вариантов использования и действующих лиц в их взаимодействии» [5].

Прецедент – это последовательность действий (транзакций), выполняемых в ответ на внешнее воздействие, инициированное «внешним актёром».

Под «внешним актёром» (пользователь системы) в работе понимается транспортное средство как система, принимающая сигналы управления информационного поля дорожного примитива и реагирующая на него соответствующим поведением.

Варианты использования применяются для выражения требуемого поведения разрабатываемой системы, без описания реализации этого поведения.

Между компонентами диаграммы вариантов использования могут существовать различные отношения, описывающие взаимодействие экземпляров актёров и вариантов использования с экземплярами других актёров и вариантов.

В случае системы внешнего автопилотирования транспортным средством были выявлены следующие прецеденты:

- управление транспортной парой;
- управление потоком на участке предварительного управления;
- управление потоком на начальном участке дорожного примитива;
- две полосы и управление транспортной парой;
- две полосы и управление потоком на участке предварительного управления;
- две полосы и управление потоком на начальном участке дорожного примитива.

Так, например, прецедент «управление транспортной парой», в рамках которого решается задача нахождения безопасной дистанции между транспортными средствами при выполнении программы активного управления, имеет следующие предусловия и постусловия.

Предусловия прецедента:

- сбор потока информации информационного поля дорожного примитива;
- обработка потока информации информационного поля дорожного примитива;
- генерация сигнала управления транспортным средством.

Постусловия прецедента: определения безопасной дистанции между транспортными средствами при выполнении программы активного управления.

Ниже на рис. 2 представлена проекция системы в пространстве прецедентов.

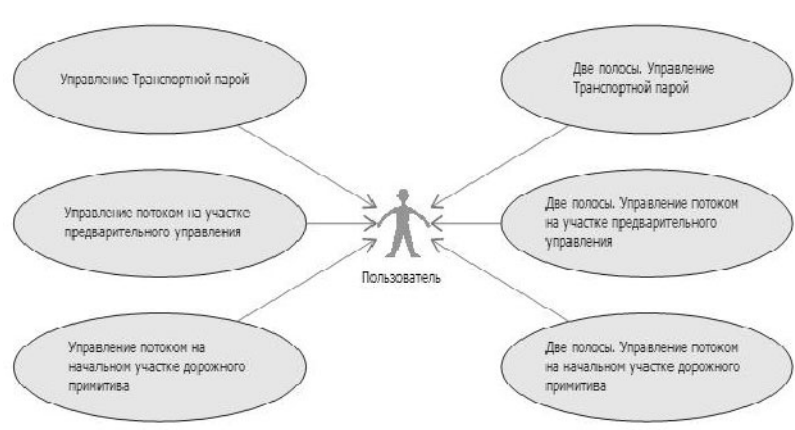


Рис. 2. Прецеденты информационной системы внешнего автопилотирования

Анализ прецедентов системы внешнего автопилотирования показывает общую функциональность системы, а также пользователи и разработчики системы получают представление о том, что система должна уметь делать.

С целью моделирования информационной системы внешнего автопилотирования была разработана объектная модель. На диаграмме классов представлена статическая структура модели данной системы, отражающая различные взаимосвязи между отдельными сущностями и описывающая внутреннюю структуру и типы отношений между классами рассматриваемой системы. Построенная диаграмма классов позволила отобразить понятие изучаемой системы. Следует отметить, что наборы классов в последующем могут быть переработаны, добавлены новые элементы. На диаграмме изображены следующие классы:

- «MainControl» – это управляющий класс. Он содержит только один метод Main, который инициализирует всю информационную систему и запускает ее работу;

- «Информационное_Поле» – этот класс представляет собой среду, в которой происходит взаимодействие объектов, таких как дорожные примитивы, детекторы, транспортные средства, объекты управления. Этот класс содержит методы добавления новых примитивов, удаление примитивов, синхронизации их работы и событий, а также обеспечивает взаимодействие всех примитивов и сенсоров, отвечает за обмен между ними данными, ведёт их учёт и т.д.;

- «Дорожные_Примитивы» и «Сенсоры» – это абстрактные классы, от которых в дальнейшем будут созданы экземпляры (объекты) в количестве, необходимом для эффективной работы рассматриваемой информационной системы. Эти классы описывают функциональные особенности дорожных примитивов и сенсоров, таких как приём и передача данных, а также передают о себе информацию на управляющую систему, чем поддерживают постоянную связь с ней;

- «Транспортный_Поток» – этот класс представляет собой средства управления (участников движения), на которые распространяется воздействие информационного поля. Этот класс содержит такие операции как движение по дорожному примитиву, изменение динамических характеристик транспортного потока в зависимости от предписаний управляющей системы.

Диаграмма классов информационной системы внешнего автопилотирования представлена ниже на рис. 3.

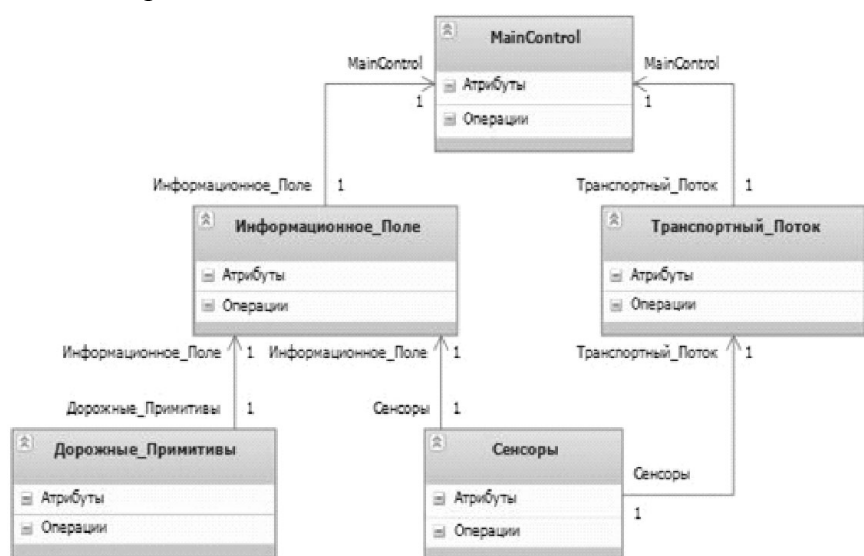


Рис. 3

Одной из характерных особенностей систем является взаимодействие между собой отдельных элементов, из которых образованы эти системы.

Различные составляющие элементы систем не существуют изолированно, а оказывают определённое влияние друг на друга.

В UML взаимодействие элементов рассматривается в информационном аспекте их коммуникации, т.е. взаимодействующие объекты обмениваются между собой некоторым потоком информации. При этом информация принимает форму законченных сообщений. Другими словами, хотя сообщение и имеет информационное содержание, оно приобретает дополнительное свойство, оказывать направленное влияние на своего получателя [7].

На рис. 4 представлен фрагмент диаграммы последовательности, характеризующий часть процесса работы информационной системы внешнего автопилотирования.

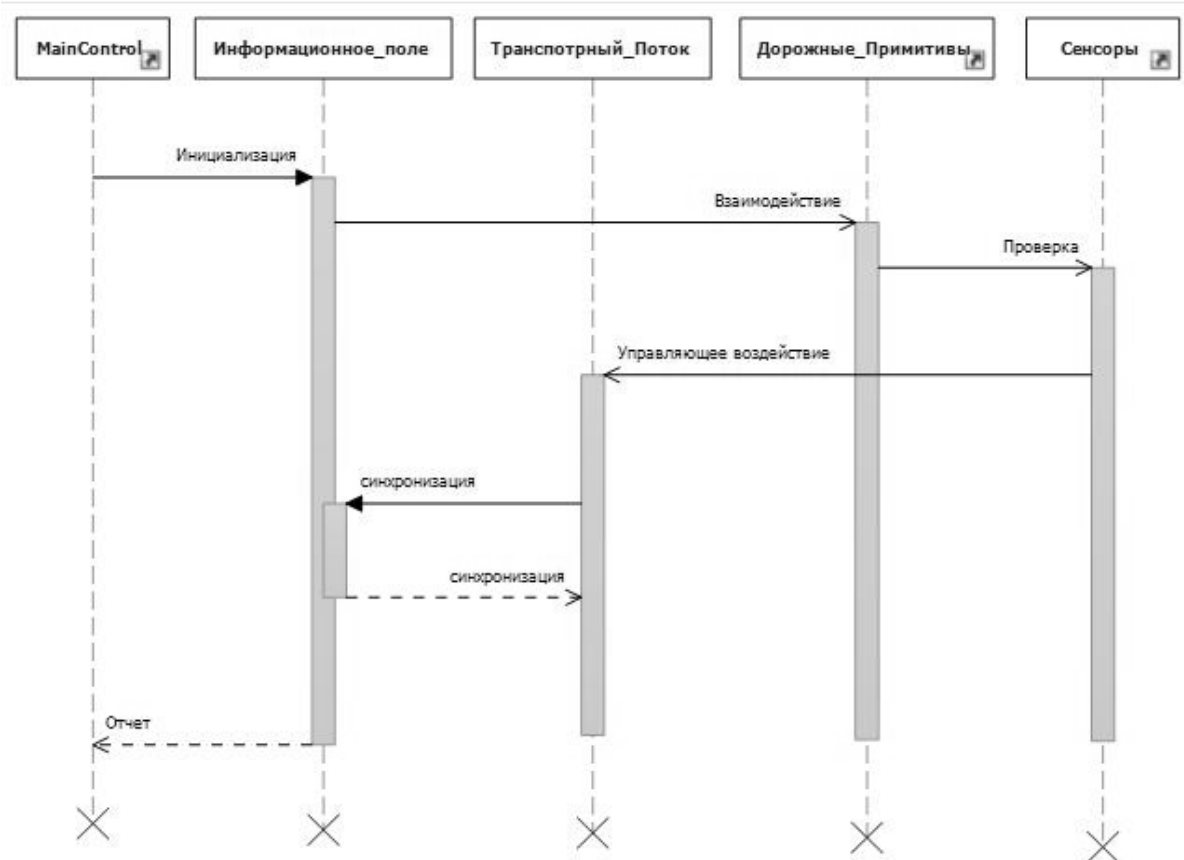


Рис. 4. Диаграмма последовательности информационной системы внешнего автопилотирования

Построенная диаграмма последовательности позволила провести моделирование объектов системы во времени, определить тип и количество сообщений, используемых объектами.

Диаграмма последовательности описывает следующий набор действий. Информационное поле при помощи датчиков дорожных примитивов регистрирует вхождение транспортного средства в область дорожного примитива. Датчики транспортного средства через устройство связи иницируют работу функциональной модели. Функциональная модель, используя блок синхронизации, синхронизирует состояние транспортного средства с информационным полем, анализирует и принимает управленческое решение, после чего в зависимости от состояния системы воздействует на операционный автомат для физического управления транспортным средством.

Транспортные средства (участники движения), движущиеся по дорожному полотну, постоянно находятся во взаимодействии с информационным полем. Связь с информационным полем обеспечивают датчики, приёмники и передатчики, установленные как в автомобильном транспорте, так и в дорожных примитивах. При попадании участника дорожного движения в область видимости дорожного примитива происходит синхронизация состояния участника движения с информационным полем системы. В зависимости от состояния информационной системы управляющим автоматом (УА) транспортного средства принимаются управленческие решения, УА может принимать управление транспортным средством на себя полностью, контролируя движение, либо осуществлять рекомендации по управлению транспортным средством.

Выводы. Таким образом, можно сделать вывод, что на данный момент времени остаётся актуальным вопрос о дальнейших перспективах развития интеллектуальных дорог и умных автомобилей, которые являются ведущими составляющими для создания единого информационного пространства, объединяющего транспортные средства, дорожную инфраструктуру, диспетчерские пункты и центры организации движения по всей стране.

Обоснована актуальность использования объектно-ориентированного подхода при моделировании и разработки информационной системы внешнего автопилотирования. Построена объектная модель информационной системы управления транспортным потоком, которая включает диаграмму вариантов использования, разработана библиотека классов и приведена схема их организации, а так же диаграмма последовательности управления транспортным потоком.

Перспективным направлением исследования является математическое моделирование интеллектуального управления транспортным потоком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большие перспективы «умных» дорог / Интернет-ресурс. – Режим доступа: URL <http://aver.ru/avernews/2013-10-12/bolshie-perspektivy-umnyh-stenovyh-paneley>.
2. Горев А.Э. Информационные технологии на транспорте. Электронная идентификация автотранспортных средств и транспортного оборудования: Учеб. пособие для студентов / А.Э. Горев. – СПб.: СПбГАСУ, 2010. – 96 с.
3. Михеева Т.И. Моделирование движения в интеллектуальной транспортной системе / Т.И. Михеева // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2010. – № 3. – С. 118-126.
4. Буч Г. Язык UML. Руководство пользователя / Г. Буч, Д. Рамбо, А. Якобсон. – ДМК, 2006. – 496 с.
5. Крэг Л. Применение UML 2.0 и шаблонов проектирования / Л. Крэг. – Вильямс, 2009. – 736 с.
6. Budd T. An Introduction to Object-Oriented Programming / T. Budd. – Oregon State University: Addison-Wesley, 2008. – 467 p.
7. Halbert D.C. Using types and inheritance in object-oriented programming / D.C. Halbert, P.D. O'Brien // IEEE Software. – 2007. – No 5. – P. 71.
8. Kerner, B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-phase Traffic Theory [Text] / B.S. Kerner. – Springer, 2009. – 271 p.

Поступила в редакцию 08.09.2016 г.

BUILDING AN OBJECT MODEL OF INFORMATION SYSTEM EXTERNAL AUTOMATIC PILOT

D.V. Nikolaenko, O.A. Pleshkova

Article formulated the notion of permitting further development of external information system of automatic pilot. Schematic representation of the impact is considered primitive on the road vehicle. Built an

external information system object model, automatic pilot, illustrating the relationship between separate entities, describing the internal structure and types of relationships between the classes in the system.

Keywords: automatic pilot, primitive road, intellectual transport system, information field, object model, transport management.

Николаенко Денис Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический
университет», г. Донецк
284646, г. Горловка, ул. Кирова 51а
E-mail: adi-eki@yandex.ru
Тел: +380 (93) 905-77-21

Nikolaenko Denis Vladimirovich

Candidate of Engineering Sciences, Docent,
Donetsk National Technical University, Donetsk,
Associate professor
284646, Gorlovka, st. Kirova, 51a

Плешкова Ольга Александровна

Автомобильно-дорожный институт ГОУ ВПО
«Донецкий национальный технический
университет», г. Горловка
284646, г. Горловка, ул. Кирова 51а
E-mail: kafedraic@rambler.ru
Тел: +380 (50) 803-86-87

Pleshkova Olga Aleksandrovna

Automobile and Highway Institute, Donetsk National
Technical University, Gorlovka
284646, Gorlovka, st. Kirova, 51a

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ОБРАБОТКА РАДИОСИГНАЛОВ

© 2016. *И.А. Третьяков, М.Л. Павлов, Т.С. Тебенева, В.В. Данилов*

Исследованы методы обработки данных когерентными оптическими системами пространственно-частотной фильтрации радиосигналов. Рассматривается когерентный оптический процессор и его спектральные и интегральные преобразования. Приведен алгоритм реализации сверхточных операций за счет использования оптических информационных технологий.

Ключевые слова: линза; когерентный оптический процессор; преобразование Фурье; функция свертки; корреляция; транспарант; акустооптический модулятор.

Введение. Рост плотности и сложности сигналов, используемых в радиоэлектронных системах военного назначения постоянно требуют совершенствования специальных информационно-измерительных систем (СИИС) их обнаружения и распознавания. Широкие возможности для СИИС открывают оптические информационные технологии [1, 2]. Современные требования по производительности СИИС для обнаружения и распознавания систем радиоэлектронной борьбы/поддержки составляют 10^{10} оп/с, систем связи – $2 \cdot 10^9$ оп/с, систем видовой разведки – 10^9 оп/с. Развитие оптических информационных технологий – одно из направлений решения проблемы, включенной министерством обороны США в перечень, состоящий из 20 критически важных технологий, считается высшим по приоритетности [2].

Общие положения. Широкие перспективы в решении данной проблемы открывают оптические информационные технологии, в частности, когерентная оптоэлектроника. Основными достоинствами когерентных оптических методов обработки данных являются: большая информационная емкость, многоканальность, высокое быстродействие.

Плоская когерентная электромагнитная волна в свободном пространстве в векторной форме может быть записана в виде уравнений:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(\omega t - \vec{k} \vec{l}), \quad (1) \quad \vec{H} = \vec{H}_0 \sin(\omega t - \vec{k} \vec{l}), \quad (2)$$

где $\vec{E}$, $\vec{H}$ – амплитуды колебаний векторов напряженности электрического и магнитного полей, $\vec{l}$ – радиус-вектор до точки наблюдения, $\vec{k} = (2\pi / \lambda_0)$ – волновой вектор, $\vec{n}$ – единичный вектор нормали к фронту волны, λ_0 – длина волны. Совмещая направление $\vec{n}$ с осью z , что эквивалентно заданию двух углов α и β направления прихода волны, уравнения (1) и (2) в скалярной форме можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} E(x, t) &= E_x \sin(\omega t - kz - \varphi_x), & E(y, t) &= E_y \sin(\omega t - kz - \varphi_y), \\ H(x, t) &= -H_x \sin(\omega t - kz - \varphi_x), & H(y, t) &= H_y \sin(\omega t - kz - \varphi_y). \end{aligned}$$

Таким образом, плоская когерентная монохроматическая волна имеет независимые параметры: $E_x, E_y, \varphi_x, \varphi_y, \omega, \alpha, \beta$, а также знак при $H(x, t)$. Следовательно, в зависимости от выбора системы координат и формы записи, когерентное электромагнитное поле волны может быть задано несколькими независимыми параметрами: амплитудой напряженности поля, частотой его изменения во времени,

начальной фазой колебаний, видом поляризации (линейная, эллиптическая и т.д.), направлением вращения вектора поляризации, направлением распространения волны (от или к наблюдателю), азимутальным углом направления распространения α , углом направления распространения в вертикальной плоскости β . В тоже время информационная емкость электрического сигнала, например, вида $I = I_0 \sin(\omega t - \varphi_0)$, по крайней мере в несколько раз меньше, так как информация может быть закодирована в нем только в три параметра: амплитуду, частоту и фазу.

Из обоснования большой информационной емкости когерентных оптических систем обработка данных следует и возможность многоканальной обработки. Так как оптическое изображение (оптический сигнал) зависит от нескольких переменных, зафиксировав одну из них в качестве независимой, другую можно использовать в качестве параметра, например, определяющего номер канала. Так, при размере кадра фотопленки 36 мм и ширине дорожки одного канала, в котором записана информация, 100 мкм, число обрабатываемых каналов будет 360.

Быстродействие систем оптической обработки данных в принципе определяется скоростью распространения электромагнитной волны (скоростью света). Так, операция двумерного преобразования Фурье реализуется сферической линзой в оптической системе за время, равное времени распространения света в оптической системе [3]. При длине 30 см время обработки составит 1 нс.

Когерентный оптический процессор. Рассмотрим систему оптических элементов, представленную на рис. 1, где Л – линза, Π_1 и Π_2 – плоскости в передней и задней фокальных плоскостях линзы, Z – фокусное расстояние линзы.

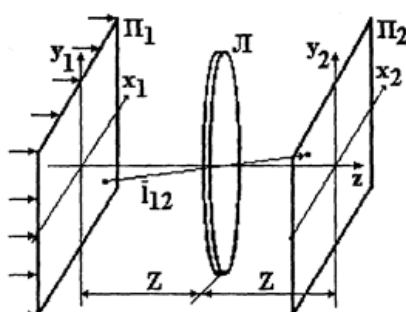


Рис. 1.

Пусть набор их не имеет aberrаций, поглощения и отражения электромагнитной энергии, а также в плоскости Π_1 линзы Л расположен носитель информации – амплитудный транспарант, простейшая реализация которого может быть в виде фотопластинки, функция пропускания которой $T(x_1, y_1)$ – функция координат. Примером фазового транспаранта может служить акустооптический модулятор, в котором показатель преломления меняется во времени и в пространстве под действием

акустической волны [4]. Коэффициент пропускания транспаранта в общем случае – комплексная величина [5]:

$$T(x_1, y_1) = s(x_1, y_1) e^{j\phi(x_1, y_1)}.$$

В плоскости Π_2 ($z=2Z$) линзы Л происходит наблюдение результирующего светового распределения. При распространении плоской когерентной монохроматической электромагнитной волны оптического диапазона (света) вида (1) в направлении z , поле на выходе транспаранта, можно представить в виде [5]:

$$\vec{E}_1(x_1, y_1, t) = \vec{E} T(x_1, y_1) = \vec{E}_0 s(x_1, y_1) e^{j[\omega t + \phi(x_1, y_1)]}.$$

Если вплотную к транспаранту с функцией пропускания $T(x_1, y_1)$ разместить другой с функцией пропускания $G(x_1, y_1)$, то на выходе такой композиции получим результат перемножения [5]:

$$\vec{E}_1(x_1, y_1, t) = \vec{E} T(x_1, y_1) G(x_1, y_1).$$

Для нахождения комплексной амплитуды поля на выходе оптической схемы (рис. 1) воспользуемся известным в оптике принципом Гюйгенса, согласно которому каждая точка волнового фронта излучает сферическую волну. Определяя результирующую напряженность поля излучения вторичных волн точки на плоскости Π_1 в точке с координатами (x_2, y_2) на плоскости Π_3 , в параксиальном приближении можно записать [3]:

$$\vec{E}_2(x_2, y_2) = A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{ikl_{12}}}{l_{12}} E_1(x_1, y_1) dx_1 dy_1, \quad (3)$$

где A – коэффициент пропорциональности; $l_{12} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + Z^2}$ – расстояние между точками плоскостей Π_1 и Π_2 . Если $l_{12} \gg x_2 - x_1, y_2 - y_1$, то l_{12} в знаменателе (3) можно вынести за знак интегралов:

$$\vec{E}_2(x_2, y_2) = \frac{A}{l_{12}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ikl_{12}} E_1(x_1, y_1) dx_1 dy_1.$$

Для нахождения расстояния l_{12} выразим его через x_2, y_2, x_1, y_1 . Рассмотрим для упрощения представленный одномерный случай (рис. 2).

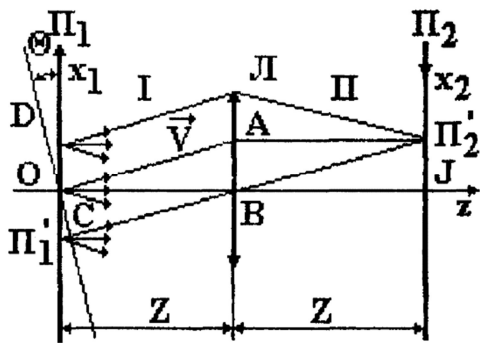


Рис. 2.

Поскольку плоскость Π_2 находится в фокальной плоскости линзы L , то в некоторую точку Π_2 собираются параллельные лучи, распространяющиеся в I области, в направлении вектора $\vec{V}$. Через начало координат систем x_1z проведем плоскость D перпендикулярную направлению $\vec{V}$. Согласно геометрической оптике, оптическая длина пути между точкой Π_2' с координатой x_2 и любой точкой на плоскости D является постоянной величиной χ . Найдем ее как сумму двух отрезков CB и $B\Pi_2'$:

$$\chi = \sqrt{Z^2 - x_1^2 \cos^2 \Theta} + \sqrt{Z^2 + x_2^2}, \quad \chi \approx Z \left(1 - \frac{1}{2} \frac{x_1^2 \cos^2 \Theta}{Z^2} + \dots \right) + Z \left(1 + \frac{1}{2} \frac{x_2^2}{Z^2} + \dots \right),$$

при $x_1, x_2 \ll Z$. Так как треугольники Ox_1B и $B\Pi_2'J$ равны, то $x_1 = x_2$. Если $\Theta \ll 1$, то $\chi \approx 2Z$ и не зависит от x_1 и x_2 , а расстояние l_{12} отличается от χ на величину отрезка $\Pi_1'C$, которая зависит от положения точки на плоскости Π_1 : $\Pi_1'C = -x_1 \sin \Theta$, где знак «-» учитывает направление оси x . Делая подстановку $\frac{x_2}{Z} = \sin \Theta$, получим в окончательной

форме: $l_{12} = \chi + \Pi_1'C = 2Z - x_1 x_2 / Z$, $E_2(x_2) = \frac{A}{l_{12}} e^{j \frac{4\pi}{\lambda}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j \frac{2\pi x_2}{\lambda z}} E_1(x_1) dx_1$.

Введем обозначения $B = \left(\frac{A}{l_{12}} \right) e^{j \frac{4\pi}{\lambda}}$, $\omega_{x_2} = \left(\frac{2\pi}{\lambda z} \right) x_2$. Тогда

$$E_2(x_2) = B \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x_1) e^{-j\omega_{x_2} x_1} dx_1. \quad (4)$$

Соотношение прямого и обратного преобразования Фурье для радиосигнала $f(t)$ и его спектра запишем в виде [5,6]:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt, \quad f(t) = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (5)$$

В уравнениях (4) и (5) видна аналогия. Таким образом, функция $E_2(x_2)$ является прямым преобразованием Фурье от функции $E_1(x_1)$, причем роль времени играет координата x_1 , а роль частоты ω – величина ω_{x_2} , которую называют пространственной частотой, так как она является функцией координаты плоскости наблюдения x_2 . Аналогичное выражение можно записать и для двумерного случая, когда $E_1 = E_1(x_1, y_1)$, полагая здесь и далее $B=1$:

$$\vec{E}_2(x_2, y_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j(\omega_{x_2} x_1 + \omega_{y_2} y_1)} E_1(x_1, y_1) dx_1 dy_1. \quad (6)$$

Трактовка физического смысла (6) проводится в работах [3, 5, 7], тем не менее, предлагается его следующая интерпретация. При падении плоской монохроматической когерентной волны на транспарант с пропусканием ее в виде $E_1(x_1, y_1)$ происходит дифракция света на транспаранте. Дифрагированное поле представляет собой суперпозицию плоских волн, распространяющихся во всех направлениях, причем интенсивность волны в каждом направлении определяется видом функции $E_1(x_1, y_1)$. Следовательно, в этом явлении уже заложены элементы прямого преобразования Фурье, причем роль временных частот играют направления распространения плоских волн. Так как линза собирает все лучи, идущие в направлении $(x_2/Z, y_2/Z)$ в точку с координатами (x_2, y_2) , то она ставит в соответствие каждой плоской волне точку на плоскости Π_2 , откуда роль частоты спектров Фурье будут играть не направление, распространения волны, а координаты фокальной плоскости линзы Π_2 , причем, комплексная амплитуда поля в этой точке соответствует амплитуде спектральной компоненты преобразования Фурье. В этом случае функцию $E_2(x_2, y_2) = s(\omega_{x_2}, \omega_{y_2})$ можно назвать пространственным спектром сигнала $E_1(x_1, y_1)$, плоскость Π_2 – спектральной, а плоскость Π_1 – сигнальной плоскостями.

Описанное свойство линзы составляет основу большинства операций обработки радиосигналов, если изменению его можно поставить в соответствие изображение, т.е. представить в виде функции пропускания транспаранта по координатам x_1, y_1 . Находя пространственный спектр изображения транспаранта, получим эквивалентный ему временной спектр радиосигнала.

Рассмотрим схему системы оптических элементов, представленную на рис. 3. В такой системе сигнальная плоскость второй линзы является спектральной плоскостью первой. Найдем распределение поля $E_3(x_3, y_3)$ в спектральной плоскости линзы L_2 , т.е. плоскости Π_3 :

$$E_3(x_3, y_3) = \int_{-\infty}^{\infty} E_2(x_2) e^{-j \frac{2\pi}{\lambda z} x_3 x_2} dx_2 = \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x_1) e^{-j \frac{2\pi}{\lambda z} x_2 (x_1 + x_3)} dx_1 dx_2 =$$

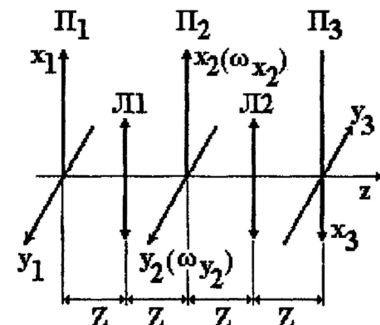


Рис. 3.

$$= \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x_1) dx_1 \lim_{D \rightarrow 0} \int_{-D/2}^{D/2} e^{-j \frac{2\pi}{\lambda z} x_2(x_1+x_3)} dx_2 = \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x_1) \delta(x_1+x_3) dx_1 = E_1(-x_3),$$

где D – апертура линзы L_2 . Окончательно получим: $E_3(x_3) = E_1(-x_3)$ или $E_3(-x_3) = E_1(x_3)$.

Таким образом, в плоскости Π_3 получилось перевернутое изображение сигнала транспаранта $E_1(x_1, y_1)$. Это распределение можно считать обратным преобразованием Фурье функции $E_2(x_2, y_2)$ [3, 5], если в плоскости Π_3 оси координат расположены так, как показано на рис.3.

Спектральные и интегральные преобразования когерентного оптического процессора. Возможности оптических информационных технологий, в частности, когерентного оптического процессора (КОП) для обработки радиосигналов многогранны. Рассмотрим некоторые из них по интегрированию, фильтрации, вычислению функции свертки и корреляции радиосигналов.

Самое простое из перечисленных преобразований, вычисление интеграла от распределения поля в сигнальной плоскости. Пусть в (6) $\omega_{x_2} = \omega_{y_2} = 0$, что соответствует фокусу линзы. В этом случае

$$E_2(0,0) = \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x_1, y_1) dx_1 dy_1.$$

Операция фильтрации спектральных составляющих оптическими методами реализуется довольно просто. Для этого в спектральной плоскости устанавливается другой транспарант, пространственный фильтр с пропусканием $G(\omega_{x_2}, \omega_{y_2})$, на который проектируется спектр сигнала $s(\omega_{x_2}, \omega_{y_2})$. На выходе имеем напряженность электромагнитного поля $E_2'(x_2, y_2) = s(\omega_{x_2}, \omega_{y_2}) G(\omega_{x_2}, \omega_{y_2})$, распределение которого по пространственным частотам изменено в соответствии с характеристикой фильтра. Наиболее просто технически реализовать пространственные фильтры с прямоугольной амплитудной и постоянной фазовой характеристиками.

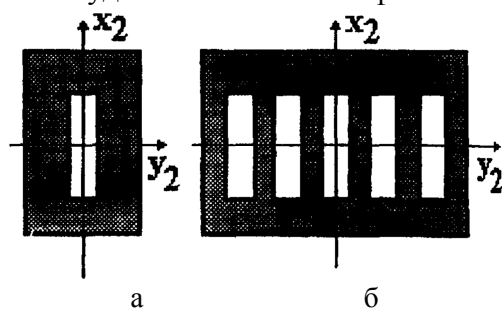


Рис. 4

Их роль могут выполнять прямоугольные отверстия или непрозрачные экраны, помещенные в плоскости Π_2 , примеры которых приведены на рис. 4, где а) – фильтр верхних частот, б) – гребенчатый фильтр.

Фильтры с постоянной амплитудной и прямоугольной фазовой характеристиками выполняются в виде прозрачных диэлектрических масок, напыленных на прозрачные подложки [7].

Метод оптической пространственной фильтрации довольно эффективен при подавлении постоянной составляющей радиосигналов. Для этого в КОП применяется непрозрачный экран, помещаемый в точке с координатами $\omega_x = 0$, $\omega_y = 0$. Такая задача встречается при обработке биполярных сигналов, записанных на фотоносителе [8]. Для записи сначала задается постоянное смещение, а потом на него накладывается сам сигнал. В процессе обработки при перемножении с другими сигналами это постоянное оптическое смещение, как правило, дает ложные составляющие, почему и используется пространственный фильтр.

Дифференциальное выражение для обратного преобразования Фурье дает:

$$s(x) = \frac{\partial}{\partial x} \int_{-\infty}^{\infty} s(\omega_x) e^{j\omega_x x} d\omega_x = \int_{-\infty}^{\infty} j\omega_x s(\omega_x) e^{j\omega_x x} dx.$$

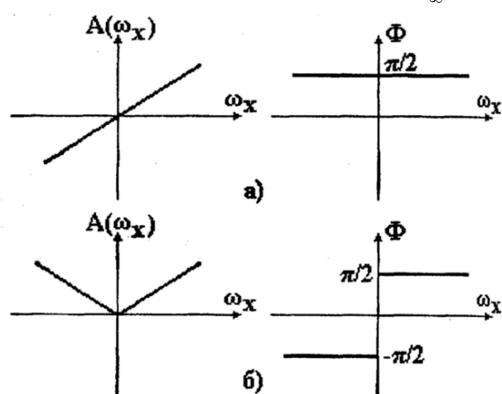


Рис. 5

Из выражения видно, что операцию дифференцирования как частный случай пространственной фильтрации можно реализовать в спектральной плоскости, помещая в ней фильтр, частотная характеристика которого будет:

$$G(\omega_x) = A(\omega_x) e^{j\psi(\omega_x)} = j\omega_x = \omega_x e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (\text{рис. 5, а}).$$

Так как постоянный фазовый сдвиг на $\pi/2$ не существен, то он может быть отброшен, и фильтр задается только амплитудной характеристикой. Практически такой фильтр реализуем путем применения экрана, прозрачность которого увеличивается от центра к краям, а в области отрицательных частот расположена полуволновая фазовая пластина (рис. 5, б).

Вычисление функции свертки и корреляции. Интеграл вида [6]:

$r(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) f_2(\tau - t) dt$ – функция свертки, образуемая при перемножении $f_1(t)$ и обращенной во времени и смещенной на величину τ функции $f_2(t)$. Соответственно

функции корреляции: $\phi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1 f_2(\tau + t) dt$. Для этих функций справедлива прямая

теореме свертки:

$$\int_{-\infty}^{\infty} r(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau = F_1(\omega) F_2(\omega), \quad \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau = F_1(\omega) F_2^*(\omega), \quad (7)$$

которые обосновывают вычисление функции свертки и корреляции, осуществляя операцию над спектрами исходных функций $f_1(t)$ и $f_2(t)$. Для реализации этих математических операций оптические информационные технологии предлагают способ преобразований в спектральной плоскости.

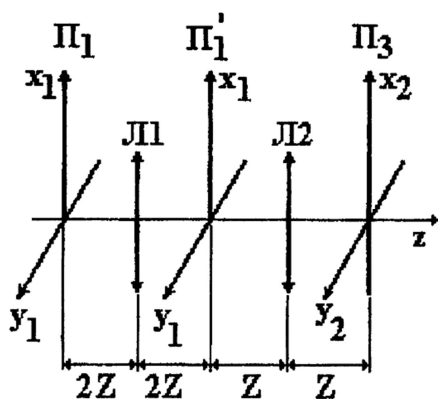


Рис. 6.

Преобразования в спектральной плоскости.

Эту же функцию можно получить при перемножении самих сигналов в сигнальной плоскости. Для этого (рис. 6) нужно изображение $E_1(x_1, y_1)$, находящееся в плоскости Π_1 , спроектировать с помощью линзы L_1 на перевернутое изображение $h(-x_1, -y_1)$ в направлениях x и y в сторону их отрицательных значений. Так как линза L_1 , проектирующая $E_1(x_1, y_1)$ на $h(-x_1, -y_1)$, переворачивает изображение, надо в плоскости Π_1 записать не $E_1(x_1, y_1)$ на $h(-x_1, -y_1)$. Тогда в плоскости Π_1

имеем: $E_1(x_1, y_1)h[(x_0 - x_1)(y_0 - y_1)]$, где x_0, y_0 – смещение сигнала $h(-x_1, -y_1)$. Линза L_2 выполняет операцию преобразования Фурье, и в плоскости Π_2 :

$$E_2(\omega_{x_2}, \omega_{y_2}) = \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x_1, y_1)h[(x_0 - x_1)(y_0 - y_1)]e^{-j(\omega_{x_2}x_1 + \omega_{y_2}y_1)}dx_1dy_1.$$

Тогда в точке $\omega_{x_2} = \omega_{y_2} = 0$ сигнал можно представить в виде:

$$E_2(x_0, y_0) = \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x_1, y_1)h[(x_0 - x_1)(y_0 - y_1)]dx_1dy_1,$$

который при изменении параметров x_0, y_0 дает функцию свертки. Поскольку изменение параметров x_0, y_0 связано с двумерным перемещением транспаранта $h(-x_1, -y_1)$ во времени, то функция свертки будет представлять временную функцию, которая появляется на выходе фотоприёмного устройства, расположенного в точке $\omega_{x_2} = \omega_{y_2} = 0$.

Преобразование в спектральной плоскости требует относительного перемещения сигналов и введения постоянной составляющей для записи биполярных сигналов. Это обстоятельство и то, что функция свертки появляется последовательно во времени, ограничивает возможности данного метода в случае применения фотопластинчатых транспарантов. При использовании акустооптических модуляторов большинство недостатков могут быть технически устранены.

Согласованная фильтрация. Одной из основных задач практической обработки и распознавания радиосигналов является выделение слабого сигнала на фоне помех. В работе [9] показано, что этот процесс оптимален, если смесь сигнала $s(t)$ и помехи $m(t)$ подать на корреляционное устройство, на которое подан сопряженный сигнал $s^*(t)$. Тогда на выходе коррелятора будет отклик вида:

$$\varphi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s^*(t+\tau)dt + \int_{-\infty}^{\infty} m(t)s^*(t+\tau)dt.$$

Данный отклик будет различим, когда в смеси присутствует сигнал $\varphi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s^*(t+\tau)dt$ – функция автокорреляции сигнала. Если сигнал отсутствует,

то $\varphi(\tau) = 0$, так как сигнал и шум некоррелированный: $\int_{-\infty}^{\infty} m(t)s^*(t+\tau)dt = 0$.

Описанный способ выделения сигнала из шумов известен как корреляционная обработка или согласованная (оптимальная) фильтрация и позволяет выделять радиосигналы из шума при отношении сигнал/шум < 1 .

Вопрос создания пространственных фильтров оптической системы пространственной фильтрации радиосигналов рассмотрим, исходя из следующих соображений. Пусть существует полезный сигнал $s(x)$ и шум $m(x)$. Тогда сигнал на входном транспаранте можно представить как $f(x_1) = s(x_1) + m(x_1)$. В спектральной плоскости $f(x_1)$ будет состоять из спектров сигнала и шума $F(\omega_{x_2}) = s(\omega_{x_2}) + M(\omega_{x_2})$. При постановке в спектральной плоскости пространственного фильтра с характеристикой пропускания $G(\omega_{x_2}) = s^*(\omega_{x_2})$, оптимальный для белого шума, суммарный сигнал на выходе фильтра будет $s(\omega_{x_2})s^*(\omega_{x_2}) + M(\omega_{x_2})s^*(\omega_{x_2})$. Подвергнув

этот спектр обратному преобразованию Фурье, в фокальной плоскости L_2 , получим автокорреляционную функцию сигнала и корреляционную функцию сигнала и шума:

$$E_3(x_3, y_3) = \int_{-\infty}^{\infty} s(x_1) s^*(x_1 - x_3) dx_1 + \int_{-\infty}^{\infty} m(x_1) s^*(x_1 - x_3) dx_1.$$

Поскольку сигнал и шум не коррелированы, то второе слагаемое будет пренебрежимо мало по сравнению с первым, и сигнал выделяется из шума. Отсюда следует, что выделение сигнала можно осуществить не только с помощью корреляционного устройства в сигнальной плоскости, но и с помощью специально созданного фильтра, расположенного в спектральной плоскости.

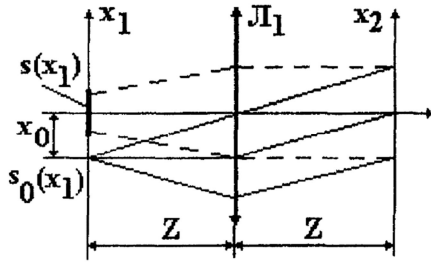


Рис. 7.

Как известно, при разработке радиотехнических систем согласованной фильтрации основной трудностью является создание комплексного оптимального фильтра. Проблема изготовления такого фильтра оптическими методами решается довольно просто. Воспользовавшись методами голографии в общих чертах, рассмотрим такой процесс. Оптическая система, представленная на рис. 7, в сигнальной плоскости кроме изображения

сигнала $s(x_1)$ имеет точечный источник когерентной опорной волны $s_0(x_1) = s(x_1 - x_0)$.

После линзы L_1 , этот источник создает наклонный параллельный световой пучок. Таким образом в фокальной плоскости L_1 , кроме спектра $s(\omega)$, имеем еще и спектр этого источника

$$E_2(\omega_{x_2}, \omega_{y_2}) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega_{x_2} x_1} s(x_1 + x_0) dx_1 = e^{j\omega_{x_2} x_0},$$

что эквивалентно равномерной засветке всех пространственных частот и линейному изменению фазы вдоль оси ω_{x_2} . В показателе экспоненты x_0 определяет величину и направление отклонения опорной волны от оптической оси системы. Далее, в спектральной плоскости помещается фотопластинка, на которую спроектированы спектры этих изображений. Квадратичный характер фоторегистрирующего процесса позволяет интенсивность сигнала на пленке выразить в виде:

$$I(\omega_{x_2}) = |s(\omega_{x_2}) + e^{j\omega_{x_2} x_0}|^2 = [1 + |s(\omega_{x_2})|^2 + s(\omega_{x_2}) e^{-j\omega_{x_2} x_0} + s^*(\omega_{x_2}) e^{j\omega_{x_2} x_0}]. \quad (8)$$

Засвеченная таким образом фотопленка проявляется и представляет голограмму спектра сигнала $s(x_1)$. При определенных режиме проявления и коэффициенте контрастности фотопленки ее пропускание по напряженности поля будет пропорционально (8), которое в последнем члене содержит нужный сигнал $s^*(\omega_{x_2})$, умноженный на $e^{j\omega_{x_2} x_0}$. Помимо этого, как показывает (8), есть еще информация, описываемая другими членами, которая может оказаться помехой при выполнении операции согласованной фильтрации.

Воспользовавшись схемой оптической системы, представленной на рис. 8, поместим голограмму в спектральную плоскость линзы L_1 , а в сигнальной плоскости – изображение сигнала $f(x) = s(x) + m(x)$. При освещении входного транспаранта когерентным светом в плоскости Π_2 имеем произведение:

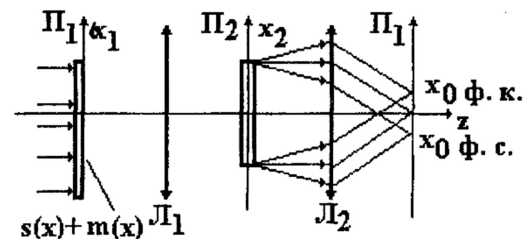


Рис. 8.

$$R(\omega_{x_2}) = s(\omega_{x_2})I(\omega_{x_2}) = F[1 + |s|^2] + Fs^* e^{j\omega_{x_2}x_0} + FSe^{-j\omega_{x_2}x_0}. \quad (9)$$

После преобразований, сигнал на выходе фильтра расщепился на два световых пучка. Пучок, описываемый первым членом $F[1 + |s|^2]$, распространяется в направлении оптической оси системы, и его координатная зависимость близка к Фурье-образу сигнала $f(t)$. Вторым пучком, описываемый компонентой $Fs^* e^{j\omega_{x_2}x_0}$, идет в том же направлении, в каком шел при записи голограммы. Третий член (9) вида $FSe^{-j\omega_{x_2}x_0}$, описывает световой пучок, отклонившийся относительно оси z в противоположном направлении. При прохождении этих пучков через линзу L_2 в ее фокальной плоскости в результате обратного преобразования Фурье получим:

$$H(x_3) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\omega_{x_2}) e^{-j\omega_{x_2}x_3} d\omega_{x_2} = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega_{x_2}) [1 + |s(\omega_{x_2})|^2] e^{-j\omega_{x_2}x_3} d\omega_{x_2} + \\ + \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega_{x_2}) s^*(\omega_{x_2}) e^{-j\omega_{x_2}(x_0 - x_3)} d\omega_{x_2} + \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega_{x_2}) s(\omega_{x_2}) e^{-j\omega_{x_2}(x_0 + x_3)} d\omega_{x_2}.$$

Так как спектральная плотность мощности шума $|\omega_{x_2}|^2$ величина практически постоянная, то $H(x_3) \sim [1 + [1 + |s(\omega)|^2]] f(x) + \phi(x_3 - x_0) + r(x_3 - x_0)$, где $\phi(x_3 - x_0)$ – функция корреляции сигналов $s(x)$ и $f(x)$, смещенных по оси x_3 на величину x_0 , а $r(x_3 - x_0)$ – функция свертки этих двух сигналов, смещения в противоположную сторону на величину x_0 . В окрестности точки $x_3 = 0$ изображение $f(x)$, умноженное на $[1 + |s(\omega)|^2]$. Таким образом, сигнал $Fs^* = (s + M)s$ дает функцию свертки сигнала и шума. В связи с тем, что сигналы спектров Fs^* и Fs будут пространственно разнесены, можно утверждать, что транспарант-голограмма интенсивности прошедшего света, подчиняющейся выражению (8), будет играть роль согласованного фильтра.

Выводы. Оптические информационные технологии, основанные на физических явлениях когерентности электромагнитного поля волн как носителя информации, по многообразию параметров значительно превосходит возможности электрических сигналов. Основными достоинствами оптических методов обработки являются большая информационная емкость, многоканальность, многофункциональность.

Преобразования Фурье реализуются оптическим элементом – линзой когерентного оптического процессора в реальном масштабе времени за один такт КОП. Устройствами «визуализации» радиосигналов могут служить оптические транспаранты на основе фотослоев или наиболее перспективные – акустооптические модуляторы.

Простота реализации, реальный масштаб времени, малые энергозатратные и массогабаритные характеристики – несомненное достоинство когерентных оптических систем пространственно-частотной фильтрации радиосигналов, на основе которых возможны алгоритмы их выделения из шумов, интегрирования, дифференцирования, подавления постоянной составляющей и т.д. Приведенный алгоритм реализации сверхточных операций за счет использования оптических информационных технологий, открывает широкий простор для создания в СИИС процессоров потоков данных, вплоть до реализации матричных, для решения систем уравнений линейной алгебры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В.Н. Информационные технологии, оптический компьютер и фотонные кристаллы / В.Н. Васильев, В.Г. Беспалов. – СПб, ИТМО, 2000. – С. 88-109.
2. Онищенко Т.А. Оптическая обработка информации / Т.А. Онищенко // Радиоэлектроника. Состояние и тенденции развития. – 2004. – № 3. – С. 56-88.
3. Введение в фурье-оптику / Под ред. Г.И. Косоурова. – М.: Мир, 1970. – 364 с.
4. Данилов В.В. Акустооптический модулятор / В.В. Данилов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 1999. – Вып. 111. – С.136-142.
5. Литвиненко О.Н. Основы радиооптики / О.Н. Литвиненко. – Киев: Техника, 1974. – 206 с.
6. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – М.: Наука, 1965. – 772 с.
7. Очен Е.Ф. Вычислительные системы обработки изображений / Е.Ф. Очен. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 136 с.
8. Онищенко Т.А. Оптическая обработка радиосигналов РЛС с синтезированием апертуры / Т.А. Онищенко // Радиоэлектроника. Состояние и тенденции развития. – 2006. – №3. – С.40-51.
9. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики / Л.М. Сороко. – М.: Наука, 1971. – 616 с.

Поступила в редакцию 04.05.2016 г.

OPTICAL INFORMATION TECHNOLOGIES. PROCESSING OF RADIO SIGNALS

I. Tretyakov, M. Pavlov, T. Tiebienieva, V. Danilov

The article investigates data transformation methods of coherent optical systems, space-frequency radio signals filtering. The author considers a coherent optical processor and its spectral and integral transformation. The article offered algorithm of realization ultra-precise operations through the use of optical information technology.

Keywords: lens; coherent optical processor; Fourier transformation; function convolution; correlation; transparency; acousto-optic modulator.

Третьяков Игорь Александрович

аспирант ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк; E-mail: es75i@mail.ru

Tretyakov Igor

Postgraduate of Donetsk National University, Donetsk

Павлов Максим Леонидович

студент ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк;
E-mail: maksim-pavlov199294@mail.ru

Pavlov Maxim

Student of Donetsk National University, Donetsk

Тебенева Татьяна Сергеевна

студентка ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк;
E-mail: tetasia19@gmail.com

Tiebienieva Tetiana

Student of Donetsk National University, Donetsk

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк;
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Donetsk National University, Donetsk

Контактный тел.: +38 066 605 67 62

УДК 003.26

ПОСТРОЕНИЕ ХЭШ-ФУНКЦИИ И СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЦИФРОВОЙ ПОДПИСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИММЕТРИЧНОГО И АСИММЕТРИЧНОГО ШИФРОВ

© 2016. Л.Н. Шкодина

В работе предлагается алгоритм построения хэш-функции для создания электронно-цифровой подписи под электронным документом. С этой целью используются операции нахождения в классе вычетов чисел мультипликативно обратных к элементам выбранных векторов, почленное сложение, вычитание, умножение их элементов и циклические сдвиги. Для создания электронно-цифровой подписи применяются аффинный и на эллиптических кривых шифры.

Ключевые слова: криптография, хэш-функция, хэш-код, цифровая подпись, кольцо остатков, эллиптические кривые, аффинный шифр.

Введение. Задача обеспечения целостности и достоверности пересылаемой по электронным сетям информации является одной из самых важных.

Для подтверждения истинности электронного документа в настоящее время нет необходимости зашифровывать его полностью, если он не содержит секретных сведений. В этом случае под документом ставится электронно-цифровая подпись (ЭЦП). Неотъемлемой частью ЭЦП является использование хэш-функций. Хэш-функции широко применяются в криптографии. Они необходимы при построении ЭЦП для сжатия исходного текста в последовательность определенной длины, т.е. хэш-кода. Самая распространенная схема ЭЦП – это шифрование результата обработки электронного документа хэш-функцией с помощью асимметричных алгоритмов.

Одним из типов построения хэш-функций являются функции «разработанные с нуля», при создании которых имеется возможность учитывать такое свойство, как эффективная программная реализация.

К таким функциям относится стандарт Security Hash Algorithm (SHA), основу которого составляет алгоритм МД4, созданный Ривестом. Другое направление при построении хэш-функций основано на алгоритмах блочного шифрования. К нему относится российский стандарт ГОСТ Р 34.11-94. Этим задачам посвящено множество работ как зарубежных, так и отечественных авторов [1–10].

Обычно стандартные функции хэширования – это функции отображающие строку битов произвольной длины в хэш-код, представляющий собой строку битов фиксированной длины.

В данной работе рассматривается задача обеспечения информационной безопасности электронных документов с помощью ЭЦП, хэш-функция для которой построена по типу «разработанная с нуля», а арифметические действия в ней выполняются в десятичной системе. Операции проводятся в классе вычетов (кольцо остатков) [2, 6, 8].

Постановка и решение задачи. Построение хэш-функции начинается с того что входная последовательность делится на блоки (вектора) по 15 элементов W_k ($k = \overline{1, l}$).

В случае, если длина исходного текста не кратна 15, то последний неполный блок дополняется пробелами. Затем инициализируются пять целочисленных векторов по 15 элементов A, B, C, D, E и еще 5 дополнительных векторов a, b, c, d, e , которые первоначально принимают значения $a = A, b = B, c = C, d = D, e = E$.

Основной цикл, совершаемый над каждым 15 элементным блоком исходного текста W_k , состоит из операций над функциями $g_i(x, y, z)$, ($i = \overline{1, 4}$) и векторами a , b , c , d , e . Функции $g_i(x, y, z)$ имеют вид:

$$\begin{aligned} g_1(x, y, z) &= (x + y * z) << 9, \\ g_2(x, y, z) &= (x * y * y^{-1})^{-1}, \\ g_3(x, y, z) &= 4 * z^{-1} * (y * (x << 4)), \\ g_4(x, y, z) &= ((x - z)^{-1} + 3 * y) << 7. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь x , y , z – векторы, $*$ – почленное перемножение элементов векторов, x^{-1} состоит из элементов мультипликативно обратных к элементам вектора x в кольце остатков $Z_n = \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$, «+», «-» – соответственно сложение, разность элементов векторов, $x << t$ – циклический сдвиг влево (смещение) каждого элемента вектора x на t позиций.

Перед обработкой блоков W_k исходной последовательности его символы преобразуются в целые числа согласно выбранному алфавиту и кольцу остатков Z_n .

Каждый основной оператор над текущим блоком W_k и векторами a , b , c , d , e имеет вид:

$$\begin{aligned} &for(p=1; p \leq 4; p++) \\ &\{ a = (g_p(d, c, e) * W_k^{-1} << (7-p) * a * b); \\ &\quad b = (a << (4+p) * b)^{-1}; \\ &\quad c = c - p * b; \\ &\quad d = (a + b) << 3 * c; \\ &\quad e = (b - c * e) * (a * d)^{-1}; \\ &\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь k номер блока, W_k – блок исходного текста, a, b, c, d, e – одномерные массивы чисел.

В формулах (1), (2) вычисления проводятся в кольце остатков по модулю n , где n – длина выбранного алфавита. В качестве исходного алфавита выбран английский алфавит с разделительными знаками пробел (), запятая (,) и точка (.). Здесь модуль $n = 29$.

После обработки каждого текущего блока W_k исходного текста векторы A , B , C , D , E изменяются

$$\begin{aligned} A &= (A + a) \bmod n, \quad B = (B + b) \bmod n, \\ C &= (C + c) \bmod n, \quad D = (D + d) \bmod n, \quad E = (E + e) \bmod n. \end{aligned}$$

Окончательно, после завершения обработки последней порции исходного текста W_l , хэш-код h получается суммированием

$$h = (A + B + C + D + E) \bmod n.$$

Таким образом, хэш-код h от исходного текста является целочисленным вектором из 15 элементов. Построенный таким образом хэш-код является стойким. Малейшее изменение исходного текста приводит к сильному изменению хэш-кода.

Например, получим хэш-код для следующего текста:

i have paid my dues, time after time, i have done my setntence,
but committed no crime. and bad mistake.

В этом случае хэш-код имеет вид:

221122610121314962120220.

Теперь изменим текст, удалив из него первую запятую. Получим следующий хэш-код:

2561710121025242301104163.

Таким образом, можно заметить, что хэш-код значительно изменился.

Для построения ЭЦП к полученному хэш-коду применяется композиция двух шифров. Вначале хэш-код h зашифровывается аффинным шифром 3-го порядка. Здесь ключами являются матрица 3-го порядка A , которая принадлежит кольцу обратимых матриц, и вектор s . Для этого определитель w матрицы A должен быть взаимно простым с модулем n , т.е. $\text{НОД}(w, n) = 1$.

Шифрование осуществляется по формуле [1]

$$x' = E(x) = (A \cdot x + s) \bmod n,$$

где x – блок хэш-кода h , а x' – блок криптотекста (x и x' – триграммы).

Алгоритм дешифрования осуществляется по формуле

$$x = D(x') = (A' \cdot x' + s') \bmod n,$$

здесь $A' = A^{-1}$ и $s' = -A' \cdot s$ – дешифрующие ключи. Элементы дешифрующей матрицы A^{-1} вычисляются по формуле

$$a_{ij}^{-1} = (A_{ji} \cdot w^{-1}) \bmod n,$$

а A_{ij} – алгебраические дополнения к элементам a_{ij} матрицы A .

К криптотексту, полученному после шифрования аффинным шифром, применяется шифр на эллиптических кривых. В общем случае уравнение для эллиптических кривых имеет вид [2, 6, 8]

$$y^2 + axy + by = x^3 + cx^2 + dx + e, \quad (3)$$

здесь a, b, c, d, e – действительные числа.

В криптографических целях имеют дело с упрощенной формой эллиптической кривой, которая определяется над конечным полем. Здесь рассматривается эллиптическая группа по модулю p , где p – простое число, а уравнение (3) приводится к более простому виду

$$y^2 = x^3 + ax + b, \quad (4)$$

где a и b меньше p и дискриминант уравнения удовлетворяет условию

$$\Delta = (4a^2 + 27b^2) \bmod p \neq 0.$$

Через $E_p(a, b)$ обозначают эллиптическую группу точек по модулю p , элементы которых (x, y) неотрицательные целые числа меньше p и удовлетворяют уравнению (4) по $\bmod p$ [2, 6, 8].

Над точками этой группы определяются две операции «сложения» и «умножения» на константу. Эти операции выполняются по следующим формулам. Если $P = (x_1, y_1)$ и $Q = (x_2, y_2)$ точки эллиптической кривой (4), а $P + Q = (x_3, y_3)$, то последние координаты определяются по формулам:

$$\begin{aligned} x_3 &= (\lambda^2 - x_1 - x_2) \bmod p, \\ y_3 &= (\lambda(x_1 - x_2) - y_1) \bmod p, \\ \lambda &= \begin{cases} (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1), & \text{если } P \neq Q \\ (3x_1^2 + a)/(2y_1), & \text{если } P = Q \end{cases}. \end{aligned}$$

В случае равенства точек, мы получаем удвоенное P , а если выполнять операцию сложения несколько раз в цикле, то можно определить произведение $l \cdot P$, где l – целое число.

После выбора группы $E_p(a, b)$ нужно определить генерирующую точку $G(x, y)$ таким образом, чтобы наименьшее число n , при котором $n \cdot G = 0$ было очень большим простым числом.

Для шифрования пользователь B выбирает личный ключ $n_b < n$ и генерирует открытый ключ $P_b = n_b x G$. Пользователь A , чтобы зашифровать сообщение P_m , выбирает случайное положительное число $k < n$ и получает зашифрованный текст C_m

$$E(P_m) = C_m = (C_m^1, C_m^2) = (kG, P_m + kP_b),$$

здесь используется открытый ключ P_b .

Пользователь B дешифрует полученное сообщение по формуле

$$D(C_m) = C_m^2 - n_b C_m^1.$$

Действительно в процессе дешифровки получается исходный текст

$$D(C_m) = P_m + kP_b - n_b(kG) = P_m + k(n_b G) - n_b(kG) \equiv P_m.$$

Анализ результатов. Рассмотрим пример построения ЭЦП к следующему тексту:

while the tiny house movement has been well documented, a bigger idea for smaller living space is on the rise that of the micro condo or tiny apartment. driven by housing shortages and an affordability crisis in cities across the globe, these pint sized pads also referred to as apodments, micro digs, nano uites and micro lifts are being planned and promoted by developers both as luxury rentals and as an affordable entry into competitive housing mar kets.

После обработки этого текста хэш-функцией получаем хэш-код

$$h = 7 \ 18 \ 15 \ 8 \ 12 \ 28 \ 10 \ 28 \ 19 \ 20 \ 5 \ 3 \ 25 \ 5 \ 14$$

Зашифруем полученный хэш-код с помощью аффинного шифра с ключами

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 5 \\ 15 & 25 & 7 \\ 9 & 16 & 0 \end{pmatrix}, \quad s = \begin{pmatrix} 8 \\ 23 \\ 7 \end{pmatrix}.$$

Получим криптотекст $C_1 = \text{rqkbbkwuxffghmw}$. К полученному результату C_1 применим алгоритм шифрования на эллиптических кривых, где группа

$E_p(a, b) = E_{751}(324, 52)$, $k = 89$, $n_b = 48$, $G = (72, 539)$. В итоге получаем электронно-цифровую подпись для выбранного текста.

$C_2 = 521\ 406\ 494\ 30\ 587\ 132\ 228\ 709\ 165\ 313\ 228\ 709\ 157\ 478$
 $367\ 332\ 435\ 735\ 548\ 124\ 548\ 124\ 146\ 328\ 283\ 470\ 380\ 671\ 157\ 478$

Выводы. В данной статье разработан алгоритм хэш-функции и с помощью композиции двух шифров построена ЭЦП под электронным документом. Проведены численные исследования для исходных текстов разной длины. Из полученных результатов следует, что незначительное изменение содержимого текста приводят к значительным изменениям хэш-кода. Это является одним из признаков стойкости хэш-функции.

Длина хэш-кода варьировалась от 30 до 10 элементов. Поскольку стойкость ЭЦП к фальсификациям зависит от избыточности информации, то в качестве оптимальной длина хэш-кода h выбрана равной 15 элементам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вербицкий О.В. Вступ до криптології / О.В. Вербицкий. – Л.: ВНТЛ, 1998. – 248 с.
2. Коблиц Н. Курс теории чисел и криптографии / Н. Коблиц. – М.: СОЛОН, 2001. – 254 с.
3. Мао Венбо. Современная криптография: теория и практика / В. Мао. – М.: Вильямс, 2005. – 763 с.
4. Обзор результатов анализа хэш-функций ГОСТ Р 34.11-2012 / С.В. Смышляев, В.А. Шишкин, Г.В. Маршалко и др. // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2015. – № 4. – С.147-153.
5. Петров А.А. Компьютерная безопасность. Криптографические методы защиты / А.А. Петров – М.: ДМК, 2000. – 444 с.
6. Рябко Б.Я. Криптографические методы защиты информации / Б.Я. Рябко, А.Н. Фионов. – М.: Горячая линия - телеком, 2005. – 229 с.
7. Скобелев В.Г. Введение в криптологию / В.Г. Скобелев. – Донецк, 2008. – 176 с.
8. Столлингс В. Криптография и защита сетей / В. Столлингс. – М.: Вильямс, 2001. – 669 с.
9. Тилборг ван Х.К.А. Основы криптологии / Х.К.А. Ван Тилборг. – М.: МИР, 2006. – 271 с.
10. Яценко В.В. Введение в криптографию / Яценко В.В. – СПб.: Питер, 2001. – 288 с.

Поступила в редакцию 26.05.2016 г.

BUILD A HASH FUNCTION AND CREATING A DIGITAL SIGNATURE USING A SYMMETRIC AND ASYMMETRIC CIPHERS

L.N. Shkodina

In work the algorithm of a hash function to generate digital signature on the electronic document. With this purpose, the operation of finding the residue class of numbers multiplicatively inverse to the elements of the selected vectors, poslanoe addition, subtraction, multiplication, their elements and cyclic shifts. To create a digital signature applied affine and elliptic curve ciphers.

Keywords: cryptography, hash function, hash code, digital signature, ring residues, elliptic curves, affine cipher.

Шкодина Лариса Николаевна

кандидат физико-математических наук, доцент;
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
 г. Донецк, доцент
 83001, г. Донецк, ул. Университетская, 24
 E-mail: Shkodina@i.ua

Shkodina Larisa Nikolaevna

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Docent;
 Donetsk National University, Donetsk, Associate
 Professor

Х И М И Ч Е С К И Е Н А У К И

УДК 543.421

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИЧЕСКИХ
МОДИФИКАТОРОВ ПРИ АТОМНО-АБСОРБЦИОННОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ
СЛЕДОВ МОЛИБДЕНА

© 2016. А.С. Алемасова, Н.Д. Щепина

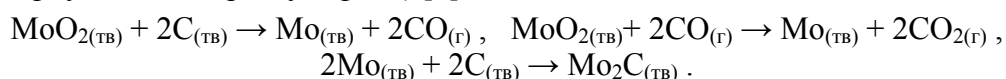
Исследована сравнительная эффективность палладий-комплексных химических модификаторов (комплексов палладия(II) с ксиленоловым оранжевым и хромазуолом S) при ЭТААС определении фоновых количеств молибдена в высокосолевых матрицах и соках.

Ключевые слова: электротермическая атомно-абсорбционная спектрометрия; молибден; палладий-комплексные модификаторы/

Введение. Электротермическая атомно-абсорбционная спектрометрия (ЭТААС) является основным методом контроля нормируемого содержания молибдена в пищевых продуктах, биологических пробах, объектах окружающей среды и т.д. [1]. Точность результатов анализа в значительной степени определяется влиянием матрицы на высокотемпературные процессы образования свободных атомов молибдена в графитовых печах. Минимизировать эти влияния возможно с использованием аппаратных приемов и химических модификаторов (ХМ). Модификаторы увеличивают летучесть мешающих компонентов; термостабилизируют аналиты; обеспечивают лучший контакт между образцом и поверхностью атолизатора; устраняют помехи в конденсированной и газовой фазах; снижают фоновое поглощение. При этом также облегчается градуировка, появляется возможность использовать единую серию стандартных образцов для всех проб, улучшаются метрологические характеристики методики.

Как правило, ХМ успешно применяются для некарбидообразующих элементов, имеющих летучие и сравнительно прочные оксиды. Молибден относится к группе труднолетучих карбидообразующих элементов, что обуславливает необходимость особого подхода при выборе и оценке эффективности ХМ в ЭТААС методе. В частности, одни из самых эффективных модификаторов – металлы платиновой группы Pt, Pd, Ru, Rh, Ir – в ряде случаев ухудшают предел обнаружения молибдена [2].

Высокотемпературная химия молибдена чрезвычайно сложна. Особенностью атомно-абсорбционного определения его является выраженное взаимодействие соединений молибдена MoO_3 и Mo с графитом за счет образования sp-sp связей с вкладом sp-d -орбитальных взаимодействий. В температурном диапазоне 1170–1470 К протекают гетерофазные реакции на поверхности графита (индексы «ТВ» и «Г» означают твердую и газообразную фазы) [3]:

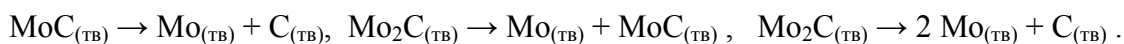


Оксид MoO_2 имеет развитую поверхность, способную реагировать с графитом и СО. При 1170 К на поверхности пиролитического графита образуются большие хорошо развитые структурные кристаллы MoO_2 , которые имеют меньшую поверхность и хуже восстанавливаются С и СО. Часть MoO_2 на этой стадии остается невосстановленным.

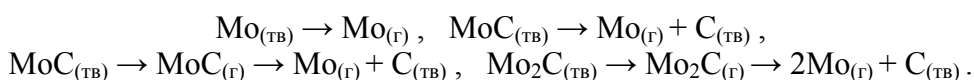
При температурах выше 1270 К MoO_2 не устойчив, часть его сублимируется без разложения, остальное диспропорционирует:



Газообразные продукты выносятся из атолизатора инертным газом. При дальнейшем повышении температуры в конденсированной фазе при 2300–2500 К образуются MoC , Mo_2C и Mo , а при 2600 К MoC и Mo_2C . Так как при температурах выше 1600 К в печи не было найдено MoO_2 , возможность образования газообразного молибдена из этого оксида маловероятна. Атомизация вероятнее всего протекает согласно следующим уравнениям [4]:



Так как MoC , Mo_2C и Mo были найдены в конденсированной фазе перед атомизацией, можно представить также следующие механизмы образования свободных атомов Mo [4]:



Предложен ряд ХМ для ЭТААС определения молибдена в различных объектах. Использование аскорбиновой кислоты рекомендуется во многих источниках [5, 6], однако данные об её эффективности неоднозначны. Описано эффективное применение пероксида водорода при определении молибдена в молоке [7]; BaF_2 , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Pd}(\text{II})$ в смеси с гидросиламином, солей РЗЭ при определении молибдена в сыворотке крови, моче [8–12]; смеси $\text{Pd}(\text{NO}_3)_2$ – $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ и специальный «модифицирующий» газ – 5 % H_2 и 95 % Ar [13]. Отмечена низкая эффективность ХМ на основе палладия при ЭТААС определении молибдена [11].

В то же время модификаторы на основе металлов платиновой группы, в том числе на основе палладия(II), являются эффективными ХМ для ЭТААС определения значительного числа элементов [14, 15], что обусловлено способностью металлического палладия при определенных температурах взаимодействовать с большинством металлов, образуя твердые (нестехиометрические) сплавы. Образование твердых растворов, а также высокая температура плавления палладия 1555 °С позволяют термостабилизировать аналит на несколько сот градусов. При этом точка плавления сплава молибдена с палладием имеет промежуточное значение [16]. Помимо этого, палладий является мощным катализатором. Для молибдена это может проявляться в реакциях восстановления оксида молибдена углеродом печи возможно даже на стадиях сушки. Кроме того, палладий катализирует разложение хлоридов, устраняя тем самым влияние матрицы. Еще одним свойством, определяющим популярность палладия как модификатора по сравнению с другими платиновыми металлами, является его относительно низкая температура кипения (2964 °С), позволяющая практически полностью удалить из атолизатора остаток металла во время стадии очистки.

Для устранения матричных влияний в ЭТААС методе был предложен новый эффективный класс модификаторов на основе палладия, а именно, комплексные соединения $\text{Pd}(\text{II})$ с органическими лигандами, которые обладают целым рядом преимуществ – собственное низкое неселективное поглощение, снижение расхода палладия, высокая толерантность к депрессирующим матрицам [17]. Ранее при ЭТААС определении карбидообразующих элементов эти модификаторы не применялись.

Целью данной работы являлось исследование эффективности нового класса ХМ – палладий-комплексных модификаторов – при ЭТААС определении следов молибдена в многокомпонентных высокосолевых матрицах и оценка аналитических возможностей этого класса модификаторов в сравнении с ранее используемыми.

Основная часть. В работе использовали реактивы квалификации х.ч. и выше. Для приготовления стандартных растворов молибдена(VI), палладия(II) использовали стандартные образцы состава растворов ионов металлов (ФХИ с ОП НАН Украины, Одесса).

Ранее было показано [3], что основным критерием при выборе металлокомплексных модификаторов является устойчивость комплексов в растворе. Исходя из этого в качестве ХМ были выбраны комплексные соединения палладия(II) с ксиленоловым оранжевым и хромазуолом S. Известно [18], что в 1 М растворе HClO_4 палладий(II) взаимодействует с ксиленоловым оранжевым с образованием комплекса с максимумом светопоглощения при $\lambda = 518$ нм. Однако данные об устойчивости комплекса отсутствуют. В литературе [18] имеются также сведения о возможности образования комплекса палладия(II) с хромазуолом S в интервале $\text{pH} = 4\text{--}5,5$ с максимумом светопоглощения при 580–600 нм.

Модификаторы готовили смешиванием 0,01 моль/л растворов нитрата палладия(II) и ксиленолового оранжевого или хромазуола S с последующим регулированием кислотности с помощью растворов азотной кислоты и гидроксида калия. Контроль pH растворов проводили с использованием иономера И-160МИ. Комплексы далее были выделены в твердом состоянии экстракцией изопропиловым спиртом в присутствии высаливателя – сульфата аммония с последующей очисткой перекристаллизацией из этанола [17]. Массовая доля палладия в них была определена пламенным атомно-абсорбционным методом. Установлено, что соотношение металл:лиганд в обоих комплексах составляет 1:1.

ЭТААС измерения проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре Сатурн-3 (однолучевая схема с дейтериевым корректором неселективного поглощения); интегральную интенсивность сигнала регистрировали с помощью модуля связи, сопряженного с персональным компьютером. Использовали графитовые трубки с пиролитическим покрытием (МПП-6) (производство г. Северодонецк, Украина). Аликвоты анализируемых растворов дозировали с использованием ручного дозатора Р200 на стенку графитовой печи. Точность дозирования составляла $\pm 0,2\%$. Температурно-временная программа была следующая: сушка при 100°C в течение 15 с; пиролиз при плавном подъеме температуры до 1400°C в течение 15 с и атомизация при 2600°C в течение 5 с. На стадии атомизации отключали аргон во внутренней полости графитовой печи. При необходимости использовали высокотемпературную очистку печи при 2700°C .

Чувствительность атомно-абсорбционного определения молибдена оценивали по величине характеристической массы. Характеристическую массу вычисляли по формуле $m_{\text{хар}} = (C \cdot V - 0,0044) / Q_A$, где C – концентрация раствора молибдена(VI), г/мл; V – объем дозируемого раствора, мл; $Q_A = \int_0^t A(t) dt$ – интегральное значение абсорбционности.

Предел обнаружения молибдена (LOD) оценивали по 3σ -критерию [19], по которому пределом обнаружения считают концентрацию молибдена, при определении которой аналитический сигнал равен утроенному значению стандартного отклонения флуктуаций фона. Предел обнаружения рассчитывали по уравнению $\text{LOD} = 3 \cdot S_a / b$, где S_a – стандартное отклонение коэффициента a в уравнении градуировочного графика $A = a + b C$; b – коэффициент чувствительности.

Спектрофотометрическим методом был изучен состав комплексов палладия(II) в растворе и определены условные константы устойчивости по данным кривых

насыщения. Спектры регистрировали на спектрофотометре СФ-46 относительно воды в кювете с толщиной слоя $l = 0,3$ см (рис. 1).

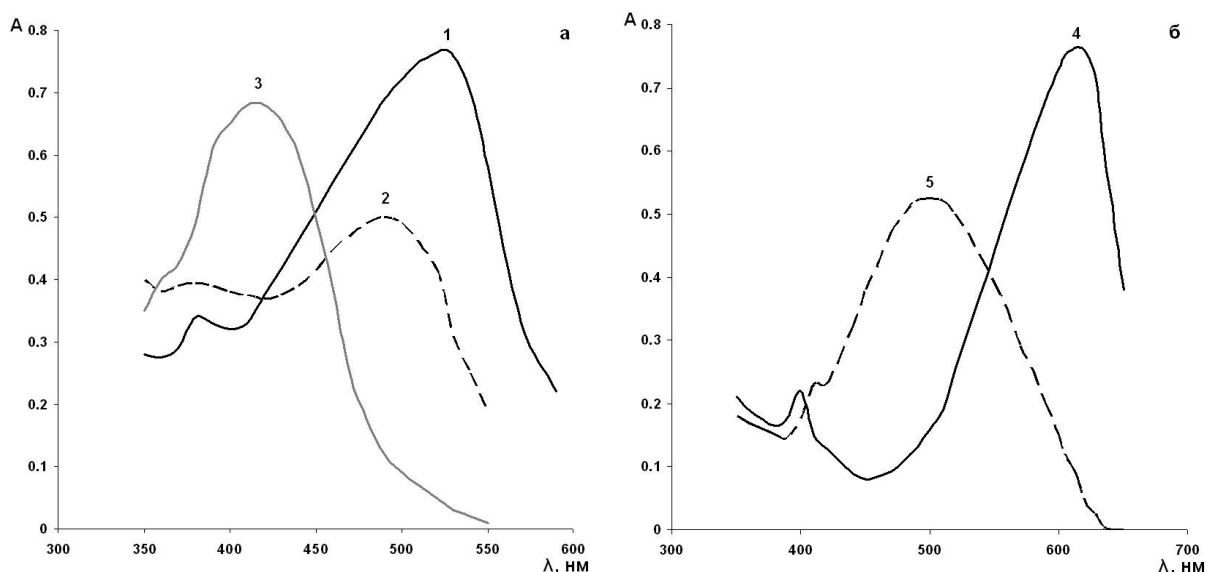


Рис. 1. Спектры поглощения комплексов палладия с ксиленоловым оранжевым (а) и хромазуолом S (б): 1 – комплекс в 1 М раствор HClO_4 ; 2 – комплекс в 1 М растворе HNO_3 ; 3 – ксиленоловый оранжевый в 1 М растворе HNO_3 ; 4 – комплекс при $\text{pH} = 4$; 5 – хромазуол S при $\text{pH} = 4$

Данные рис. 1 подтверждают образование комплексного соединения ионами палладия(II) с ксиленоловым оранжевым в 1 М растворе HClO_4 и в 1 М растворе HNO_3 . Максимум светопоглощения в 1 М растворе HClO_4 при 518 нм хорошо согласуется с литературными данными. В 1 М растворе HNO_3 максимум светопоглощения смещается на 30 нм, что объясняется вхождением нитрат-ионов во внешнюю координационную сферу комплекса [20]. Следует отметить, что этот химический модификатор представляет уникальную возможность химического модифицирования азотнокислых анализируемых растворов, так как комплекс образуется и устойчив в кислой среде. В то же время азотная кислота (одна или в смеси) чаще всего используется для вскрытия сложных многокомпонентных проб. Спектры поглощения (кривые 4 и 5 на рис. 1) также подтверждают образование комплексного соединения между ионами палладия(II) и хромазуолом с максимумом светопоглощения при 600 нм.

Методом насыщения определены условные константы устойчивости обоих комплексов (рис. 2). Условные константы устойчивости комплексов составили соответственно: комплекс Pd(II) с ксиленоловым оранжевым – $2,4 \cdot 10^{10}$ в 1 М HNO_3 и комплекс Pd(II) с хромазуолом S – $1,0 \cdot 10^8$ ($\text{pH} = 4$). На рис. 2 кривые насыщения комплексов палладия(II) с ксиленоловым оранжевым при $\lambda = 490$ нм (а) и хромазуолом S при $\lambda = 600$ нм (б): C_R – концентрация реагента; C_M – концентрация палладия(II).

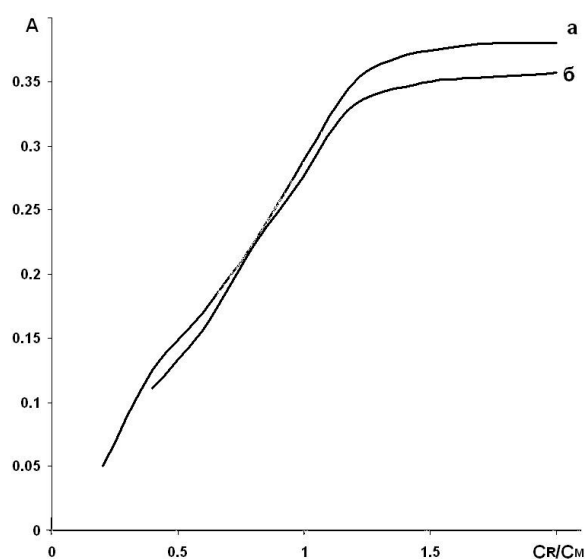
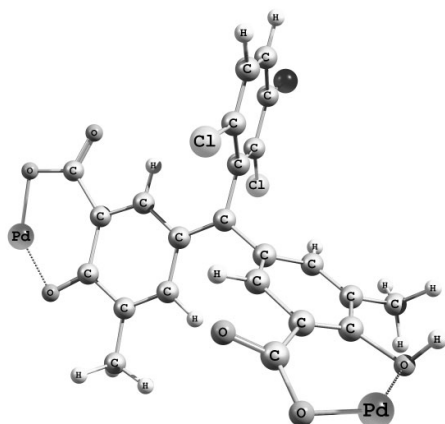
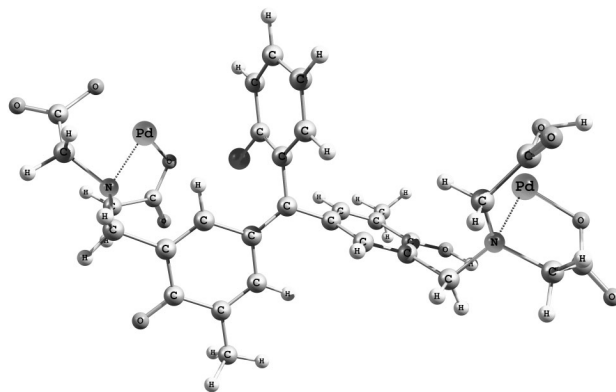


Рис. 2

Гипотетическая структура комплексов была оптимизирована методом молекулярной механики MM^+ , который реализован в программном комплексе структурной химии Hyper Chem 8.0:



комплекс Pd(II) с хромазувром S



комплекс Pd(II) с ксиленоловым оранжевым

При использовании в качестве ХМ палладий-комплексных соединений восстановление палладия до металлического происходит при более низких температурах, что способствует модификации поверхности графитовой печи и предотвращению карбидообразования молибдена, а также термостабилизации аналита. Исходя из этого, можно было ожидать, что эффективность влияния модификаторов на аналитический сигнал молибдена будет зависеть от pH.

На рис. 3 представлены зависимости аналитического сигнала молибдена от pH в присутствии палладий-комплексных модификаторов: 1 – комплекса палладия(II) с ксиленоловым оранжевым; 2 – комплекса палладия(II) с хромазувром S.

Видно, что оптимальный рабочий диапазон палладий-комплексных модификаторов совпадает с диапазоном существования комплексов. Так, комплекс палладия(II) с ксиленоловым оранжевым эффективен в сильноокислой среде в диапазоне pH=1-2. Увеличение pH ведет к разрушению комплекса; в сильноокислой среде (pH<1) комплекс также разрушается вследствие образования устойчивых нитратных комплексов $Pd(NO_3)_4^{2-}$ [20].

Комплекс палладия(II) с хромазувром начинает разрушаться при pH<4, что возможно обусловлено вхождением нитрат-ионов во внутреннюю сферу комплекса, и при pH>5,5 вследствие образования малорастворимого гидроксида палладия ($IP = 2 \cdot 10^{-29}$).

Одной из основных сравнительных характеристик ХМ является его способность термически стабилизировать аналит, что позволяет без потерь отгонять на стадии пиролиза мешающие компоненты пробы. Термостабилизирующую способность

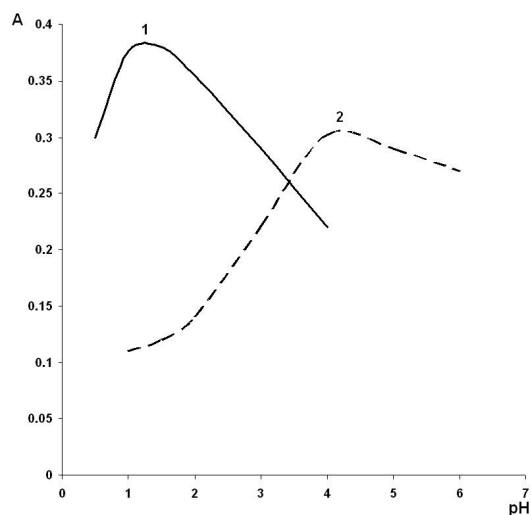


Рис. 3

модификатора принято характеризовать максимально допустимой температурой на стадии пиролиза, которую определяют экспериментально из кривых пиролиза. Полученные экспериментально кривые пиролиза представлены на рис. 4. Влияние температуры на стадии пиролиза на аналитический сигнал молибдена: 1 – раствор $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ ($[\text{Mo(VI)}]=0,04$ мкг/мл); 2 – раствор $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ в присутствии 0,001 моль/л комплекса палладия(II) с ксиленоловым оранжевым; 3 – раствор $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ в присутствии 0,001 моль/л комплекса палладия(II) с хромазулом S

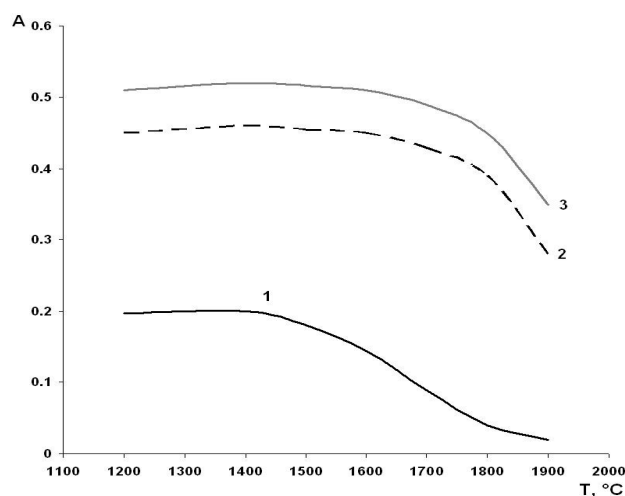


Рис. 4

При максимально допустимой температуре пиролиза были рассчитаны значения характеристических масс молибдена и проведена сравнительная оценка чувствительности ЭТААС определения молибдена в присутствии новых модификаторов и ранее применяемых. Сравнивали также термостабилизирующую способность модификаторов по величине максимально допустимой температуры пиролиза. Полученные значения характеристических масс и максимально допустимой температуры на стадии пиролиза обобщены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристическая масса ($m_{\text{хар}}$) и максимально допустимая температура на стадии пиролиза ($T_{\text{макс}}$) при ЭТААС определении молибдена

Модификатор	$m_{\text{хар}}$, пг	$T_{\text{макс}}$, °C
Без модификатора	14	1400
Соли иридия	–	1800 [2]
Фторид бария	10 [11]	1300 [11]
Комплекс Pd(II) с ксиленоловым оранжевым	7	1800
Комплекс Pd(II) с хромазулом S	7	1850

Данные табл. 1 свидетельствуют, что максимально допустимая температура на стадии пиролиза в присутствии предложенных модификаторов может быть увеличена до 1850 °C, что на 450 °C выше, чем без модификатора. Термостабилизирующая способность палладий-комплексных модификаторов соизмерима с модификаторами на основе соединений иридия и превосходит модификаторы на основе рутения, родия и платины [21]. При этом термостабилизация аналита достигается при значительно меньшем количестве модификатора – металла платиновой группы.

Следует отметить, что предложенные модификаторы снижают значение характеристической массы молибдена с 14 пг до 7 пг, что свидетельствует о повышении чувствительности ЭТААС определения молибдена в их присутствии, вероятно, вследствие предотвращения преждевременных потерь в виде MoC при температурах свыше 1500 K и оптимизации условий образования атомных паров молибдена.

В практике ЭТААС метода эффективность действия ХМ принято также выражать максимально допустимой концентрацией модельных матриц, вызывающих менее 10%

изменения аналитического сигнала определяемого элемента в присутствии модификатора [14]. Такими модельными матрицами являются хлорид и сульфат натрия, которые являются неотъемлемыми компонентами комплексных матриц большинства анализируемых объектов – пищевых продуктов, объектов окружающей среды, биологических объектов. С этой целью при прочих постоянных параметрах температурно-временной программы варьировали концентрацию модельных матриц и определяли их максимально допустимые концентрации (табл. 2). Для сравнительной оценки толерантности новых модификаторов к модельным матрицам использовали один из самых эффективных палладий-магниевого модификатор, который готовили в соответствии с [14].

Таблица 2

Допустимые количества модельных матриц Na_2SO_4 и NaCl при ЭТААС определении молибдена в присутствии химических модификаторов

Модификатор	Сульфат натрия, г/л	Хлорид натрия, г/л
Без модификатора	0,05	2
Комплекс палладия(II) с ксиленоловым оранжевым	0,5	10
Комплекс палладия(II) с хромазуолом S	4	10
Палладий-магниевого модификатор $\text{Pd}(\text{NO}_3)_2 + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	2	6

Из данных табл. 2 видно, что предложенные палладий-комплексные модификаторы эффективны в депрессирующих модельных матрицах, причем допустимое количество сульфата натрия в 80 раз больше, чем в растворе без модификатора (комплекс палладия(II) с хромазуолом S), а допустимое количество хлорида натрия в 5 раз. Это позволяет говорить о возможности и целесообразности применения их для анализа объектов окружающей среды, биологических объектов и продуктов питания.

На основе проведенных исследований комплекс палладия(II) с ксиленоловым оранжевым был выбран для разработки чувствительной, точной и экспрессной ЭТААС методики определения молибдена во фруктовых соках.

К аликвоте сока добавляли навеску модификатора до достижения концентрации последнего 0,001 моль/л. Так как комплекс устойчив в сильноокислой среде, к анализируемому образцу добавляли ~0,3 мл концентрированной азотной кислоты. Пробу разбавляли до 5 мл и 20 мкл полученного раствора дозировали непосредственно на стенку графитовой печи. Использовали удлиненную стадию пиролиза с выдержками при 400, 800 и 1800°C. Атомизацию проводили при 2600°C в течение 5 секунд при отключенном потоке аргона во внутренней полости графитовой печи. Количественное определение проводили по методу стандартных добавок. Параллельно проводили кислотную минерализацию пробы сока по [21]. Полученные данные представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение метрологических характеристик ЭТААС методики определения молибдена в соке с применением модификатора комплекса палладия(II) с ксиленоловым оранжевым ($n = 3$; $P = 0,95$)

Объект анализа	Найдено			
	методика со стадией пробоподготовки		прямое определение	
	$\bar{C} \pm \delta$, мг/кг	S_r	$\bar{C} \pm \delta$, мг/кг	S_r
Сок виноградно-яблочный осветленный марки Сандора	$0,022 \pm 0,007$	0,13	$0,015 \pm 0,008$	0,21

Установлено, что содержание молибдена в соках соответствует ПДК и фоновому содержанию молибдена. Сравнение двух средних по F- и t-критерию свидетельствует об отсутствии статистически значимого различия между двумя результатами. Предел обнаружения разработанной новой методики составляет 4 мкг/кг, что на один-два порядка ниже, чем среднее содержание молибдена в пищевых продуктах. Разработанная методика не уступает стандартной по сходимости, однако позволяет сократить время определения с 4–6 часов до 10–15 минут, исключить использование летучих кислот, значительно снизить себестоимость элемент-определения.

Выводы. Таким образом, комплексные соединения палладия(II) с хромазуолом S и ксиленоловым оранжевым проявляют лучшую модифицирующую способность в высокотемпературных процессах образования свободных атомов карбидообразующего элемента молибдена, чем ранее используемые модификаторы – соли иридия, фторида бария, смесь нитратов палладия(II), магния(II). Допустимое количество депрессирующих модельных матриц в присутствии палладий-комплексных модификаторов может быть увеличено в 80 раз для Na_2SO_4 и в 5 раз для NaCl по сравнению с растворами без модификаторов. С использованием новых модификаторов разработана ЭТААС методика определения содержания молибдена в соках без предварительной минерализации с пределом обнаружения 4 мкг/кг и относительным стандартным отклонением $S_r = 0,21$, которая позволяет сократить время анализа до 10–15 минут, снизить себестоимость анализа и устранить использование летучих токсичных кислот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пупышев А.А. Атомно-абсорбционный спектральный анализ / А.А. Пупышев. – М.: Техносфера, 2009. – 782 с.
2. Volynsky A.B. Comparative efficiency of platinum group metal modifiers in electrothermal atomic absorption spectrometry / A.B. Volynsky // *Spectrochimica Acta. Part B.* – 2004. – Vol. 59. – P. 1799-1821.
3. Experimental and theoretical studies of the factors that influence the determination of molybdenum by electrothermal atomic absorption spectroscopy / Z. Benzo, P. Araujo, A. Sierralta, F. Ruetter // *Anal. Chem.* – 1993. – Vol. 65, No 8. – P. 1107-1113.
4. Welz B. Atomic absorption spectrometry / B. Welz, M. Sperling. – Wiley – VCH, 1999. – 941 p.
5. Pita Calvo C. Determination of molybdenum in biological objects by ETAAS / Calvo C. Pita, P. Barrera, A. Barrera // *Anal. Chim. Acta.* – 1995. – Vol. 310. – P. 189-192.
6. Химические модификаторы в современной электротермической атомно-абсорбционной спектроскопии / А.Б. Волынский // *Журн. аналит. химии.* – 2003. – Т. 58, № 10. – С. 1015-1032.
7. Lopez-Garcia I. Electrothermal atomic absorption spectrometry determination of molybdenum in milk / I. Lopez-Garcia, M. Hernandez-Cordoba // *Anal. Chim. Acta.* – 1997. – Vol. 356. – P. 267-270.
8. Ericson P. Electrothermal atomic absorption spectrometry determination of molybdenum and vanadium in serum blood / P. Ericson, M. McHalsky, B. Jaselskis // *At. Spectrosc.* – 1987. – Vol. 8. – P. 101-105.
9. Barrera P. Determination of molybdenum and vanadium in milk by electrothermal atomic absorption spectrometry / P. Barrera, C. Pita Calvo, F. Martines // *Analyst.* – 1990. – V. 115. – P. 549-553.
10. Barrera P. Electrothermal atomic absorption spectrometry determination of molybdenum in serum blood / P. Barrera, C. Pita Calvo, A. Barrera, F. Martines // *Fresenius' J. Anal. Chem.* – 1991. – Vol. 340. – P. 265-267.
11. Pita Calvo C. Determination of trace elements in urine by electrothermal atomic absorption spectrometry / C. Pita Calvo, P. Barrera, A. Barrera // *Talanta.* – 1999. – Vol. 48. – P. 905-908.
12. Burguera J., Burguera M., Roa M. Electrothermal atomic absorption spectrometry determination of molybdenum in whole blood / J. Burguera, M. Burguera, M. Roa // *J. Anal. At. Spectrom.* – 2002. – Vol. 57, No 3. – P. 561-569.
13. Chen L. Direct and simultaneous determination of copper, manganese and molybdenum in sea-water with a multielement electrothermal atomic absorption spectrometer / L. Chen, K. Danaduray, D. Huang // *J. Anal. At. Spectrom.* – 2001. – Vol. 16, No 4. – P. 404-408.

14. Welz B. Palladium nitrate-magnesium nitrate modifier for electrothermal atomic absorption spectrometry. Part 5. Performance for the determination of 21 elements / B. Welz, G. Schlemmer, J.R. Mudakavi // J. Anal. At. Spectrom. – 1992. – Vol. 7, No 8. – P. 1257–1271.
15. Волынский А.Б. Химические модификаторы на основе соединений платиновых металлов в электротермической атомно-абсорбционной спектрометрии / А.Б. Волынский // Журн. аналит. химии. – 2004. – Т. 59, № 6. – С. 566–586.
16. Савицкий Е.М. Сплавы палладия / Е.М. Савицкий, В.П. Полякова, М.А. Тылкин. – М.: Наука, 1967. – 214 с.
17. Щепіна Н.Д. Паладійкомплексні хімічні модифікатори у визначенні металів електротермічним атомно-абсорбційним методом: Автореф. дис... канд. хім. наук: 02.00.02 / Н.Д. Щепіна; Харк. нац. ун-т ім. В.Н.Каразіна. – Харків, 2006. – 19 с.
18. Аналитическая химия металлов платиновой группы: Сборник обзорных статей / Сост и ред. Ю.А. Золотов, Г.М. Варшал, В.М. Иванов. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 592 с.
19. Дерффель К. Статистика в аналитической химии / К. Дерффель. – М.: Мир, 1994. – 268 с.
20. Комплекс палладия $[Pd(NO_3)_2(OH)_2]$ / В.С. Шмидт, Н.А. Шорохов, А.А. Вашман, В.Е. Самсонов // Журн. неорг. химии. – 1982. – Т. 27. – С. 703–705.
21. ГОСТ 26929-94. Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов. – Минск: Изд-во стандартов, 1995. – 16 с.

Поступила в редакцию 04.06.2016 г.

THE COMPARATIVE ESTIMATION OF CHEMICAL MODIFIERS EFFICIENCY DURING TRACE MOLYBDENUM ATOMIC ABSORPTION DETERMINATION

A.S. Alemasova, N.D. Shchepina

The comparative estimation of palladium-complex modifiers efficiency (palladium(II) complex with xylenol orange and chromeazurol S) during ETAAS molybdenum background quantity determination in high salted matrixes and juices was investigated.

Keywords: electrothermal atomic absorption spectrometry; molybdenum; palladium-complex modifiers.

Алемасова Антонина Сергеевна

Доктор химических наук, профессор,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
г. Донецк, ул. Щорса, 17а
E-mail: alemasovaa@gmail.com
Тел: +38-093-983-56-15

Alemasova Antonina Sergeevna

Doctor of Chemical Sciences, Full Professor,
Donetsk National University, Donetsk

Щепина Наталья Дмитриевна

Кандидат химических наук, доцент,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
г. Донецк, ул. Щорса, 17а
E-mail: shnatalina@mail.ru
Тел.: +38-093-983-56-15

Shchepina Natalya Dmitrievna

Candidate of Chemical Sciences, Docent,
Donetsk National University, Donetsk

СИНТЕЗ РИБОЗИЛЬНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ИМИДАЗО[4,5-*b*]- И [4,5-*c*]-ПИРИДИНОВ

© 2016. *Д.А. Ломов, М.Г. Абрамянц*

Синтезирован ряд производных β -D-рибофуранозилимидазопиридинов, перспективных как потенциальные противовирусные и противоопухолевые средства. Показано, что данные соединения образуются с удовлетворительными выходами при сплавлении соответствующих азотистых оснований с тетраацетилрибозой и последующим сольволизом под действием метанольного раствора аммиака.

Ключевые слова: синтез; рибоза; имидазо[4,5-*b*]пиридин; имидазо[4,5-*c*]пиридин; противораковая активность.

Введение. Производные имидазо[4,5-*b*]пиридина, которые являются наиболее близкими структурными аналогами пурина, привлекают внимание исследователей уже достаточно давно. Анализ новых литературных и патентных данных свидетельствует о том, что соединения данного класса проявляют широкий спектр биологической активности [1].

Имидазо[4,5-*b*]пиридины используются для создания фармацевтических композиций, которые применяются для лечения язвенной болезни (препараты «Сулмазол» и «Тенатопрозол») [2]. Кроме этого, производные имидазо[4,5-*b*]пиридина проявляют противовирусную, антимикробную, антисекреторную активность, а также являются антагонистами ангиотензина II [3]. Интерес к соединениям такого рода обусловлен тем, что некоторые антагонисты ангиотензина II относятся к числу наиболее активных антигипертензивных средств.

Цитостатическая активность производных имидазопиридинов впервые была показана на примере 7-аминоимидазо[4,5-*b*]пиридина в 1948 г. [4]. В дальнейшем было обнаружено значительное количество производных этого гетероцикла с противоопухолевой активностью [1, 3]. На сегодняшний день это направление исследований динамично развивается, о чем свидетельствует непрерывно растущее количество патентов, посвященных данной проблеме [5–13].

Противоопухолевый эффект аналогов структурных элементов нуклеиновых кислот, как азотистых оснований, так и нуклеозидов, основывается на возможности включения их в ДНК. Такой процесс может проходить, если антиметаболиты являются субстратами для ДНК и РНК-полимеразы, которые используют их в виде трифосфатов соответствующих дезоксирибозидов или рибозидов [14].

Как антиметаболиты пуриновых оснований в онкологии достаточно давно используются «6-Меркаптопурин» и «Тиогуанин» [15], которые нашли применение в лечении острых и хронических миелолейкозов, ретикулезов, острых лимфобластных лейкозов. Позднее в клиническую практику был введен препарат «Флударабин» (β -рибофуранозид 4-флуороаденина) [16], который используется для лечения лимфолейкозов и неходжкинских лимфом.

Постановка задачи. Учитывая структурную схожесть производных пурина и производных имидазо[4,5-*b*]- и имидазо[4,5-*c*]пиридина, можно сделать вывод о близости их биологических свойств. Об этом свидетельствуют многочисленные литературные данные, подтверждая тот факт, что подавляющее большинство синтезированных производных β -D-рибофуранозилимидазо[4,5-*b*]- и имидазо[4,5-

c]пиридина в той или иной мере проявляют цитостатическую активность [17–19]. Исключением являются только 1- β -D-рибофуранозилимидазо[4,5-*c*]пиридин и 7-нитро-3- β -D-рибофуранозилимидазо[4,5-*b*]пиридин, которые не проявляют ни цитостатической, ни противовирусной активности [20]. Учитывая вышесказанное, синтез новых рибонуклеозидов производных имидазо[4,5-*b*]- и имидазо[4,5-*c*]пиридина для поиска новых противоопухолевых и антивирусных средств является актуальным.

Построение решения задачи. Из методов рибозилирования, которые описаны в литературе, нами выбран наиболее простой и удобный способ [21]: при нагревании синтезированных нами 4-арил(гетарил)имидазо[4,5-*c*]пиридинов [22] (**1 а-д**) с тетраацетилрибозой (**2**) в мольном соотношении 1:1,5 в присутствии каталитических количеств *n*-толуолсульфокислоты (моногидрата) без растворителя были получены триацетил- β -D-рибофуранозиды 4-арил(гетарил)имидазо[4,5-*c*]пиридинов (**3 а-д**) с выходами 35–50 %.

Анализ результатов. Структура синтезированных триацетилнуклеозидов (**3 а-д**) подтверждена данными ЯМР ^1H спектров, в которых, кроме сигналов протонов азотистого основания, присутствуют сигналы протонов углеводного фрагмента (дублет в области 4,94–6,02 м.д., мультиплеты в области 3,77–4,04 м.д., 5,05–5,29 м.д., 5,11–5,37 м.д. и 5,37–5,64 м.д.), а также синглеты протонов трех метильных групп ацетильных остатков в области 2,09–2,17 м.д. Характер сигналов (химсдвиги, мультиплетность) соответствует триацетил- β -D-рибофуранозе, что указывает на сохранение β -D-аномерной конфигурации в соединениях (**3 а-д**).

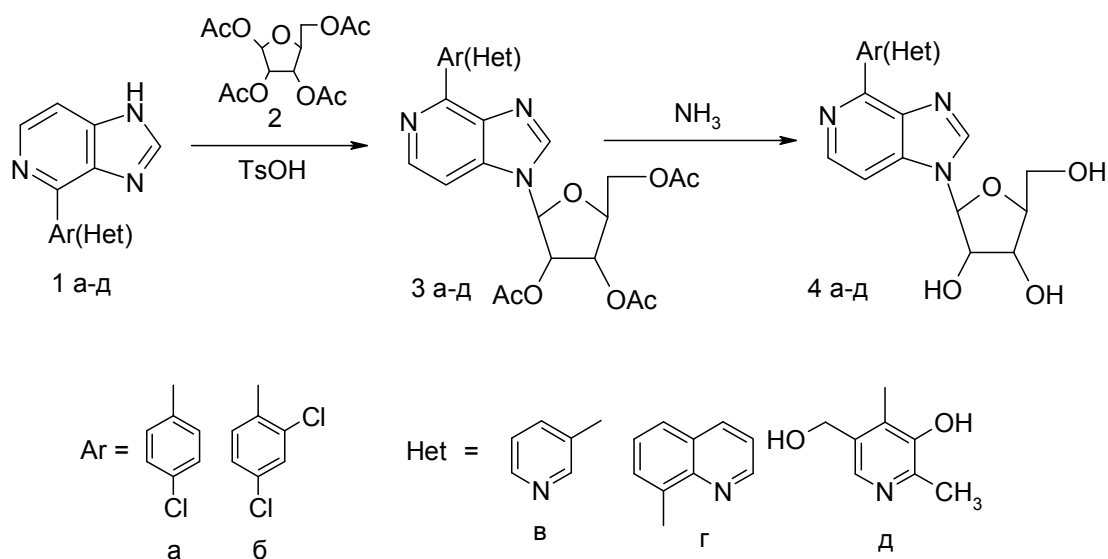


Рис. 1

Синтезированные триацетилпроизводные нуклеозидов (**3 а-д**) выдерживали в насыщенном метанольном растворе аммиака при комнатной температуре в течение 24 ч. После отгонки растворителя и перекристаллизации остатка, выделяли β -D-рибофуранозиды 4-арил(гетарил)имидазо[4,5-*c*]пиридинов (**4 а-д**) с выходами 45–55 %. ЯМР ^1H спектры полученных соединений содержат характерные сигналы протонов азотистого основания и углеводной части молекулы, а также наблюдается исчезновение сигналов протонов метильных групп ацетильных остатков, что однозначно доказывает их строение.

Рибозилирование 5-метил-6-бромимидазо[4,5-*b*]пиридина (**5**) проводили, как описано выше для производных 4-арил(гетарил)имидазо[4,5-*c*]пиридина (**1 а-д**): кратковременное нагревание соединения (**5**) с тетраацетилрибозой (**2**) в мольном соотношении 1:1,5 в присутствии каталитических количеств моногидрата *n*-толуолсульфокислоты приводит к триацетил- β -D-рибофуранозиду 5-метил-6-бромимидазо [4,5-*b*]пиридина (**6**) с выходом 45 %.

В ЯМР ^1H спектре соединения (**6**), кроме сигналов протонов азотистого основания, наблюдаются характерные сигналы протонов углеводной части молекулы (мультиплеты в области 3,94–4,10 м.д., 5,09–5,19 м.д., 5,20–5,22 м.д. и 5,53–5,55 м.д.), а также синглеты протонов трех метильных групп ацетильных остатков в области 2,12–2,19 м.д.

Синтезированное триацетилпроизводное нуклеозида (**6**) выдерживали в насыщенном метанольном растворе аммиака при комнатной температуре в течение 24 ч. После отгонки растворителя и перекристаллизации остатка, выделяли β -D-рибофуранозид 5-метил-6-бромимидазо[4,5-*b*]пиридина (**7**) с выходом 48 %.

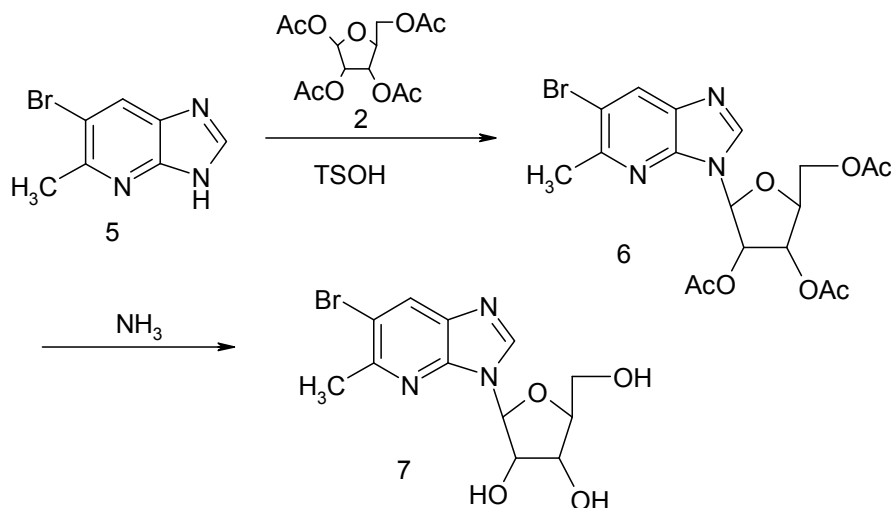


Рис. 2

В ЯМР ^1H спектре рибофуранозида (**7**) присутствуют сигналы протонов азотистого основания и углеводной части молекулы, а сигналы протонов метильных групп ацетильных остатков отсутствуют.

Таким образом, нами синтезирован ряд производных β -D-рибофуранозилимидазопиридинов, которые являются перспективными как потенциальные противовирусные и противоопухолевые средства. Показано, что данные производные образуются с удовлетворительными выходами при сплавлении соответствующих азотистых оснований с тетраацетилрибозой и дальнейшем их сольволизе под действием метанольного раствора аммиака.

Экспериментальная часть. Спектры ЯМР ^1H записывали на спектрометре Bruker Avance II 400 с рабочей частотой 400 МГц, внутренний стандарт – ТМС. Контроль чистоты и индивидуальности полученных соединений осуществляли методом ТСХ на пластинах Silufol UV-254, элюенты - метанол - хлороформ, 1:10, проявление парами иода или в УФ свете. Исходные 4-арил(гетарил)имидазо[4,5-*c*]пиридины (**1 а-д**) получены по методу, описанному в работе [22]. 5-Метил-6-бромимидазо[4,5-*b*]пиридин синтезирован согласно данным [1].

Общая методика синтеза 1,3,4,5-тетраацетил- β -D-рибофуранозидов 4-арил(гетарил)имидазо[4,5-с]пиридинов (3 а-д). Смесь 2.9 ммоль соединений (1 а-д), 4.35 ммоль 1,3,4,5-тетраацетил- β -D-рибофуранозы (2) и 43 мг *n*-толуолсульфокислоты (моногидрата) нагревали 2 ч при 160–165 °С под пониженным давлением. По окончании реакции плав темного цвета измельчали, растворяли в 8–10 мл хлороформа и фильтровали. Фильтрат упаривали досуха. Остаток перекристаллизовывали из воды.

3-(1,3,4-Триацетил- β -D-рибофуранозил)-7-(4-хлорфенил)имидазо[4,5-с]пиридин (3а). Выход 50 %, $T_{пл}$ 123 – 125 °С. Спектр ЯМР ^1H ($CDCl_3$), δ , м.д.: 2.08 с (3H, CH_2COOCH_3); 2.12 с (3H, 3- $CHCOOCH_3$); 2.14 с (3H, 4- $CHCOOCH_3$); 3.77 – 3.93 м (2H, CH_2COOCH_3); 5.03 – 5.07 м (1H, $H^{2''}$); 5.11 – 5.15 м (1H, $H^{3''}$); 5.35 – 5.39 м (1H, $H^{4''}$); 5.94 д (1H, $H^{5''}$, J 4.0 Гц); 7.50 д (1H, H^7 , J 4.8 Гц); 7.67 д (2H, $H^{3',5'}$, J 8.4 Гц); 8.37 с (1H, H^2); 8.41 д (2H, $H^{2',6'}$, J 8.4 Гц); 8.52 д (1H, H^6 , J 4.8 Гц).

3-(1,3,4-Триацетил- β -D-рибофуранозил)-7-(2,4-дихлорфенил)имидазо[4,5-с]пиридин (3б). Выход 42 %, $T_{пл}$ 137 – 139 °С. Спектр ЯМР ^1H ($CDCl_3$), δ , м.д.: 2.09 с (3H, CH_2COOCH_3); 2.11 с (3H, 3- $CHCOOCH_3$); 2.14 с (3H, 4- $CHCOOCH_3$); 3.83 – 3.97 м (2H, CH_2COOCH_3); 5.05 – 5.09 м (1H, $H^{2''}$); 5.13 – 5.16 м (1H, $H^{3''}$); 5.37 – 5.41 м (1H, $H^{4''}$); 5.92 д (1H, $H^{5''}$, J 4.0 Гц); 7.46 д (1H, $H^{5'}$, J 7.4 Гц); 7.63 д (1H, $H^{6'}$, J 7.2 Гц); $H^{5'}$, $H^{6'}$; 7.71 с (1H, $H^{3'}$); 7.77 д (1H, H^7 , J 5.5 Гц); 8.39 с (1H, H^2); 8.42 д (1H, H^6 , J 5.5 Гц).

3-(1,3,4-Триацетил- β -D-рибофуранозил)-7-(пиридин-3-ил)имидазо[4,5-с]пиридин (3в). Выход 40 %, $T_{пл}$ 175 – 177 °С. Спектр ЯМР ^1H ($CDCl_3$), δ , м.д.: 2.12 с (3H, CH_2COOCH_3); 2.15 с (3H, 3- $CHCOOCH_3$); 2.17 с (3H, 4- $CHCOOCH_3$); 3.87 – 4.02 м (2H, CH_2COOCH_3); 5.15 – 5.18 м (1H, $H^{2''}$); 5.21 – 5.29 м (1H, $H^{3''}$); 5.43 – 5.48 м (1H, $H^{4''}$); 5.97 д (1H, $H^{5''}$, J 4.0 Гц); 7.61 т (1H, H^5); 7.58 д (1H, H^7 , J 5.6 Гц); 8.55 д (1H, H^6 , J 5.6 Гц); 8.59 с (1H, H^2); 8.74 д (1H, H^4 , J 7.2 Гц); 9.11 д (1H, $H^{6'}$, J 7.2 Гц); 9.87 с (1H, H^2).

3-(1,3,4-Триацетил- β -D-рибофуранозил)-7-(хинолин-8-ил)имидазо[4,5-с]пиридин (3г). Выход 45 %, $T_{пл}$ 184 – 186 °С. Спектр ЯМР ^1H ($CDCl_3$), δ , м.д.: 2.13 с (3H, CH_2COOCH_3); 2.17 с (3H, 3- $CHCOOCH_3$); 2.18 с (3H, 4- $CHCOOCH_3$); 3.89 – 4.04 м (2H, CH_2COOCH_3); 5.16 – 5.22 м (1H, $H^{2''}$); 5.27 – 5.33 м (1H, $H^{3''}$); 5.44 – 5.50 м (1H, $H^{4''}$); 5.95 д (1H, $H^{5''}$, J 4.0 Гц); 7.73 с (1H, $H^{6'}$); 7.96 д (1H, H^7 , J 7.5 Гц); 8.23 – 8.26 м (2H, $H^{4',5'}$); 8.51 д (1H, H^7 , J 7.6 Гц); 8.68 с (1H, H^2); 8.74 – 9.05 м (2H, $H^{2',3'}$); 9.83 д (1H, H^6 , J 7.6 Гц).

3-(1,3,4-Триацетил- β -D-рибофуранозил)-7-пиридоксилимидазо[4,5-с]пиридин (3д). Выход 35 %, $T_{пл}$ 187 – 189 °С. Спектр ЯМР ^1H ($CDCl_3$), δ , м.д.: 2.14 с (3H, CH_2COOCH_3); 2.16 с (3H, 3- $CHCOOCH_3$); 2.17 с (3H, 4- $CHCOOCH_3$); 2.22 с (3H, CH_3); 3.85 – 4.01 м (2H, CH_2COOCH_3); 4.46 – 4.58 к (2H, $-CH_2-$); 5.23 – 5.29 м (1H, $H^{2''}$); 5.31 – 5.17 м (1H, $H^{3''}$); 5.41 – 5.64 м (1H, $H^{4''}$); 6.02 д (1H, $H^{5''}$, J 4.0 Гц); 7.53 с (1H, $H^{5'}$); 7.57 д (1H, H^7 , J 4.8 Гц); 7.82 с (1H, H^2); 8.51 д (1H, H^6 , J 4.8 Гц).

Общая методика синтеза β -D-рибофуранозидов 4-арил(гетарил)имидазо[4,5-с]пиридина (4 а-д). 1.0 Ммоль триацетилпроизводного (3 а-д) растворяли в 10 мл метанола, насыщенного аммиаком. Прозрачный раствор оставляли при комнатной температуре на сутки. По окончании этого времени растворитель отгоняли. Остаток перекристаллизовывали из воды с активированным углем.

3-(β -D-Рибофуранозил)-7-(4-хлорфенил)имидазо[4,5-с]пиридин (4а). Выход 55 %, $T_{пл}$ 150 – 152 °С. Спектр ЯМР ^1H ($DMCO-d_6$), δ , м.д.: 3.66 – 3.75 м (2H, $-CH_2OH$); 4.06 с (1H, $-CH_2OH$); 4.28 с (1H, $H^{2''}$); 4.95 с (1H, $H^{4''}$); 5.12 д (1H, $H^{3''}$, J 4.0 Гц); 5.74 д (1H, $H^{5''}$, J 4.0 Гц); 7.65 д (2H, $H^{3',5'}$, J 8.4 Гц); 8.39 с (1H, H^2); 8.44 д (2H, $H^{2',6'}$, J 8.4 Гц); 7.53 д (1H, H^7 , J 4.8 Гц); 8.52 д (1H, H^6 , J 4.8 Гц).

3-(β-D-Рибофуранозил)-7-(2,4-дихлорфенил)имидазо[4,5-с]пиридин (4б).

Выход 47 %, $T_{пл}$ 202 – 204 °С. Спектр ЯМР ^1H (ДМСО- d_6), δ , м.д.: 3.68–3.73 м (2H, -CH₂OH); 4.08 с (1H, -CH₂OH); 4.32 с (1H, H^{2''}); 4.98 с (1H, H^{4''}); 5.14 д (1H, H^{3''} J 4.0 Гц); 5.81 д (1H, H^{5''} J 4.0 Гц); 7.50 д (1H, H^{5'}, J 7.4 Гц); 7.67 д (1H, H^{6'}, J 7.2 Гц); 7.75 с (1H, H^{3'}); 7.81 д (1H, H^{7'}, J 5.5 Гц); 8.41 с (1H, H²); 8.48 д (1H, H⁶, J 5.5 Гц).

3-(β-D-Рибофуранозил)-7-(3-пиридил)имидазо[4,5-с]пиридин (4в). Выход 45 %, $T_{пл}$ 182–184 °С. Спектр ЯМР ^1H (ДМСО- d_6), δ , м.д.: 3.71–3.76 м (2H, -CH₂OH); 4.10 с (1H, -CH₂OH); 4.33 с (1H, H^{2''}); 4.98 с (1H, H^{4''}); 5.16 д (1H, H^{3''} J 4.0 Гц); 5.87 д (1H, H^{5''} J 4.0 Гц); 7.60 т (1H, H^{5'}); 7.71 д (1H, H^{7'}, J 5.6 Гц); 8.57 д (1H, H⁶, J 5.6 Гц); 8.59 с (1H, H²); 8.72 д (1H, H^{4'}, J 7.2 Гц); 9.03 д (1H, H^{6'}, J 7.2 Гц); 9.90 с (1H, H^{2'}).

3-(β-D-Рибофуранозил)-7-(8-хинолил)имидазо[4,5-с]пиридин (4г). Выход 50 %, $T_{пл}$ 168 – 170 °С. Спектр ЯМР ^1H (ДМСО- d_6), δ , м.д.: 3.74–3.79 м (2H, -CH₂OH); 4.14 с (1H, -CH₂OH); 4.37 с (1H, H^{2''}); 4.96 с (1H, H^{4''}); 5.22 д (1H, H^{3''} J 4.0 Гц); 5.77 д (1H, H^{5''} J 4.0 Гц); 7.75–7.85 м (1H, H^{6'}); 7.97 д (1H, H^{7'}, J 7.5 Гц); 8.24–8.28 м (2H, H^{4',5'}); 8.55 д (1H, H⁷, J 7.6 Гц); 8.77 с (1H, H²); 8.80–9.15 м (2H, H^{2',3'}); 9.85 д (1H, H⁶, J 7.6 Гц).

3-(β-D-Рибофуранозил)-7-(пиридоксил)имидазо[4,5-с]пиридин (4д). Выход 52 %, $T_{пл}$ 198–200 °С. Спектр ЯМР ^1H (ДМСО- d_6), δ , м.д.: 2.23 с (3H, CH₃); 3.62–3.69 м (2H, -CH₂OH); 4.12 с (1H, -CH₂OH); 4.30 с (1H, H^{2''}); 4.53–4.66 к (2H, -CH₂-); 4.89 с (1H, H^{4''}); 5.12 д (1H, H^{3''} J 4.0 Гц); 5.94 д (1H, H^{5''} J 4.0 Гц); 7.42 с (1H, H^{5'}); 7.53 д (1H, H^{7'}, J 4.8 Гц); 7.90 с (1H, H²); 8.57 д (1H, H⁶, J 4.8 Гц).

3-(1,3,4-Триацетил-β-D-рибофуранозил)-5-метил-6-бромимидазо[4,5-б]пиридин (6). Смесь 2.9 ммоль 5-метил-6-бромимидазо[4,5-б]пиридина (5), 4.35 ммоль 1,3,4,5-тетраацетил-β-D-рибофуранозы (2) и 43 мг *n*-толуолсульфокислоты (моногидрат) нагревали 2 ч при 160–165 °С под пониженным давлением. По окончании реакции плав темного цвета измельчали, растворяли в 8–10 мл хлороформа и профильтровывали. Фильтрат упаривали досуха. Остаток перекристаллизовывали из воды. Выход 45 %, $T_{пл}$ 150–152 °С. Спектр ЯМР ^1H (CDCl₃), δ , м.д.: 2.12 с (3H, CH₂COOCH₃); 2.15 с (3H, 3-CH₃COOCH₃); 2.15 с (3H, 4-CH₃COOCH₃); 2.19 с (3H, CH₃); 3.94 – 4.10 м (2H, CH₂COOCH₃); 5.09–5.11 м (1H, H^{2''}); 5.19 – 5.22 м (1H, H^{3''}); 5.53–5.55 м (1H, H^{4''}); 6.09 д (1H, H^{5''} J 4.0 Гц); 8.23 с (1H, H^{7'}); 8.35 с (1H, H²).

3-(β-D-Рибофуранозил)-5-метил-6-бромимидазо[4,5-б]пиридин (7). 1.0 Ммоль 3-(1,3,4-триацетил-β-D-рибофуранозил)-5-метил-6-бромимидазо[4,5-б]пиридина (6) растворяли в 10 мл метанола, насыщенного аммиаком. Прозрачный раствор оставляли при комнатной температуре на сутки. По окончании этого времени растворитель отгоняли. Остаток перекристаллизовывали из воды с активированным углем. Выход 48 %, $T_{пл}$ 182–184 °С. Спектр ЯМР ^1H (ДМСО- d_6), δ , м.д.: 2.71 с (3H, CH₃); 3.64–3.76 м (2H, -CH₂OH); 4.08 с (1H, -CH₂OH); 4.27 с (1H, H^{2''}); 4.97 с (1H, H^{4''}); 5.15–5.21 к (2H, -CH₂-); 5.79 д (1H, H^{3''} J 4.0 Гц); 8.38 с (1H, H^{7'}); 8.65 с (1H, H²).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухряков К.В. Методы получения производных имидазо[4,5-б]пиридинов / К.В. Бухряков, А.В. Куркин, М.А. Юровская // Химия гетероцикл. соединений. – 2011. – № 5. – С. 646–676.
2. Scarpignato C. Review article: the opportunities and benefits of extended acid suppression / C. Scarpignato, I. Pelosini // Alimentary Pharmacology & Therapeutics. – 2006. – Vol. 23. – P. 23–34.
3. Yutilov, Yu.M. Imidazopyridines: 1-and 3-Deazapyridines / Yu.M. Yutilov; ed. A.R. Katritzky // Adv. Heterocyclic Chem. – Acad. Press. – 2005. – Vol. 89. – P. 161–270.
4. Kogl F. Uber 1-Des-Azaadenin (7-Amino-1-imidazo[4,5-b]pyridin). 1. Mitteilung uber Desazapyrin Derivate / F. Kogl, G.M. Van der Want, C.A. Saleminck // Rec. Trav. Chim. Pays-Bas. – 1948. – Vol. 67. – P. 29–36.

5. US Patent № 0281865. C07D 471/04. Novel 3,5-disubstituted-3H-imidazo[4,5-b]pyridine and 3,5-disubstituted-3H-[1,2,3]triazolo[4,5-b]pyridine compounds as modulators of protein kinases / M. Muthuppalaniappan (IN), H. Viswanadha (US), G. Babu (US), S.K.V.S. Vakkalanka (CH); Rhizen Pharmaceuticals SA (CH), Incozen Therapeutics Pvt. Ltd. (IN). – № 13/108542; Filed. 16.05.2011; Publ. 17.11.2011. – 156 p.
6. US Patent № 7714138. C07D 211/72. Monocyclic heterocycles as kinase inhibitors [Electronic resource] / R.M. Borzilleri (PA), L.A.M. Cornelius (NJ), R.J. Schmidt (NJ), G.M. Schroeder (NJ), K.S. Kim (NJ); Bristol-Myers Squibb Company (NJ). – № 12/253491; Filed. 17.10.2008; Publ. 11.05.2010. – 148 p.
7. US Patent № 7846929. C07D 413/14. Phosphoinositide 3-kinase inhibitor compounds and methods of use [Electronic resource] / A. Folkes, S. Shuttleworth, S. Oxenford, T. Hancox, T. Bayliss (GB), G. Castanedo, R. Goldsmith, J. Gunzner, T. Heffron, K. Malesky, S. Mathieu, A. Olivero, D.P. Sutherlin, V. Tsui, S. Wang, C. Wiesmann, B. Zhu, J. Dotson (CA); Genentech, Inc. (CA); Piramed Limited (GB). – № 11/789427; Filed. 24.04.2007; Publ. 07.12.2010. – 151 p.
8. US Patent № 7989477. A61K 31/44. Monocyclic heterocycles as kinase inhibitors [Electronic resource] / R.M. Borzilleri (PA), L.A.M. Cornelius, R.J. Schmidt, G.M. Schroeder, K.S. Kim (NJ); Bristol-Myers Squibb Company (NJ). – № 12/727534; Filed. 19.03.2010; Publ. 02.08.2011. – 144 p.
9. US Patent № 8071614. C07D 491/02. Bicyclic heterocyclic compounds as protein tyrosine kinase inhibitors [Electronic resource] / G. Saxty, V. Berdini, C.W. Murray, C.M. Griffiths-Jones, E. Vickerstaffe, G.E. Besong (GB); Astex Therapeutics Limited (GB). – № 12/682478; Filed. 10.10.2008; Publ. 06.12.2011. – 154 p.
10. US Patent № 8076354. C07D 498/02. Bicyclic heterocyclic compounds as protein tyrosine kinase inhibitors [Electronic resource] / G. Saxty, V. Berdini, C.W. Murray, C.M. Griffiths-Jones, E. Vickerstaffe, G.E. Besong, M.G. Carr (GB); Astex Therapeutics Limited (GB). – № 12/682508; Filed. 10.10.2008; Publ. 13.12.2011. – 150 p.
11. US Patent № 8163750. C07D 498/02. Fluorene derivatives, compositions containing the same and use thereof as inhibitors of the protein chaperone HSP 90 [Electronic resource] / F. Thompson, P. Mailliet, J.-M. Ruxer, H. Goulaouic, F. Vallee, H. Minoux, F. Pilorge, L. Bertin, S. Hourcade (FR), M. Mendez-Perez, P. Hamley (DE); Sanofi-Aventis (FR). – № 12/625005; Filed. 24.11.2009; Publ. 24.04.2012. – 143 p.
12. US Patent № 8178668. C07D 401/14. 2-Aminopyridine kinase inhibitors [Electronic resource] / A.G. Steinig, M.J. Mulvihill, J. Wang, D.S. Werner, Q. Weng (NY), H. Coate (CA), X. Chen (NY); OSI Pharmaceuticals, LLC (NY). – № 12/365325; Filed. 04.02.2009; Publ. 15.05.2012. – 157 p.
13. US Patent N 8288425. A61K 31/4184. Benzimidazoles / M.L. Edwards, P.J. Cox, S. Amendola (NJ), S.D. Deprets (FR), T.A. Gillespy (NJ), C.D. Edlin, A.D. Morley (GB), C.J. Gardner, B. Pedgrift (NJ), H. Bouchard, D. Babin, L. Gauzy, A. Le-Brun (FR), T.N. Majid (NJ), J.C. Reader, L.J. Payne, N.M. Khan, M. Cherry (GB); Aventis Pharmaceuticals Inc. (NJ). – № 11/029064; Filed. 04.01.2005; Publ. 16.10.2012. – 160 p.
14. Химиотерапия злокачественных опухолей / Под. ред Н.Н. Блохина. – М.: Медицина, 1977. – 320 с.
15. Машковский М.Д. Лекарственные средства: в 2 т. Т. 2. 14-е изд. / М.Д. Машковский. – М.: ООО Издательство Новая волна, 2002 – С. 423 – 424.
16. Pharmaceutical Manufacturing Encyclopedia: comp 4 vol. Vol. 2. 3-rd ed. – NY.: William Andrew Publishing, 2007 – 1639 p.
17. Naus P. Cytostatic and Antiviral 6-Arylpyrine Ribonucleosides. IX. Synthesis and evaluation of 6-Substituted 3-Deazapurine Ribonucleosides / P. Naus, M. Kuchar, M. Hock // Collect. Czech. Chem. Commun. – 2008. – Vol. 73, No 5. – P. 665–668.
18. Миникер Т.Д. Аза- и дезааналоги пуриновых нуклеозидов / Т.Д. Миникер, М.Н. Преображенская // Химия гетероцикл. соединений. – 1981. – № 2. – С. 147–161.
19. Studies of the Chemical Synthesis of Potential Antimetabolites. 30. Regioselective Introduction of a Chlorine Atom into the Imidazo[4,5-b]pyridines Nucleus [Text] / T. Itoh, K. Ono, T. Sugawara [et al.] // J. Het. Chem. – 1982. – Vol. 19. – P. 513–517.
20. Jain P.C. Potential Purine Antagonists: Part IV – Synthesis of N-β-D-Ribofuranosides of Substituted Imidazo(b)- & Imidazo(c)pyridines / P.C. Jain, S.K. Chatterjee, N. Anand // Indian J. Chem. – 1963. – Vol. 1, No 1. – P. 30–35.
21. Itoh T. Synthetic Studies of Potential Antimetabolites. XIII. Synthesis of 7-Amino-3-β-D-Ribofuranosyl-3H-imidazo[4,5-b]pyridines (1-Deazaadenosine) and Related Nucleosides [Text] / T. Itoh, S. Kitano, Y. Mizuno // J. Het. Chem. – 1972. – Vol. 9. – P. 465–470.
22. Дегидрирование 4-арил(гетарил)производных спинацина диметилсульфоксидом / Д.А. Ломов, М.Г. Абрамянц, Н.В. Асташкина, [и др.] // Журн. орган. химии. – 2014. – Т. 50, вып. 7. – С. 1055–1058.

Поступила в редакцию 06.07.2016 г.

SYNTHESIS OF RIBOFURANOSYL DERIVATIVES IMIDAZO[4,5-*b*]- AND [4,5-*c*]-PYRIDINES

D.A. Lomov, M.G. Abramyants

A new series of β -D-ribofuranozylimidazopyridines derivatives as potent antiviral and antitumor drugs was synthesized. These compounds were reported to make with medium yield by heating corresponding nitrogenous bases with tetraacetylribofuranoze and following solvolysis by methanol solution of ammonia.

Keywords: Synthesis, ribose, imidazo[4,5-*b*]pyridine, imidazo[4,5-*c*]pyridine, anticancer activity.

Ломов Дмитрий Александрович

кандидат химических наук, ГОУ ВПО Донецкий национальный университет, доцент кафедры органической химии;
283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24;
ГУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко», г. Донецк, научный сотрудник,
283114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 70
E-mail: lomov_dmitrii@mail.ru

Lomov Dmitrii Aleksandrovich

Candidate of Chemical Sciences, Donetsk National University, Donetsk, Associate Professor;
L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry, Donetsk
283114, Donetsk, R. Luxemburg str., 70

Абрамянц Маргарита Григорьевна

кандидат химических наук, ГУ «Институт физико-органической химии и углехимии им. Л.М. Литвиненко», г. Донецк, научный сотрудник,
283114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 70.

Abramyants Margarita Grigorievna

Candidate of Chemical Sciences,
L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry, Donetsk, Research Officer
283114, Donetsk, R. Luxemburg str., 70

УДК543.421

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ АТОМНО-АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

© 2016. *И.Г. Шептун, Н.П. Дмитрук*

Разработана методика определения размера наночастиц оксида ванадия(IV) электротермическим атомно-абсорбционным методом, основанная на различии кинетики атомизации истинных и коллоидных растворов в графитовом атомизаторе атомно-абсорбционного спектрометра и дающая возможность не только анализировать элементный состав коллоидных наночастиц, но и определять их размеры.

Ключевые слова: электротермическая атомно-абсорбционная спектрометрия; оксид ванадия; определение размера наночастиц.

Введение. С целью повышения физико-механических характеристик изделий, изготавливаемых из различных материалов (сплавы, графитовые изделия, пластмассы и др.), в процессе их получения в последнее время все шире применяются нанопорошки высокопрочных тугоплавких соединений (нитриды, карбонитриды, карбиды, оксиды, бориды и др.) [1]. Поскольку многие физические и химические свойства наночастиц, в отличие от объемных материалов, сильно зависят от их размера, в последние годы проявляется значительный интерес к методам измерения размеров наночастиц в растворах. Для этого необходима разработка комплекса методов анализа для измерения параметров наночастиц. Измерение размеров нанообъектов является одним из направлений наноаналитической химии и осуществляется несколькими способами. К ним относятся просвечивающая электронная микроскопия – просвечивание образца пучком электронов с определением размера и внутренней структуры частиц [2]; растровая электронная микроскопия – сканирование поверхности образца пучком электронов с одновременной регистрацией вторичных электронов и получение объемного изображения [3]; сканирующая зондовая микроскопия – анализ с помощью зонда рельефа поверхности образца [4]; сканирующая туннельная микроскопия – анализ рельефа токопроводящих поверхностей путем фиксирования величины туннельного тока, возникающего между острием зонда и поверхностью образца [5]; атомно-силовая микроскопия – анализ рельефа и механических свойств поверхностей путем фиксирования величины Ван-дер-Ваальсовых сил, возникающих между острием зонда и поверхностью образца [6]; дифракционные методы исследования – дифракция излучения на кристаллической решетке образца с получением дифрактограммы и оценка размеров кристаллов по величине уширения дифракционных максимумов; седиментация – определение размера частиц по скорости их оседания. Измерения размеров наночастиц методом динамического светового рассеяния в золях, содержащих смесь частиц, отличающихся по размерам, могут привести к неправильным результатам; распределение по размерам мелких частиц при этом может остаться незарегистрированным. Измерения размеров наночастиц методом динамического светового рассеяния нужно дополнять оптическими измерениями [7]. При этом не всегда различные по принципам исследования методы дают сходные результаты, что и было показано в работе [8] при оценке ультратонкого порошка вольфрама указанными выше методами. Сложность определения размеров частиц порошков заключается еще и в том, что они склонны к агломерации. Применяются и другие методы определения размеров наночастиц, но как показал их анализ, ни один из них не дает точные размеры частиц. Кроме того, все перечисленные методы дают сведения о размере частиц, но не дают сведений о качественном составе наночастиц. Они также требуют достаточно дорогого оборудования.

При анализе жидкостей, содержащей металлы, необходимо определять не только качественный и количественный состав, но форму, в которой находится определяемый элемент. Например, необходимо определить, содержится ли в смеси аналит в виде наночастиц или ионов. Такие характеристические данные важны при исследовании токсикологического воздействия наноматериалов. Для их получения в Национальном институте стандартов и технологий США (NIST) развивают подход, основанный на совместном использовании анализатора ионной подвижности и масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой [9].

Предложен метод оценки размеров наночастиц золота, основанный на различии кинетики атомизации истинных и коллоидных растворов в графитовых печах атомно-абсорбционных спектрометров, дающий возможность не только анализировать элементный состав коллоидных наночастиц, но и определять их размеры [10].

Уже в течение нескольких последних десятилетий сохраняется большой интерес к структурам на основе диоксида ванадия. Уникальные свойства этого соединения открывают большой простор для научных исследований в области технологии наноматериалов, наноэлектроники, плазмоники, фотоники.

Целью работы была разработка методики определения размеров наночастиц оксида ванадия(IV) методом электротермической атомно-абсорбционной спектрометрии.

Основная часть. В работе использовали следующие реактивы: оксид ванадия(V) ч.д.а.; этанол; 96 %-й раствор серной кислоты ч.д.а.; сульфат аммония х.ч.; децилсульфат натрия х.ч.; ацетилацетон, свежеперегнанный фракция $t_{\text{кип}}=140\text{ }^{\circ}\text{C}$; *n*-бутанол свежеперегнанный, фракция $t_{\text{кип}}=117,4\text{ }^{\circ}\text{C}$; метаванадат аммония ч.д.а.

Синтез наночастиц диоксида ванадия проводили путем гидролиза ацетилацетоната ванадила, полученного из сульфата ванадила. Для синтеза сульфата ванадила в стакан поместили 5 г оксида ванадия(V), 12,5 мл дистиллированной воды, 25 мл этанола и 6 мл 96 %-го раствора серной кислоты. При этом цвет раствора изменялся от светло-желтого к светло-зеленому, а по окончании восстановления – до темно-синего. Раствор фильтровали, приливали 6 мл ацетилацетона, нейтрализовали 12 % раствором Na_2CO_3 до $\text{pH}=7$. Ацетилацетонат ванадила очищали перекристаллизацией из хлороформа.

С целью создания раствора, содержащего наночастицы оксида ванадия, готовили 0,01 М раствор ацетилацетоната ванадила в бутаноле, который затем резко впрыскивали с помощью стеклянного медицинского шприца в количестве 10 мл в раствор 20 мл бутанола, 300 мг децилсульфата натрия (SLS) и микроколичеств воды. Для получения наночастиц разных размеров при приготовлении исходных растворов было использовано разное количество дистиллированной воды (100 мкл, 50 мкл, 20 мкл). Каждый из растворов интенсивно перемешивался в течение 10 минут. Цвет каждого из растворов в зависимости от количества дистиллированной воды изменялся от желтого до бледно-зеленого.

Далее проводили анализ синтезированных наночастиц на просвечивающем электронном микроскопе JEM-200A фирмы “JEOL” при ускоряющем напряжении 200 кВ. Полученные фотографии, представленные на рис. 1, показали, что в результате гидролиза и дальнейшей поликонденсации в растворе бутанол/SLS/вода образуются сферические частицы $\text{V}_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Изменение размеров наночастиц в золе осуществляется за счет добавления различного количества дистиллированной воды. Увеличение концентрации воды в растворе приводит к тому, что большее количество молекул ацетилацетоната ванадила в растворе подвергается гидролизу. Таким образом, чем больше воды, тем быстрее идет нуклеация и больше зародышей образуется.

В результате, при добавлении 100 мкл воды образуются частицы со средним диаметром 30 нм (рис. 1, а) с однородным распределением по размерам, при добавлении 50 мкл воды – средний диаметр 65 нм (рис. 1, б). Добавление в раствор 30 мкл воды приводит к образованию более крупных частиц со средним диаметром 120 нм (рис. 1, в).

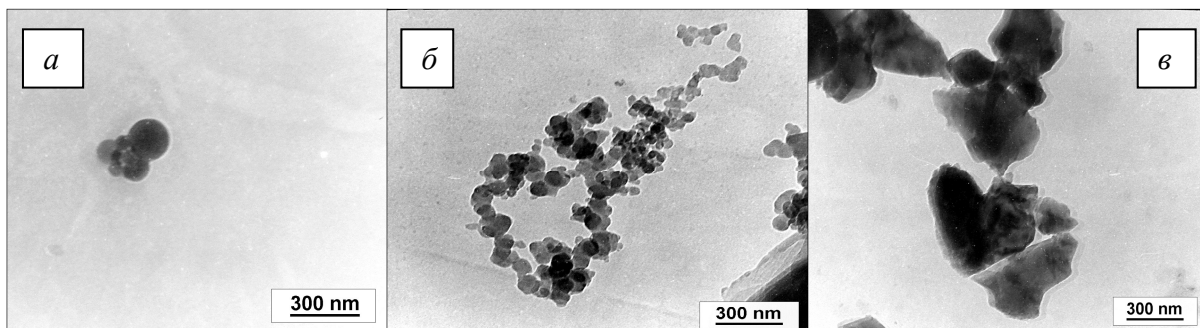


Рис. 1. Микрофотографии наночастиц оксида ванадия на просвечивающем электронном микроскопе

Зависимость кинетики испарения от размеров частиц подтверждается экспериментальными данными, полученными на одноклучевом атомно-абсорбционном спектрофотометре Сатурн-3 с дейтериевым корректором фона, с электротермическим атомизатором Графит-2. В качестве источника излучения использовалась лампа с полым катодом на ванадий. Ширина щели монохроматора 0,2 нм. В исследованиях использовались растворы коллоидного оксида ванадия(IV), полученные по методике, описанной выше. На резонансной линии ванадия 318,5 нм регистрировали абсорбционность растворов коллоидного оксида ванадия(IV) с помощью модуля связи, сопряженного с персональным компьютером. Программа нагрева графитовой печи была следующей: сушка при 150 °С – 20 с; пиролиз при 600 °С – 30 с; атомизация при 2600 °С – 7 с. Нами была получена зависимость времени максимума импульса абсорбции ванадия от размера частиц в полученном коллоидном растворе (рис. 2). Как видно из рис. 2, с увеличением размера наночастиц увеличивается время максимума импульса абсорбции ванадия.

Нами был моделирован процесс пиролиза раствора наночастиц оксида ванадия. Для этого раствор был упарен на электроплите и остаток прокален в муфельной печи при 600 °С. После этого проведен анализ остатка на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3. Дифрактограмма, приведенная на рис. 3, подтверждает образование V_2O_5 .

Наблюдаемые нами явления задержки времени атомизации, по-видимому, объясняются тем, что ванадий имеет следующий механизм атомизации (индекс «г» означает газообразную фазу):

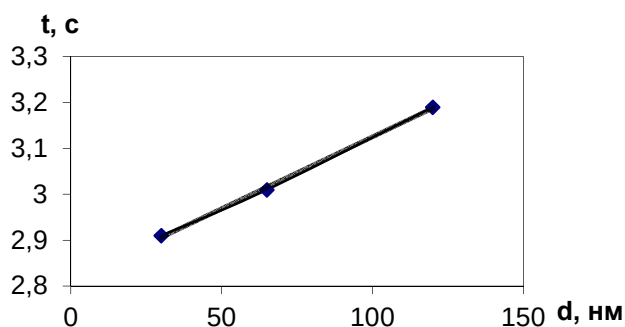
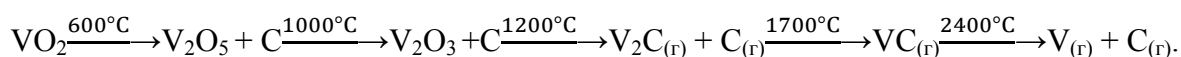


Рис. 2. Зависимость времени максимума импульса абсорбции (t) для растворов коллоидного оксида ванадия от размера (d) частиц

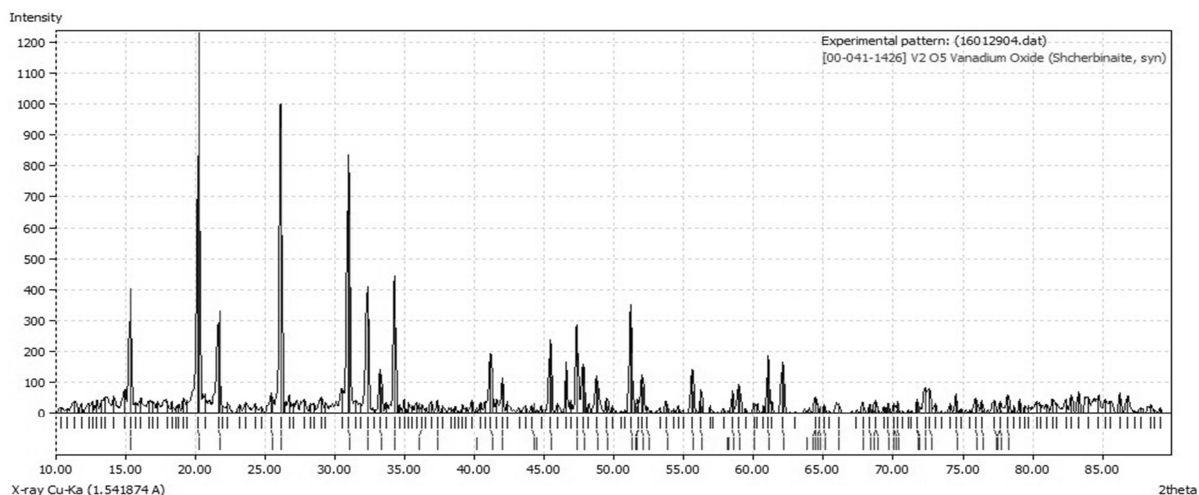


Рис. 3. Рентгенограмма прокаленного образца наночастиц оксида ванадия

Электротермический нагрев пробы в графитовом атомно-абсорбционном спектрометре проходит в несколько стадий: после испарения растворителя происходит атомизация ванадия. Кинетика процесса испарения зависит от структуры сухого остатка и состояния внутренней поверхности стенки графитового атомизатора, от возможного взаимодействия аналита с углеродом [11]. Если проба, введенная в атомизатор, представляет собой раствор ионов, то вещество образует монослой частиц определяемого элемента. В случае раствора, содержащего наночастицы, после удаления растворителя образуются нанокластеры. При испарении соединений аналита из нанокластера, образовавшегося на стенке печи, энергия активации больше, чем при испарении атомов из монослоя, поскольку для разрушения связей между атомами нанокластера требуется дополнительная энергия. В случае испарения с пористой поверхности возможно дополнительное возрастание энергии активации за счет взаимодействия коллоидной частицы с пористой поверхностью подложки.

Из этого следует, что с увеличением энергии активации возрастает время, необходимое для получения одной и той же доли испарившихся атомов. Следовательно, время запаздывания атомизации должно возрастать с увеличением размера частицы. Более строгое рассмотрение процессов испарения наночастиц может быть проведено с помощью методов молекулярной динамики [12]. Оно показывает, что кинетика испарения зависит не только от размеров и температуры частиц, но и от параметров окружающего их газа.

Выводы. Таким образом, разработана методика определения размера наночастиц оксида ванадия(IV) электротермическим атомно-абсорбционным методом, основанная на различии кинетики атомизации истинных и коллоидных растворов в графитовом атомизаторе атомно-абсорбционного спектрометра и дающая возможность не только анализировать элементный состав коллоидных наночастиц, но и определять их размеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крушенко Г.Г. Проблемы определения размеров наночастиц / Г.Г. Крушенко, С.Н. Решетникова // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2011. – Т. 35, №2. – С. 167-170.
2. Имамов Р.М. Просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения для решения задач кристаллографии наноматериалов / Р.М. Имамов, В.В. Клечковская, Е.И. Суворова // Кристаллография. – 2011. – Т. 56. – С. 698-710.

3. Алексенский А.Е. Применимость метода динамического светового рассеяния для определения размеров наночастиц в золях / А.Е. Алексенский, А.В. Швидченко, Е.Д. Эйдельман // Письма в Журнал технической физики. – 2012. – Т. 38, №23. – С. 1-10.
4. Андреюк Д.Г. Сканирующая зондовая микроскопия: современные тенденции метода / Д.Г. Андреюк, В.В. Быков // Наноиндустрия. – 2011. – Т. 27, № 3. – С. 36-39.
5. Долидчик Ф.И. Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия несовершенных и взаимодействующих наночастиц / Ф.И. Долидчик, Б.Р. Шуб // Российские нанотехнологии. – 2006. – Т. 1, № 1-2. – С. 82-96.
6. Атомно-силовая микроскопия в исследовании наноразмерных частиц / Т.А. Ларичев, Ф.В. Титов, К.А. Бодак и др. // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3. – С. 77-80.
7. Иванов С.А. Низковольтная растровая электронная микроскопия для исследования наноматериалов / С.А. Иванов // Наноиндустрия. – 2009. – № 4. – С. 66-71.
8. Пименова Н.В. Порошки вольфрама, полученные различными способами / Н.В. Пименова // Технология металлов. – 2011. – № 2. – С. 25–27.
9. Clinton F.J. In vitro assessments of nanomaterial toxicity / F.J. Clinton, W.G. David // Advanced Drug Delivery Reviews. – 2009. – Vol. 61. – P. 438–456.
10. Левин А.Д. Определение размеров наночастиц в коллоидных растворах при элементном анализе на электротермическом атомно-абсорбционном спектрометре / А.Д. Левин, Ю.М. Садагов, Л.Л. Короли // Измерительная техника. – 2011. – № 10. – С. 55-57.
11. Кацков Д.А. Исследование процесса испарения металлов In, Ga, Tl, Sn, Pb, Sb, Be, Se и Te с поверхности графита атомно-абсорбционным методом / Д.А. Кацков, И.Л. Гринштейн, Л.П. Кругликова // Журнал прикладной спектроскопии. – 1980. – Т. 23, № 5. – С. 804-812.
12. Gouriet K. Molecular Dynamics Study of Nanoparticle Evaporation and Condensation in a Gas / K. Gouriet, M. Sentisand, T.E. Itina // J. Phys. Chem. – 2009. – No 113. – P. 18462–18467.

Поступила в редакцию 06.07.2016 г.

DETERMINATION THE SIZE OF NANOPARTICLES BY ELECTROTHERMAL ATOMIC ABSORPTION SPECTROMETRY

I.G. Sheptun, N.D. Dmitruk

The technik of determination the size of vanadium (IV)oxide nanoparticles by electrothermal atomic absorption method elaborated, based on the difference in the kinetics of the atomization of true and colloidal solutions in graphite atomizer atomic absorption spectrometer and gives the opportunity not only to analyze the elemental composition of the colloidal nanoparticles, but also to determine their size.

Keywords: electrothermal atomic absorption spectrometry; vanadium oxide; determination of the size of the nanoparticles.

Шептун Иван Геннадьевич
Макеевский лицей №1 «Лидер»
E-mail: sheptun.ivan@mail.ru
Тел: +380636387326

Sheptun Ivan Gennadievich
Makeyevka Lyceum No 1 «Lider»

Дмитрук Наталья Петровна
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
г. Донецк, химический факультет, ул Щорса, 17а
E-mail: dmitrukната@mail.ru
Тел: +380939380392

Dmitruk Natalya Petrovna
Donetsk National University, Donetsk

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 579.68

ДИНАМИКА ФИЗИЧЕСКИХ И БАКТЕРИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОДЫ РЕКИ СЕВЕРСКИЙ ДОНЕЦ В 2010–2012 ГОДАХ

© 2016. *Е.В. Ветрова, О.О. Гринева*

На формирование состава и качества поверхностных вод большое влияние оказывают гидробионты, практическая деятельность человека, физические и химические факторы. Прослежена динамика сезонных изменений некоторых физических и бактериологических показателей воды поверхностного горизонта реки Северский Донец в районе с. Донецкое Славянского района за 2010–2012 гг. Изучены характеристики температуры, прозрачности, мутности, кислотности воды, общее микробное число, коли-индекс, процессы самоочищения речной воды. Выявлено соответствие изученных показателей воды классификации питьевого водоснабжения за три года.

Ключевые слова: прозрачность, мутность, кислотность, ОМЧ, ЛКП, самоочищение воды.

Введение. Основным источником водоснабжения для населения является речной сток. В Донецкой области насчитывается 2287 малых и средних рек, а также временных водотоков общей протяженностью около 10600 км. При этом водообеспеченность природным речным стоком на одного жителя области в 5 раз меньше, чем в среднем по Украине [1, 2]. Для питьевого водоснабжения населения Донецкой области используется вода реки Северский Донец. Водные ресурсы области составляют за счет транзитного притока поверхностных вод по реке Северский Донец, местного годового стока, формирующегося в пределах области, шахтных и карьерных вод, а также эксплуатационных запасов подземных вод. Несмотря на уменьшение объемов водопотребления (по сравнению с 1990 г. – в два раза) интенсивность использования водных ресурсов в Донецкой области остается наибольшей по Украине. В связи с этим область занимает первое место в стране и по сбросу загрязненных сточных вод [3]. Главными загрязнителями водных ресурсов остаются предприятия металлургической и коксохимической промышленности [4].

Актуальность данной проблемы очевидна, поскольку качество питьевой воды в Донецкой области снижается быстрыми темпами, речная вода становится непригодной даже для хозяйственных нужд из-за безответственного отношения к ней.

Целью нашей работы было исследование сезонных изменений некоторых физических и гидробиологических характеристик воды реки Северский Донец вблизи поселка Донецкое Славянского района в течение 2010–2012 гг. Это дает возможность определить, необходимы ли дополнительные мероприятия по очистке воды питьевого назначения.

Построение решения задачи. Объект нашего исследования – природная вода реки Северский Донец.

Наши исследования проводились на базе лаборатории контроля качества воды Славянского РПУ КП «Компания «Вода Донбасса»» и кафедры физиологии растений биологического факультета ДонНУ.

Оценка качества воды проводилась по ГОСТу 2761-84 «Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические,

технические требования и правила выбора» [5]. Этот стандарт распространяется на источники централизованного водоснабжения, системы водоснабжения, подающие воду одновременно для хозяйственно-питьевых и производственных целей, и устанавливает гигиенические и технические требования к источникам водоснабжения и правила их выбора в интересах здоровья населения.

В зависимости от качества воды и необходимой степени ее обработки для доведения до показателей, соответствующих ГОСТ 2761-84, водные объекты, пригодные в качестве источника хозяйственно-питьевого водоснабжения, делятся на три класса. Критериями оценки воды по санитарно-микробиологическим показателям для поверхностных источников водоснабжения являются: общее количество бактерий в одном куб. см воды, характеризующее загрязнение водоисточника органическими веществами; степень загрязнения воды микробами лактозоположительных кишечных палочек.

Основная часть. Пробы воды отбирались еженедельно из поверхностного горизонта реки у водозабора Славянской фильтровальной станции II подъема № 2 по общепризнанным методикам [6, 7]. Отобранные пробы транспортировали в лабораторию.

Мутность воды определяли фотометрическим методом путем сравнения проб воды со стандартными суспензиями. Содержание взвешенных частиц определяли методом фильтрования [6].

Методом разведения нами определялось число сапрофитных микроорганизмов (общее микробное число, ОМЧ), произрастающих при температуре 20–22 °С в течение 48 ч; число сапрофитных микроорганизмов, произрастающих при температуре 37 °С в течение 24 ч; единицы измерения – колониеобразующие единицы в 1 мл (КОЕ/см³) [7].

Число лактозоположительных кишечных палочек (ЛКП) определяли методом мембранных фильтров. Результаты анализа выражали в виде числа лактозоположительных кишечных палочек в 1 л воды (коли-индекс) (КОЕ / дм³) [7].

Анализ результатов. В течение 2010 года температурный режим воды реки Северский Донец колебался в широких пределах (от 0,1 до 27,6 °С), в течение 2011 года – от 0,1 до 25,6 °С, а в 2012 году – от 0,1 до 28,0 °С.

Показатель pH в 2010 году достиг максимального значения – 8,15 и минимального 7,75; в течение 2011 года максимального – 8,45, минимального – 7,80, в 2012 году самое высокое значение pH было 8,45, а самое низкое – 7,80.

Количество взвешенных частиц в воде заметно снижалось: в течение 2010 года имело максимальное значение – 36,0 мг / дм³ (в феврале), в течение 2011 г. – 16,0 мг/дм³ (в апреле), в 2012 году максимум наблюдался в июле – 13,0 мг / дм³.

Мутность воды поверхностных источников, согласно ГОСТ 2761-84, не должна превышать 20-10000 мг/дм³. Этот показатель менялся в 2010 г. от 37,3 мг/дм³ (в феврале) до 1,6 мг/дм³ (в ноябре); в 2011 г. – от 19,72 мг/дм³ (в апреле) до 1,8 мг/дм³ (в ноябре); в 2012 г. – от 9,10 мг/дм³ (в июле) до 0,87 мг/дм³ (в феврале). Таким образом, соответствовал норме.

Наименьшая прозрачность воды отмечалась в 2010 году в феврале (10 см), апреле 2011 г. (13 см) и в июле 2012 г. (40 см).

Полученные данные по микробному числу речной воды в 2010–2012 годах представлены на рис. 1, из которого видно, что в январе, феврале, октябре, ноябре и декабре микрофлора воды реки Северский Донец была немногочисленной.

Это объясняется тем, что нормальное развитие микроорганизмов возможно только при определенном температурном режиме, то есть увеличение количества сапрофитов наблюдается при повышении температуры воды [8].

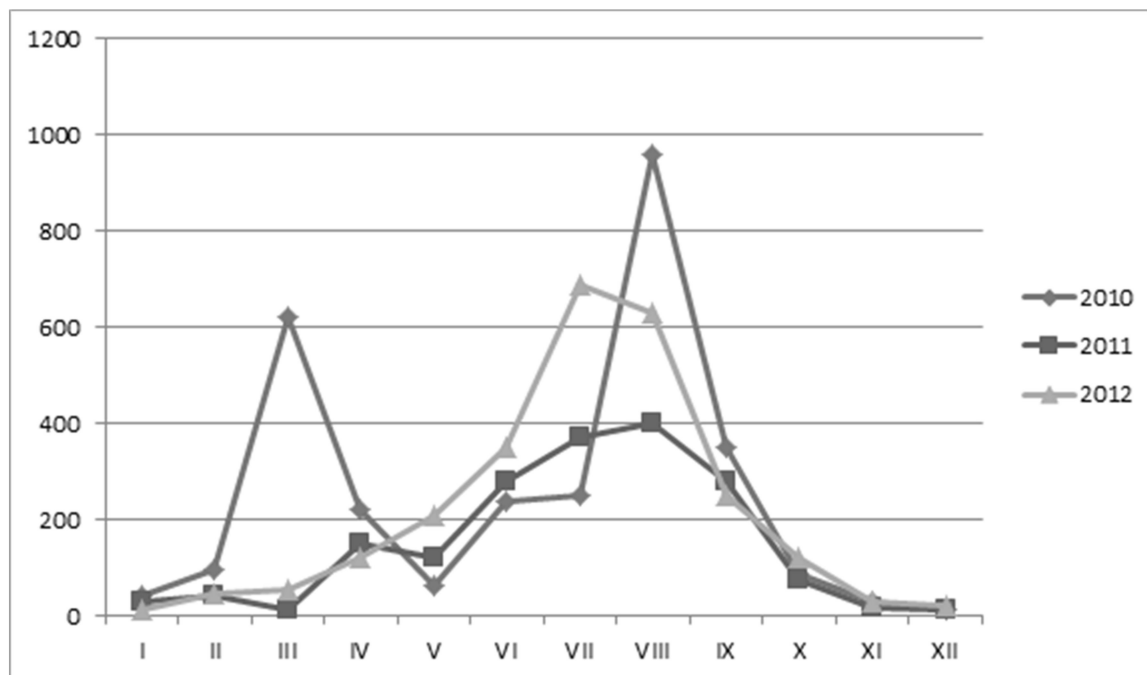


Рис. 1. Общее микробное число воды р. Северский Донец в течение 2010–2012 гг., КОЕ/см³

Общее микробное число (ОМЧ) речной воды в 2010 г. имеет два пика: в марте (620 КОЕ/см³) и в августе, достигая 960 КОЕ/см³. Это объясняется массовым отмиранием водорослей после «цветения» воды и подтверждает влияние фитобентоса на динамику численности сапрофитных бактерий [8]. Кроме того, на ОМЧ сапрофитов в августе повлияло общее загрязнение реки в результате длительного купального сезона и высокой температуры воды. Пик ОМЧ в марте является нетипичным для этого времени года и свидетельствует о высокой степени химического загрязнения воды. Возможно, причиной послужил антропогенный характер загрязнения (в январе 2010 г. в районе г. Змеевка сложилась аварийная ситуация на очистных сооружениях, что привело к значительным выбросам в р. Северский Донец под Изюмом).

В течение 2011 года максимальный показатель ОМЧ отмечается в августе (400 КОЕ/см³), а минимальный – в марте, ноябре и декабре – 12 КОЕ/см³. В 2012 году наивысшего значения он достигает в июле – 690 КОЕ/см³. Низкое значение наблюдалось в январе (13 КОЕ/см³) в связи с низкой температурой воды.

По количеству микроорганизмов можно судить не только о загрязнении водоема, но и о процессах его самоочищения, так как количественный и качественный состав бактерий меняется в зависимости от содержания в воде органических и других загрязняющих веществ. В процессе самоочищения водоема наблюдается уменьшение числа сапрофитных бактерий и патогенных микроорганизмов [9].

Степень самоочищения реки можно проследить по разнице между общим микробным числом, которое определялось при температуре 20 °С в течение 48 часов (оптимальная температура для большинства сапрофитных бактерий) и общим микробным числом при температуре 37 °С в течение 24 часов (оптимальная температура для бактерий группы кишечной палочки, патогенных микроорганизмов). Разница между этими показателями демонстрирует степень самоочищения реки Северский Донец в течение 2010–2012 гг.

Наибольший показатель степени самоочищения в 2010 году наблюдается в марте, когда ОМЧ сапрофитов при температуре 20 °С за 48 ч. достигло 4000 КОЕ/см³, а

при температуре 37 °С за 24 ч. – 620 КОЕ/см³. Минимальный показатель степени самоочищения водоема приходится на декабрь, когда ОМЧ сапрофитов при температуре 20 °С за 48 ч. составило 160 КОЕ/см³, и 12 КОЕ/см³ при температуре 37 °С за 24 ч. соответственно.

В 2011 году максимальная степень самоочищения наблюдалась в июле, когда ОМЧ при температуре 20 °С за 48 ч. составляло 840 КОЕ/см³, а при 37 °С за 24 ч. – 370 КОЕ/см³. Минимальная разница наблюдается в ноябре (20 °С за 48 ч. – 54 КОЕ/см³, 37 °С за 24 ч. – 19 КОЕ/см³).

Относительно показателя самоочищения воды в 2012 году, максимального значения он приобретает в августе, когда ОМЧ 20 °С за 48 ч достигало 2100 КОЕ/см³, а при 37 °С/24 ч – 630 КОЕ/см³. Минимальная степень самоочищения наблюдалась в декабре, когда при 20 °С за 48 ч значение ОМЧ составило 45 КОЕ/см³, в то время как при 37 °С за 24 ч – 21 КОЕ/см³.

Особое значение для санитарной оценки воды имеет определение в ней коли-индекса, свидетельствующего о фекальном загрязнении. Источниками такого бактериального загрязнения реки являются весенние и осенние паводковые сезоны, сточные воды, купание людей и животных. На рис. 2 показано количество ЛКП в воде реки Северский Донец за исследуемый период.

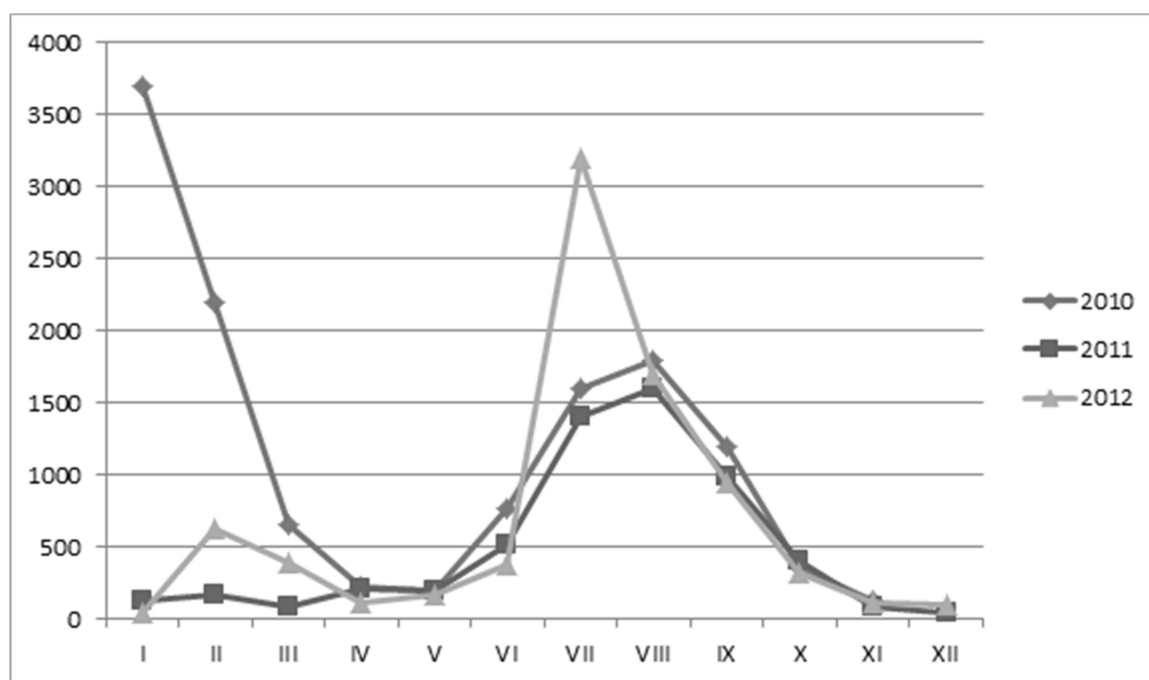


Рис. 2. Динамика показателей лактозоположительных кишечных палочек за 2010–2012 гг., КОЕ/дм³

В январе 2010 года сложилась эпидемиологическая ситуация по выбросам в реку Северский Донец ниже города Изюм в районе города Змеевка (прошла информация об аварийной ситуации очистных сооружений). Возможно, в связи с этим, в январе 2010 года количество кишечных палочек достигло своего максимального значения – 3700 КОЕ/дм³, и снизилось до 120 КОЕ/дм³ в декабре. Во время купального сезона (июль-август) число кишечных палочек снова возросло до 1600–1800 КОЕ/дм³.

Как видно из рис. 2, в 2011 году количество ЛКП имело максимальное значение в августе – 1600 КОЕ/дм³, а минимальное – в декабре – 41 КОЕ/дм³.

В 2012 году наибольшее число ЛКП наблюдается в июле – 3200 КОЕ/дм³, затем в августе и сентябре оно постепенно снижается и достигает своего минимального значения в ноябре и декабре – 20 КОЕ/дм³.

Таким образом, воду реки Северский Донец, которая поступала на Славянскую фильтровальную станцию № 2 в марте, апреле, мае, июне, октябре, ноябре и декабре 2010 года, можно отнести ко II классу питьевого водоснабжения (то есть она требовала дальнейшего обеззараживания и фильтрации), а в другие месяцы – к III классу, (то есть она требовала еще и отстаивания) [6].

В 2011 году вода, которая поступала на Славянскую фильтровальную станцию № 2, принадлежала к I классу в марте, ноябре и декабре, к II классу – в январе, феврале, апреле, мае, июне, сентябре, октябре, и к III классу – в июле и августе.

Качество воды, которая поступала для хозяйственно-питьевого водоснабжения Донецкой области из реки Северский Донец в 2012 году принадлежала к I классу в январе и декабре, к III классу – в июле и августе, а в другие месяцы – ко II классу.

Таким образом, в июле и августе доведение качества воды до требований ГОСТ 2761-84 методами обработки, предусмотренными во 2-ом классе, необходимо применение дополнительных мер: дополнительной степени осветления, применение окислительных и сорбционных методов, а также более эффективных методов обеззараживания.

Улучшение качества речной воды в Донбассе будет способствовать оздоровлению природной среды в Донецкой области и улучшению качества жизни населения, предусмотренного Программой научно-технического развития Донецкой области на период до 2020 года [10].

Выводы. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В течение 2010 года температурный режим воды реки Северский Донец, кислотность (рН), количество взвешенных частиц и мутность воды соответствовали нормативам ГОСТа 2761-84.

2. Общее микробное число за исследованный период достигало своего максимального значения в июле-августе, а минимального – в декабре-январе.

3. Максимальные значения ЛКП, как правило, наблюдались в июле-августе, минимальные – в зимние месяцы. В 2010 г. коли-индекс возрос в январе до 13000 КОЕ/дм³, что может быть результатом аварийной ситуации на очистных сооружениях.

4. Наибольший показатель самоочищения в 2010 году наблюдался в марте, в 2011 году – в июле, в течение 2012 года – в августе. Минимальная степень самоочищения наблюдалась в ноябре-декабре.

5. Согласно государственным нормативам вода реки Северский Донец в июле и августе требует дополнительной степени осветления, применение окислительных и сорбционных методов, а также более эффективных методов обеззараживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игошин Н.И. Проблемы восстановления и охраны малых рек и водоемов. Гидробиологические аспекты / Н.И. Игошин. – Харьков: Бурун Книга, 2009. – 240 с.
2. Кукурудза С.І. Використання та охорона водних ресурсів / С.І. Кукурудза, О.Р. Перхач. – Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. І. Франка, 2009. – С. 22-30.
3. Коршикова И.А. Состояние водных ресурсов Донецкой области и их диагностика // Економічний вісник Донбасу. – 2011. – № 1 (23). – С. 27-30.
4. Довкілля Донеччини за 2009 рік / Головне управління статистики у Донецькій області. – Донецьк. – 2010. – 154 с.
5. Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические, технические требования и правила выбора / ГОСТ 2761 - 84. – М.: Изд-во стандартов. – 19 с.

6. Вода питьевая. Методы определения вкуса, запаха, цветности и мутности: ГОСТ 3351-74. – М.: Из-во стандартов, 1988. – 8 с.
7. Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання / ДСТУ 4808:2007. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 36 с.
8. Ветрова Е.В. Сезонные изменения бактерио- и фитопланктона Верхне-Кальмиусского водохранилища / Е.В. Ветрова, А.В. Маркевич / Научно-практический журнал «Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона». – Донецк: Бюллетень ВАК Украины. – 2009. – № 9. – С. 165.
9. Микроколонии в биоэстимации – биологической оценке процесса очистки воды / О.Г. Никитина, Г.А. Семенова, В.Н. Максимов, Н.Е. Никитин / Вестник Московского госуниверситета. Сер. 16. Биология, 2007. – № 1. – С. 81-93.
10. Программа научно-технического развития Донецкой области на период до 2020 года. – Донецк, 2007. – 211 с.

Поступила в редакцию 01.07.2016 г.

THE DYNAMICS OF PHYSICAL AND BACTERIOLOGICAL INDICATORS OF WATER IN THE SEVERSKY DONETS RIVER IN 2010-2012

Y.V. Vietrova, O.O. Grinyova

The forming of composition and quality of surface water is largely affected by hydrobionts, human activities, physical and chemical factors. The dynamics of seasonality of some physical and bacteriological indicators of the Seversky Donets' surface water in village Donetskoye (Sloviansk district) in 2010–2012 has been tracked. Specifics of temperature, transparency, turbidity, acidity, as well as the total bacterial count, coli index and self-purification of the river water have been studied. It was discovered that the indicators under research are in accordance with the classification of domestic water supply over the course of three years.

Keywords: transparency, turbidity, acidity, total bacterial count, coli-index, self-purification of water.

Ветрова Елена Васильевна

кандидат биологических наук, доцент;
Донецкий национальный университет, г. Донецк;
г. Донецк, ул. Щорса, 46.
E-mail: vetrova.donny@mail.ru
Тел. (062) 302-09-93.

Vietrova Yelena Vasilyevna,

Candidate of Biological Sciences, Docent;
Associate Professor, Donetsk National University,
Donetsk;
46 Shchorsa St, Donetsk.
vetrova.donny@mail.ru

Гринева Ольга Олеговна

Инженер производственно-эксплуатационной
службы Славянского регионального производствен-
ного управления КП «Компания «Вода Донбасса»
Украина, г. Славянск.
E-mail: shakun.olya@mail.ru

Grinyova Olga Olegovna

engineer production-working service Slavyansky's
regional production operation «Company «Water of
the Donbass»
Ukraine, Slavyansk

612.821.2

НЕЙРОДИНАМИЧЕСКИЕ КОРРЕЛЯТЫ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РЕПРОДУКЦИИ СЛЕДОВ ПАМЯТИ

© 2016. Д.А. Кочура, В.А. Романенко

Работа посвящена изучению нейродинамического базиса процессов воспроизведения и узнавания стимульного материала у женщин 19–23 лет. В статье показано, что эффективность воспроизведения теснее связана с нейродинамической сферой, чем эффективность узнавания. Женщины с низкой эффективностью узнавания отличаются снижением общемозговой лабильности и скорости акустико-моторных реакций, на фоне повышения скорости простых зрительно-моторных реакций. У женщин с низкой эффективностью воспроизведения стимулов сравнительно с контролем выше лабильность нервных процессов, ниже общемозговая лабильность и скорость акустико-моторных реакций. Таким образом, общемозговая лабильность и скорость обработки простой информации оказывает положительное влияние на любые процессы актуализации следов памяти, тогда как лабильность нервных процессов лимитирует эффективность их воспроизведения.

Ключевые слова: узнавание стимула, воспроизведение стимула, лабильность, скорость обработки информации, психодинамические свойства.

Введение. Изучение памяти связано с решением трех вопросов:

- 1) каким образом происходит формирование и фиксация следов памяти? (проблема формирования);
- 2) каким образом эти следы поддерживаются? (проблема хранения);
- 3) каким образом происходит избирательное воспроизведение и узнавание? (проблема извлечения).

Запоминание, хранение, извлечение – основные процессы памяти. Индивидуальные особенности каждого из этих процессов влияют на конечный результат как мнемической, так и когнитивной активности в целом [1]. Детального описания частных механизмов, обеспечивающих запоминание, хранение и извлечение следов памяти, на данный момент нет. В связи с этим, **цель** работы заключалась в изучении нейродинамического базиса процессов воспроизведения и узнавания стимульного материала у женщин 19–23 лет.

Материал и методы. Эффективность процессов воспроизведения и узнавания оценивали по методу Бернштейна: испытуемые после 10-секундной экспозиции 10 элементов (слов или фигур) должны были воспроизвести их, а после найти в кассе из 20 объектов. Параметры внимания оценивали с помощью методов Ландольта, Шульте-Платонова, Бурдона, "Перепутанные линии". IQ оценивали по методу Айзенка. Индексы общей психической активности и трех ее компонентов – психомоторного, интеллектуального и коммуникативного, – определяли по методике В.М. Русалова.

Для изучения нейродинамического базиса процессов памяти определяли время акустико-моторной реакции на звук частотой 1 000 Гц пороговой громкости (ЛП АМР_п) и громкостью в 40 дБ (ЛП АМР₄₀), зрительно-моторной реакции на красный свет (ЛП ЗМР) и время реакции различения одного из двух (красный и зеленый) раздражителей (ЛП ЗМР₁₋₂). О силе нервных процессов судили по соотношению ЛП АМР_{пор} / ЛП АМР₄₀. Общемозговую лабильность изучали посредством определения критической частоты слияния световых мельканий (КЧСМ) красного цвета методом минимальных изменений (непрерывный ряд стимулов) в диапазоне от 25 до 60 Гц. Для

определения лабильности и баланса нервных процессов использовался графический вариант кинематометрической методики Ильина. Для определения выносливости, фоновой активности ЦНС и интенсивности возбуждения применяли различные модификации теппинг-теста.

Точность оценки временных интервалов определяли по относительной ошибке отмеривания эталонного интервала времени (5", 15" и 30"). Скорость световой адаптации оценивали по времени различения испытательного объекта яркостью 0,35 асб после 2-минутной преадаптации. В расчет принимали время достижения остроты зрения 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 и 0,5. Скорость темновой адаптации определяли по остроте зрения при яркости объекта 17,48; 1,1; 0,44 и 0,22 асб после 30-секундного засвечивания лампой мощностью 3,2 Вт. Абсолютные и терминальные пороги слуховой чувствительности определяли моноурально при частоте звука 500 и 1000 Гц методом минимальных изменений в диапазоне от 0 до 40 дБ для абсолютного порога и от 0 до 120 дБ – для терминального.

Результаты исследования и их обсуждение. *Первый этап* работы посвящен изучению особенностей узнавания и воспроизведения следа памяти у женщин 19–23 лет. Узнавание – простая форма активации следа – опознание воспринимаемого объекта или явления, известного из прошлого опыта, установление сходства между объектом и его образом. Воспроизведение – наиболее активная форма актуализации, сознательный целенаправленный отбор и анализ хранимой информации, связанный обычно с проявлением волевых усилий. Согласно результатам первого этапа работы, успешность узнавания материала в среднем составляет $82,13 \pm 2,39$ %, а воспроизведения – $72,5 \pm 1,63$ %, что на 18 % и на 28 % ниже сопоставительных норм (табл. 1).

Таблица 1

Психодинамические показатели у общей группы (n = 40)

Показатели	($\bar{X} \pm m$)	Сопоставительные нормы
Устойчивость внимания "Перепутанные линии", с	$259,09 \pm 11,73$	180–200
Устойчивость внимания по Ландольту, %	$139,33 \pm 14,50$	80–100
Объём внимания по Бурдону, с	$73,73 \pm 7,29$	100–120
Переключение внимания по таблицам Шульте-Платонова, с	$241,12 \pm 6,60$	222–351
Успешность узнавания материала, %	$82,13 \pm 2,39$	80–100
Успешность воспроизведения материала, %	$72,5 \pm 1,63$	80–100
IQ, баллы	$136,69 \pm 1,50$	120–135

Отметим, что 30 человек из 40 характеризуется высокой успешностью узнавания, однако только у 12 из них успешность воспроизведения также выше среднего уровня. Остальные характеризуются средней (9 человек) и низкой (9 человек) успешностью воспроизведения. Успешность воспроизведения у студенток хуже, чем успешность узнавания – только у 17 человек (42 % выборки) она высокая, и у 14 (35 % выборки) – средняя. Все 9 человек со слабым воспроизведением (23 % выборки) успешно узнают стимульный материал, а 4 человека с низкой успешностью узнавания (10 % выборки) воспроизводят стимульный материал со средней или высокой успешностью. Таким образом, между объемами кратковременной памяти при различных способах актуализации запечатленной информации существует обратная зависимость. Вероятно, основой индивидуальных различий памяти являются не только особенности запоминания, но и особенности воспроизведения [1, 2].

Различная успешность процессов узнавания и воспроизведения материала по-видимому связана с различиями в их психодинамическом и нейродинамическом базисе. Поэтому *второй этап* работы посвящен изучению структуры связей между показателями памяти и других психодинамических параметров. Было установлено, что два использованных в работе показателя памяти между собой не связаны. При этом успешность узнавания зависит от устойчивости внимания ($r = 0,3$), психомоторной ($r = -0,39$) и коммуникативной активности ($r = -0,36$). Успешность воспроизведения связана только с устойчивостью внимания ($r = -0,31$). Такие различия между психодинамическим базисом процессов памяти вызывают необходимость более тщательного его анализа. Для этого общую группу разделили на три: группа № 1 ($n = 12$) – с высокой эффективностью обоих способов актуализации следа памяти (контроль); группа № 2 ($n = 9$) – с высокой эффективностью узнавания и низкой – воспроизведения; группа № 3 ($n = 4$) – с высокой/средней эффективностью воспроизведения и низкой – узнавания. Первая группа характеризуется высокой устойчивостью внимания и IQ (рис. 1). На рис. 1 и далее штрихом выделены значения, отличные от значений у группы № 1 на уровне $p < 0,05$. Звездочкой отмечены показатели, значения которых различны для групп № 2 и № 3 на уровне $p < 0,05$.

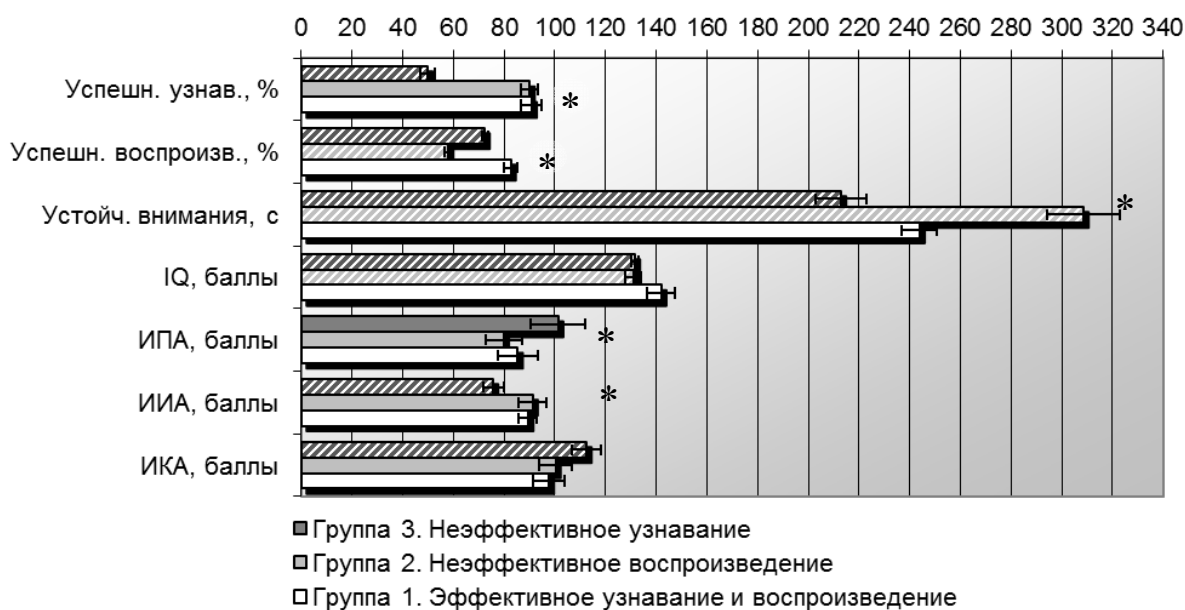


Рис. 1. Психодинамические показатели у женщин с различной эффективностью воспроизведения и узнавания стимульного материала

Помимо группформирующих факторов, остальные показатели находятся в пределах сопоставительных норм. Для второй и третьей групп характерны высокие уровни устойчивости внимания, а IQ приближается к среднему, – вероятно, для обеспечения достаточно высокого уровня когнитивной деятельности необходимо сочетание обоих типов актуализации.

Результаты сравнительного анализа психодинамической сферы показали, что у группы № 2 по сравнению с контролем снижен IQ и повышена устойчивость внимания (рис. 1). У группы № 3 значительно больше отличий от контрольной: ниже устойчивость внимания, IQ и ИИА; выше ИКА. Помимо успешности узнавания, снижена и эффективность воспроизведения информации. Возможно, несмотря на

отсутствие корреляций между этими двумя показателями памяти, успешность узнавания оказывает лимитирующее влияние на воспроизведение стимульного материала. Между собой группы № 2 и № 3 значительно различаются по уровню устойчивости внимания, причем направленность различий согласуется с направленностью корреляций между этими показателями в общей группе. Интеллектуальная активность у третьей группы ниже, а психомоторная – выше, чем у второй. Разнонаправленность связей с различными компонентами общей психической активности может объясняться сложными взаимоотношениями между активирующими и инактивирующими компонентами модулирующих систем [1, 3].

Таким образом, снижение эффективности узнавания стимульного материала связано со снижением устойчивости внимания, интеллекта и интеллектуальной активности, и повышением психомоторной и коммуникативной активности. Снижение эффективности воспроизведения сочетается с повышением устойчивости внимания и снижением интеллекта. Вероятно, узнавание имеет больше общего с сенсорной памятью, обусловлено специфической активацией определенных центров, т.е. концентрированностью нервных процессов. Успешность воспроизведения скорее всего связана с уровнем активации и скоростью ее развития. В проверке этого допущения заключался третий этап работы.

На *третьем этапе* оценивали особенности нейродинамического базиса процессов памяти. Результаты показали, что эффективность воспроизведения теснее связана с нейродинамической сферой, чем эффективность узнавания. Первая связана с 12-ю показателями, среди которых лабильность торможения, общемозговая лабильность, скорость сенсомоторных реакций, баланс нервных процессов, скорость темновой адаптации (в большей степени ее начальные этапы) и выносливость слухового анализатора ($0,31 \leq |r| \leq 0,54$) (рис. 2).

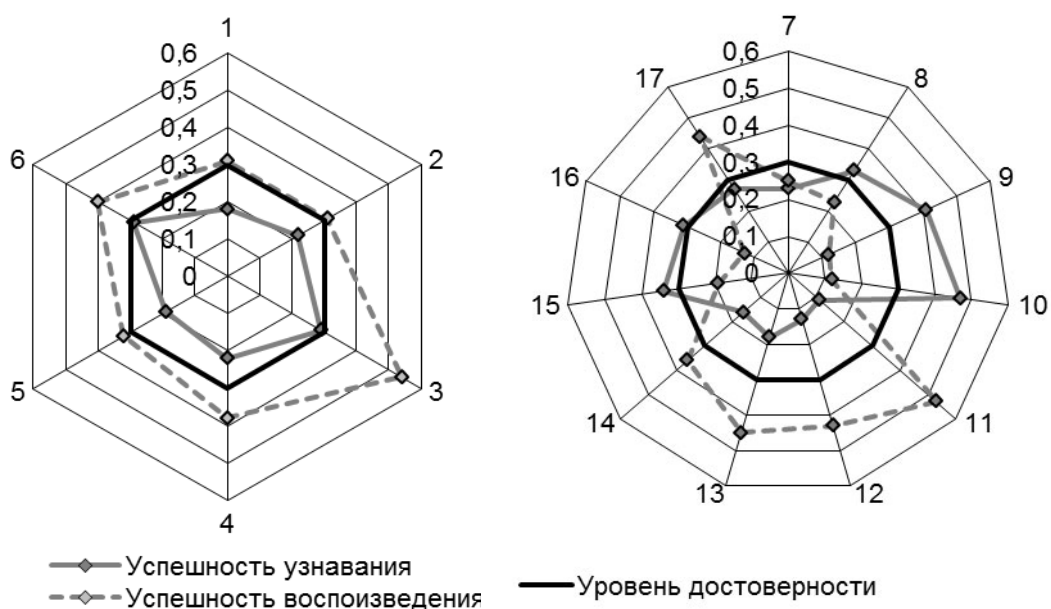


Рис. 2.

На рис. 2 приведены коэффициенты корреляции между показателями памяти и нейродинамическими показателями ($n = 40$), при этом 1 – лабильность торможения, усл.ед; 2 – КЧСМ, Гц; 3 – ЛП АМР₄₀, мс; 4 – ЛП ЗМР, мс; 5 – ошибка отмеривания

времени, %; 6 – ошибка отмеривания усилий, %; 7 – время достижения 10 % остроты зрения при пониженной освещенности, с; 8 – то же для 20 % остроты зрения, с; 9 – то же для 30 % остроты зрения, с; 10 – то же для 40 % остроты зрения, с; 11 – скорость темновой адаптации при яркости объекта 17,48 асб, кол-во строк; 12 – то же при яркости 1,1 асб, кол-во строк; 13 – то же при яркости 0,44 асб, кол-во строк; 14 – то же при яркости 0,22 асб, кол-во строк; 15 – абсолютный слуховой порог, дБ; 16 – терминальный слуховой порог, дБ; 17 – устойчивость к звуку на уровне терминального порога, с. Успешность узнавания стимульного материала связана с 5-ю показателями: с чувствительностью и выносливостью слухового анализатора и поздними этапами световой адаптации зрительного анализатора ($0,31 \leq |r| \leq 0,47$).

Сравнительный анализ нейродинамических параметров показал, что у группы № 2 сравнительно с контролем выше лабильность нервных процессов, ниже общемозговая лабильность и скорость акустико-моторных реакций. Сравнение групп № 2 и № 3 между собой подтвердило зависимости, приведенные на рис. 2. Женщины с низкой эффективностью узнавания отличаются снижением общемозговой лабильности и скорости АМР, на фоне повышения скорости простых ЗМР (рис. 3). Эффективность воспроизведения и узнавания снижаются при снижении КЧСМ, замедлении ЗМР и АМР. Кроме того, эффективность воспроизведения снижается при повышении лабильности нервных процессов, что указывает на важную роль динамического компонента активности для запоминания стимульного материала [4].



Рис. 3. Нейродинамические показатели у женщин с различной эффективностью воспроизведения и узнавания стимульного материала

Следовательно, общемозговая лабильность и скорость обработки простой информации оказывают положительное влияние на любые процессы актуализации, тогда как лабильность нервных процессов лимитирует эффективность воспроизведения. Примечательно, что ни фоновый уровень активности, ни баланс нервных процессов, ни скорость обработки сложной информации, ни интенсивность возбуждения у

исследуемых групп не различаются. Вероятно, это связано с доминирующей ролью скоростного аспекта активности в обеспечении кратковременной памяти [1, 4].

Из показателей успешности темновой адаптации отличается от таковых у контрольной группы только скорость начальных этапов, причем у группы № 2 эти отличия выражены ярче. В то же время, замедление поздних этапов световой адаптации сравнительно с контролем характерно только для группы № 3 (рис. 4). Это вполне согласуется с вышеприведенными данными и подтверждает связь между эффективностью актуализации энграммы и скоростным аспектом активности.

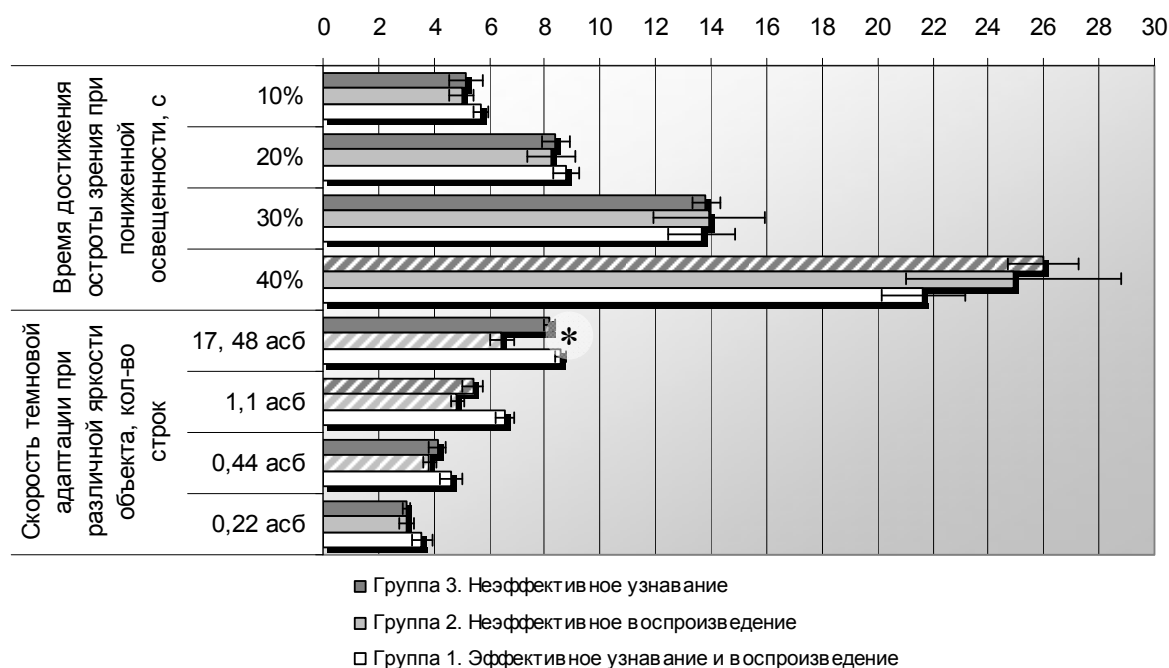


Рис. 4. Показатели адаптации зрительного анализатора у групп с различной эффективностью узнавания и воспроизведения стимульного материала

Из показателей слуховой чувствительности у группы № 2 от контроля отличается только устойчивость к воздействию звука на уровне терминального порога (рис. 5). Более заметными различиями характеризуется группа № 3. У них относительно снижена абсолютная и терминальная чувствительность на звук частотой 500 Гц и повышена устойчивость к экстремальному воздействию звука частотой 500 и 1 000 Гц (рис. 5). Между собой группы № 2 и № 3 различаются высотой терминальных порогов и устойчивостью слухового анализатора к экстремальному воздействию звука. Направленность различий свидетельствует о снижении чувствительности и повышении адаптивности слухового анализатора у группы с низкой эффективностью узнавания. Группа с низкой эффективностью воспроизведения обнаруживает тенденции к увеличению чувствительности и снижению устойчивости слухового анализатора, что может быть связано с повышением лабильности нервных процессов.

Обобщая приведенные данные, можно сказать, что эффективность узнавания связана преимущественно с психодинамическими свойствами и параметрами адаптации анализаторов. Эффективность актуализации следов памяти без опоры на стимульный материал зависит от тех же параметров, однако к нейродинамическому базису этого процесса следует отнести также скорость развития возбуждения в ЦНС.

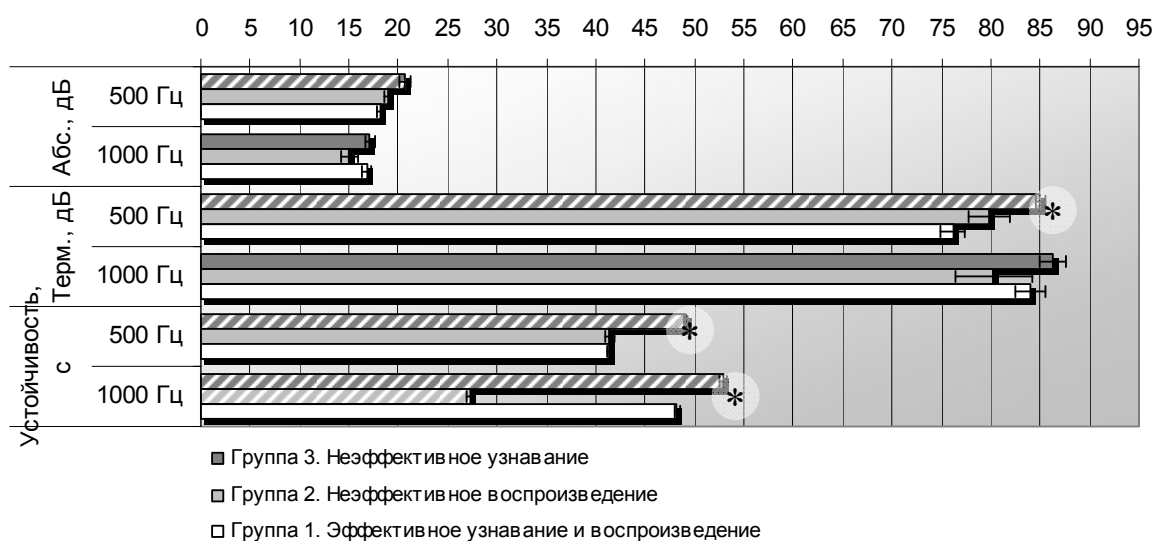


Рис. 5. Показатели адаптации слухового анализатора у групп с различной эффективностью узнавания и воспроизведения стимульного материала

Выводы.

1. Успешность узнавания материала у женщин 19–23 лет составляет $82,13 \pm 2,39$ %, а воспроизведения – $72,5 \pm 1,63$ %. Большая часть испытуемых (30 человек) отличается высокой успешностью узнавания. Однако только у 12 из них успешность воспроизведения также выше среднего уровня. Остальные 18 человек характеризуются средней (9 человек) и низкой (9 человек) успешностью воспроизведения. Успешность узнавания оказывает прямое или косвенное лимитирующее влияние на воспроизведение стимульного материала.

2. Процесс узнавания теснее связан с психодинамическими показателями, тогда как успешность воспроизведения отрицательно связана только с устойчивостью внимания. Снижение эффективности узнавания стимульного материала сочетается со снижением устойчивости внимания, интеллекта и интеллектуальной активности, и с повышением – психомоторной и коммуникативной активности. Снижение эффективности воспроизведения сочетается с повышением устойчивости внимания и снижением интеллекта.

3. Эффективность воспроизведения теснее связана с нейродинамической сферой, чем эффективность узнавания. Женщины с низкой эффективностью узнавания отличаются снижением общемозговой лабильности и скорости акустико-моторных реакций, но повышением скорости простых зрительно-моторных реакций. У женщин с низкой эффективностью воспроизведения стимулов сравнительно с контролем выше лабильность нервных процессов, ниже общемозговая лабильность и скорость акустико-моторных реакций. Таким образом, общемозговая лабильность и скорость обработки простой информации оказывает положительное влияние на любые процессы актуализации следов памяти, тогда как лабильность нервных процессов лимитирует эффективность их воспроизведения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилова Н.Н. Психофизиология / Н.Н. Данилова. – М.: Аспект Пресс, 2001. – 373с.
2. Клацки Р. Память человека, структуры и процессы / Р. Клацки. – М.: Наука, 1978. – 440с.

3. Греченко Т.Н. Концепции памяти / Греченко Т.Н. – 2004. – Режим доступа: http://flogiston.ru/articles/general/concept_memory
4. Голубева Э.А. Свойство лабильности – инертности, память и следовые процессы / Э.А. Голубева, Е.П. Гусева, С.А. Изюмова // Психология и психофизиология индивидуальных различий. – М.: Педагогика, 1997. – С. 116 – 123.

Поступила в редакцию 13.05.2016 г.

NEURAL CORRELATES OF DIFFERENT TYPES OF MEMORY REPRODUCTION

D.A. Kochura, V.A. Romanenko

The work examines the neural basis of reproduction and recognition processes in women 19-23 years. The article shows that the efficiency of the reproduction more closely tied to neural sphere than the efficiency of recognition. Women with low efficiency of recognition are reduction of cerebral lability and speed of acoustic-motor reactions, but to improve the speed of simple visual-motor reactions. Women with low the efficiency of the reproduction was higher lability of nervous processes, lower cerebral lability and speed of acoustic-motor reactions. Thus, cerebral lability and speed of processing simple information has a positive influence on any process of actualization of the memory, whereas the lability of neural processes limits the efficiency of memory reproduction.

Keywords: the recognition of the stimulus, the reproduction of the stimulus, the lability, the speed of information processing, psychodynamic properties.

Кочура Дарья Анатольевна

кандидат биологических наук, ассистент кафедры человека и животных ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк, ул. Щорса, 46, биол. факультет, 83055.
E-mail: d.a.kochura@rambler.ru
Тел.: 8-063-192-193-1, 8-099-10-78-666

Kochura Dar'ja Anatol'evna

candidate of biological sciences,
Lecturer at the department of human and animal, Donetsk National University, Donetsk

Романенко Валерий Александрович

доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры физиологии человека и животных ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк, ул. Щорса, 46, биол. факультет, 83055.
E-mail: va.romanenko@mail.ru
Тел: 8-063-91-13-593, 8-050-02-305-77

Romanenko Valerij Aleksandrovich

Doctor of Biological Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Human and Animal, Donetsk National University, Donetsk

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Для публикации в журнале «Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки» принимаются не опубликованные ранее научные работы, содержащие новые результаты теоретических и экспериментальных исследований по математике, механике, информатике, физике, химии и биологии. Статьи, представленные для публикации в других журналах, к рассмотрению не принимаются.

Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала после рецензирования, учитывая научную значимость и актуальность представленных материалов. Если рецензия положительна, но содержит замечания и пожелания, редакция направляет статьи авторам на доработку вместе с замечаниями рецензента. Автор должен ответить рецензенту по всем пунктам рецензии. После такой доработки редколлегия принимает решение о публикации статьи. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензии или выдержки из них, либо аргументированное письмо редактора. Редколлегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения. Рукописи авторам не возвращаются. Статья, задержанная на срок более трех месяцев или требующая повторной переработки, рассматривается как вновь поступившая.

Обзорные статьи готовятся по заказу редколлегии или по инициативе авторов. В случае инициативы авторов они направляют в редакцию письмо-предложение вместе с аннотацией обзора и указанием ориентировочного объема и предполагаемого числа ссылок на литературу. Если заявка одобрена редколлекцией, авторы готовят и присылают текст обзорной статьи.

2. Рукопись подается в одном экземпляре (на русском или английском языках), напечатанном с одной стороны листа бумаги формата А4 (экземпляр подписывается авторами). Объем рукописи, как правило, не должен превышать 10 страниц (для обзорной статьи – 25), включая рисунки, таблицы, список литературы. Вместе с рукописью подается CD-диск с полным текстом статьи и отдельными дополнительными электронными файлами указанными ниже (в формате WORD, Office 97–2010) или файлы представляются по электронной почте. Основной текст статьи – шрифт Times New Roman, размер 12 пт., с выравниванием по ширине; резюме, список литературы, таблицы, подрисовочные подписи – шрифт Times New Roman, размер 10 пт. Без автоматической расстановки переносов. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются только с помощью редактора формул Microsoft Equation 3.0 или MathType 5.0–6.0; текст и переменная – курсивом, матрица и вектор – полужирным курсивом; размер: 12 пт., 9 пт., 7 пт., 18 пт., 12 пт. (обычный, индекс, мелкий индекс, крупный символ мелкий символ – соответственно). Каждая формула отделяется от основного текста интервалом в 6 пунктов. Поля зеркальные: верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм. Междустрочный интервал – одинарный. Абзацный отступ – 1 см.

3. Текст рукописи должен соответствовать следующей структурной схеме: индекс УДК в верхнем левом углу страницы; **НАЗВАНИЕ** статьи – полужирный, по центру (прописными буквами без переноса слов); копирайт, год, *инициалы и фамилия авторов*, полужирный, курсив, по левому краю **аннотация** объемом до 100 слов, должна кратко отражать предмет статьи, примененные методы исследований и основные результаты, полученные авторами, и заканчиваться *ключевыми словами* (до 10 слов, отделяются друг от друга точкой с запятой); **введение** (постановка проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировка целей статьи); **основная часть** (где излагаются основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов), как правило, содержит такие структурные элементы: **постановка задачи**, **метод решения** (методика эксперимента), **анализ результатов**; **выводы** по данному исследованию (кратко и четко подытоживаются основные результаты, полученные авторами и перспективы дальнейших изысканий в данном направлении); **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**. Далее приводится название статьи, инициалы и фамилия авторов, аннотация, ключевые слова на

английском языке (перевод). В конце статьи обязательно указываются следующие сведения об авторах: фамилия, имя, отчество всех авторов полностью (на русском и английском языке); ученая степень и звание (на русском и английском языке); полное название организации – место работы каждого автора в именительном падеже, страна, город (на русском и английском языке); адрес электронной почты каждого автора; корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов. Дополнительно размещаются название статьи (строчными буквами, первая – прописная) на русском и английском языках. Страницы рукописи должны быть последовательно пронумерованы. Все числовые значения физических величин выражаются в системе СИ. В десятичных дробях целая часть должна отделяться от дробной запятой, а не точкой. Для текстового материала используется настоящее время (за исключением обращения к предыдущим статьям).

4. Рисунки и таблицы располагаются по тексту строго в пределах печатного поля книжной ориентации страниц после первого упоминания. Вся текстовая информация на рисунках должна быть четкой и разборчивой и не иметь лишних деталей (например, на графиках не допускаются «вторичные» отметки на координатных осях и т.п.). Необходимо следить за тем, чтобы после возможного уменьшения до размера 80 мм высота букв и цифр на рисунке оставалась не менее 2 мм. Каждый рисунок имеет подпись (не совмещенную с рисунком), а таблица – заглавие (выравнивание – по центру). Все рисунки и таблицы должны быть последовательно пронумерованы арабскими цифрами. Желательно прилагать иллюстративный материал в графическом формате JPG, TIFF, BMP и др. (графики – черно-белые, с разрешением 300 dpi; фотографии – в оттенках серого, 300 dpi) в виде отдельных файлов с названиями *gis1*, *gis2*, ... Сканированные рисунки не принимаются.

5. Формулы выравниваются по центру и имеют, в случае необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Нумеровать следует только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте.

6. Перечень литературных источников (**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**) приводится общим списком в конце рукописи *в порядке ссылок* в тексте (а не в алфавитном порядке) на языке оригинала в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание» и ГОСТ 7.05-2008 «Библиографическая ссылка». Ссылка на источник дается в квадратных скобках. Ссылки допускаются только на опубликованные работы. Необходимо включение в список как можно больше свежих первоисточников по исследуемому вопросу (не более чем трех-четырёхлетней давности). Не следует ограничиваться цитированием работ, принадлежащих только одному коллективу авторов или исследовательской группе. Желательны ссылки на современные зарубежные публикации. Статьи, не содержащие ссылок на работы, которые вышли в течение последнего десятилетия, как правило, автоматически считаются такими, которые не соответствуют редакционным требованиям.

7. Статья сопровождается письмом-заявлением от организации, сведениями об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, место работы, должность, почтовый адрес, телефон, E-mail).

8. Рукописи, не соответствующие редакционным требованиям, и статьи, не соответствующие тематике журнала, к рассмотрению не принимаются.

9. Редакция оставляет за собой право проводить редакционную правку рукописей. В случае отказа в публикации статей редколлегия не возвращает автору рукопись статьи. Корректур статей авторам не высылаются.

10. Плата с авторов за публикацию статей не взимается.

Материалы представляются по адресу: 83001, г. Донецк, ул. Университетская, 24.

Контактный тел.: (062) 302-92-93.

E-mail: vestnikdonnu_a@mail.ru

Сайт: <http://donnu.ru/vestnikA>

Доступ к электронным версиям журнала за период 2008–2014 гг. имеется на сайте библ. им. В.И. Вернадского <http://nbuv.gov.ua/node/1539> раздел Научная периодика.

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета
Серия А: Естественные науки**

2016. – № 3

Редактор: *Е.В. Алтухов*
Технический редактор: *М.В. Фоменко*

Свидетельство о государственной регистрации № 362 от 18.01.2016 г.

Адрес редакции:
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ул. Университетская, 24,
283001, г. Донецк
Тел: (062) 302-92-56, 302-92-93
E-mail: vestnikdonnu_a@mail.ru
URL: <http://donnu.ru/vestnikA>

Подписано в печать 31.10.2016 г.
Формат 60×84/8. Бумага офсетная.
Печать – цифровая. Усл. печ. л. 10,6.
Тираж 100 экз. Заказ. № 16-Окт23

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»
83001, г. Донецк, ул. Университетская, 24
Свидетельство о внесении субъекта издательской деятельности
в Государственный реестр
серия ДК № 1854 от 24.06.2004 г.