

АГЕНТСТВО ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
(АПНИ)

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов
по материалам
VI Международной научно-практической конференции

г. Белгород, 30 сентября 2015 г.

В десяти частях
Часть I



Белгород
2015

УДК 001
ББК 72
С 56

Современные тенденции развития науки и технологий :
С 56 сборник научных трудов по материалам VI Международной научно-практической конференции 30 сентября 2015 г.: в 10 ч. / Под общ. ред. Е.П. Ткачевой. – Белгород : ИП Ткачева Е.П., 2015. – № 6, часть I. – 148 с.

В сборнике рассматриваются актуальные научные проблемы по материалам VI Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и технологий» (г. Белгород, 30 сентября 2015 г.).

Представлены научные достижения ведущих ученых, специалистов-практиков, аспирантов, соискателей, магистрантов и студентов по физико-математическим, техническим наукам, наукам о земле.

Информация об опубликованных статьях предоставляется в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) по договору № 301-05/2015 от 13.05.2015 г.

Электронная версия сборника находится в свободном доступе на сайте:
www.issledo.ru

УДК 001
ББК 72

ISSN 2413-0869

© Коллектив авторов, 2015
© ИП Ткачева Е.П. (АПНИ), 2015

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ «ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ»	5
<i>Баянов Е.В., Матвеев К.А.</i> КОМПОНЕНТЫ ВЕКТОРА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В УПРУГОМ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ СТЕРЖНЕ	5
<i>Бобарыкин Н.Д., Графова Е.Н., Седов Р.Л.</i> РАЗРАБОТКА МАКЕТА ПОЛНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖАНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ЗАДАНИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПАРАМЕТРОВ ПОЛЬДЕРНЫХ СИСТЕМ.....	9
<i>Денисова О.А., Абрамишвили Р.Л.</i> ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОРИЕНТАЦИОННЫХ ВОЛН И ИХ РЕЛАКСАЦИЯ В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.....	13
<i>Дмитриевский А.А., Ефремова Н.Ю., Гусева Д.Г., Жигачев А.О.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ РЕГИСТРАЦИИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ КРЕМНИЯ Si-I – Si-II ПРИ НАНОИНДЕНТИРОВАНИИ.....	19
<i>Егоров В.К., Егоров Е.В.</i> О ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПОТОКОВ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ РАДИАЦИИ.....	24
<i>Затылкин С.В., Телегин А.В., Юрков Н.К.</i> АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ АЧХ ОДНОРОДНОГО УПРУГОГО СТЕРЖНЯ ПРИ СИНФАЗНОМ И ПРОТИВОФАЗНОМ ВИБРАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.....	46
<i>Лысенко А.В., Калаев В.С., Яшин Д.С.</i> ЯВНОЕ РАЗНОСТНОЕ УРАВНЕНИЕ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ ОДНОРОДНОГО УПРУГОГО СТЕРЖНЯ	49
<i>Макаров В.Н.</i> ВЫБОР БАЗОВЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ И СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ И СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ	51
<i>Ольхов Д.В., Бушмелев П.Е., Юрков Н.К.</i> ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ВЕРХНЕГО СПЕКТРА ЧАСТОТ НА НАДЕЖНОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ.....	53
<i>Тасмамбетова А.Ж., Тасмамбетов Ж.Н.</i> КОНЕЧНЫЕ РЕШЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ.....	57
<i>Тырсин А.Н., Соколова И.С.</i> ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ГАУССОВСКОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ЭНТРОПИЙНОЙ МОДЕЛИ.....	62
<i>Хидиров Х.С.</i> ЛИНЕЙНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЧАСТНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПЕРВОГО ПОРЯДКА НАГРУЖЕННЫМИ СВОБОДНЫХ ЧЛЕН И С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ.....	73
<i>Шакиров А.Р., Кренц А.А., Анчиков Д.А.</i> МНОГОЧАСТОТНЫЕ ТОРЫ В МОДЕЛИ ШИРОКАПЕРТУРНОГО ЛАЗЕРА С ОДНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ МОДОЙ ПРИ НУЛЕВОЙ ОТСТРОЙКЕ ЧАСТОТЫ.....	76
<i>Шишканов О.Н., Бойченко А.П.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОЛЕВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ СТЕКЛЯННЫХ МАТРИЦ МИКРОЛИНЗ.....	79
СЕКЦИЯ «НАУКИ О ЗЕМЛЕ».....	83
<i>Пичугина Н.В., Макаров В.З., Данилов В.А., Фёдоров А.В.</i> СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ САРАТОВСКОГО ПРАВОБЕРЕЖЬЯ	83

<i>Полещук Л.О., Шихова А.М.</i> ТУРИСТСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРКОВ РОССИИ	87
<i>Цуканов А.В.</i> ЗАВИСИМОСТЬ ОБЪЁМА КОНВЕРСИОННЫХ ОПЕРАЦИЙ С НАЛИЧНОЙ ИНОСТРАННОЙ ВАЛЮТОЙ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ОТ КУРСА ИНОСТРАННОЙ ВАЛЮТЫ В ТЕРРИТОРИАЛЬНОМ РАЗРЕЗЕ	90
<i>Шихова А.М., Полещук Л.О.</i> БЕКТАУ-АТА КАК ТУРИСТСКИЙ ОБЪЕКТ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН	92
СЕКЦИЯ «ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»	95
<i>Алексеев Ю.В.</i> ПРИМЕНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ DEEP LEARNING	95
<i>Артемова Т.В., Румянцев А.Н.</i> ПРИНЦИПЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ОБУЧЕНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ ПРИ ПРАКТИЧЕСКОМ ИЗУЧЕНИИ ГИДРАВЛИКИ	100
<i>Большакова Л.С., Ладнова О.Л., Меркулова Е.Г.</i> РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РУБЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПТИЦЫ ПОВЫШЕННОЙ ПИЩЕВОЙ ЦЕННОСТИ	104
<i>Версиков С.О., Короткий А.А., Панфилов А.В., Недлин Л.М.</i> О ПРАКТИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРТИЗЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	107
<i>Горбунов А.С.</i> ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА – ИНДУКТОРНО-КОНДЕНСАТОРНЫЙ МОДУЛЬ	112
<i>Кружилин Н.В., Короткий А.А., Панфилова Э.А., Панфилов А.В.</i> ПОВРЕЖДЕНИЕ БОКОВЫХ ЭКРАНОВ КОТЛА ТПП-210 В НИЖНЕЙ РАДИАЦИОННОЙ ЧАСТИ (НРЧ)	116
<i>Куксин В.В., Красюкова С.Н., Ватутин А.А., Недлин Л.М.</i> К ЧЕМУ ПРИВОДЯТ ОТСТУПЛЕНИЯ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ТОВАРНО-ТРАНСПОРТНЫХ ДОКУМЕНТОВ НА ГРУЗ, ПЕРЕВОЗИМЫЙ АВТОТРАНСПОРТОМ	119
<i>Куксин В.В., Красюкова С.Н., Ватутин А.А., Недлин Л.М.</i> НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ НЕСВОЕВРЕМЕННОМ ВЫПОЛНЕНИИ ТРЕБОВАНИЙ НОРМАТИВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ К ТЕКУЩЕМУ СОДЕРЖАНИЮ СООРУЖЕНИЙ	124
<i>Кульков Е.П., Красюкова С.Н., Ватутин А.А., Недлин Л.М.</i> ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРАВИЛА ВЕДЕНИЯ РАБОТ НА ОБЪЕКТАХ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ГАЗОПОТРЕБЛЕНИЯ	130
<i>Кульков Е.П., Красюкова С.Н., Ватутин А.А., Недлин Л.М.</i> ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРТИЗЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГАЗОПРОВОДОВ И ГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ	133
<i>Рогинская Л.Э., Горбунов А.С.</i> СОГЛАСОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНВЕРТОРА И НАГРУЗКИ НА БАЗЕ ИНДУКТОРНО-КОНДЕНСАТОРНОГО МОДУЛЯ	136
<i>Сизиков В.П.</i> СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ПОДВЕШИВАНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	139

СЕКЦИЯ «ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ»

КОМПОНЕНТЫ ВЕКТОРА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В УПРУГОМ ОСЕСИММЕТРИЧНОМ СТЕРЖНЕ

Баянов Е.В.

старший преподаватель кафедры инженерной графики,
Новосибирский государственный технический университет,
Россия, г. Новосибирск

Матвеев К.А.

декан факультета летательных аппаратов, д-р техн. наук, профессор,
Новосибирский государственный технический университет,
Россия, г. Новосибирск

В статье приводится система уравнений в перемещениях для динамической задачи теории упругости. Подробно выводятся уравнения для компонент перемещений для общего случая осесимметричной задачи. Далее показан переход к конкретной задаче распространения волны в сплошном стержне.

Ключевые слова: распространение волн, волны в стержнях, упругие волны.

Введем систему координат для круглого стержня таким образом, что ось z направлена вдоль оси стержня, а ось r – в радиальном направлении.

Будем искать перемещения $\mathbf{u}(r, z, \theta)$ для полубесконечного осесимметричного стержня ($0 < z < \infty$) конечного радиуса R ($0 < r \leq R$) в любой момент времени $t \geq 0$.

Рассмотрим уравнение теории упругости в перемещениях [2]:

$$(\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{u} + \mu \Delta \mathbf{u} = \rho \ddot{\mathbf{u}}, \quad (1)$$

где λ, μ – постоянные Ламэ, Δ – оператор Лапласа.

Разложим вектор перемещения $\mathbf{u}$ на две составляющие с помощью скалярного Φ и векторного Ψ потенциалов [2]:

$$\mathbf{u} = \operatorname{grad} \Phi + \operatorname{rot} \Psi. \quad (2)$$

Выразим каждую компоненту вектора перемещения $\mathbf{u}$ из уравнения (2), применяя операции градиента и ротора в цилиндрических координатах.

В случае осевой симметрии компонента перемещения u_θ равна нулю. Т.к. перемещения не меняются при изменении угла θ , то производные по θ также равны нулю. Таким образом

$$u_r = \frac{\partial \Phi}{\partial r} - \frac{\partial \Psi}{\partial z}, \quad u_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{\Psi}{r} \quad (3)$$

Подставим выражение (2) в (1). И после упрощения получим:

$$\operatorname{grad}[(\lambda + \mu)\Delta \Phi - \rho \ddot{\Phi}] + \operatorname{rot}(\mu \Delta \Psi - \rho \ddot{\Psi}) = 0. \quad (4)$$

Равенство (4) будет, соблюдаться, если аргументы операций градиента и ротора равны нулю. Принимая во внимание следующие выражения

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad (5)$$

где c_1 и c_2 – скорость продольной и поперечной волны [2], получим систему двух волновых уравнений

$$\Delta\Phi - \frac{1}{c_1^2}\ddot{\Phi} = 0, \quad \Delta\Psi - \frac{1}{c_2^2}\ddot{\Psi} = 0. \quad (6)$$

В результате система уравнений (6) в цилиндрической системе координат запишется в виде

$$\frac{1}{r}\frac{\partial\Phi}{\partial r} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2} - \frac{1}{c_1^2}\ddot{\Phi} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial\Psi}{\partial r} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2} - \frac{\Psi}{r^2} - \frac{1}{c_2^2}\ddot{\Psi} = 0. \quad (8)$$

Применим метод разделения переменных для нахождения функций Φ и Ψ :

$$\Phi(r, z, t) = P(r) \cdot Q(z) \cdot T(t), \quad \Psi(r, z, t) = R(r) \cdot S(z) \cdot N(t). \quad (9)$$

Подставим выражения (9) в уравнения (7) и (8). Здесь и далее будем считать, что производная, записанная с помощью штрихов, означает дифференцирование функции по ее аргументу.

$$\frac{1}{P}\left[P'' + \frac{1}{r}P'\right] - \frac{1}{c_1^2}\frac{T''}{T} = -\frac{Q''}{Q}, \quad \frac{1}{R}\left[R'' + \frac{1}{r}R'\right] - \frac{1}{c_2^2}\frac{N''}{N} - \frac{1}{r^2} = -\frac{S''}{S}. \quad (10)$$

Введем две константы разбиения такие, что

$$-\frac{Q''}{Q} = \gamma^2, \quad -\frac{S''}{S} = \vartheta^2. \quad (11)$$

Эти константы будут являться собственными числами для функций $Q(z)$ и $S(z)$.

С учетом (11) получим два дифференциальных уравнения

$$Q'' + \gamma^2 Q = 0, \quad S'' + \vartheta^2 S = 0. \quad (12)$$

Общие решения уравнений (10) запишутся в виде

$$Q_\gamma(z) = A_\gamma e^{i\gamma z} + C_\gamma e^{-i\gamma z}, \quad S_\vartheta(z) = B_\vartheta e^{i\vartheta z} + D_\vartheta e^{-i\vartheta z}. \quad (13)$$

где A_i, B_i, C_i, D_i – произвольные постоянные.

Собственные функции (13) определяют волны, бегущие в положительном и отрицательном направлении оси z . При этом собственные числа являются волновыми числами такой волны. В связи с этим пусть

$$\gamma = \vartheta = k.$$

Т.к. мы рассматриваем только полубесконечный стержень, то будем учитывать только волны, бегущие в положительном направлении.

Таким образом, собственные функции (13) перепишем в виде

$$Q_k(z) = A_k e^{ikz}, \quad S_k(z) = B_k e^{ikz}. \quad (14)$$

Введем еще две постоянных разбиения:

$$-\frac{1}{c_1^2} \frac{T''}{T} = \xi^2, \quad -\frac{1}{c_2^2} \frac{N''}{N} = \chi^2. \quad (15)$$

Эти константы будут являться собственными числами для функций $T(t)$ и $N(t)$.

Из (15) получим два дифференциальных уравнения

$$T'' + c_1^2 \xi^2 T = 0, \quad N'' + c_2^2 \chi^2 N = 0. \quad (16)$$

Таким образом, общие решения уравнений (16) запишутся в виде

$$T_\xi(t) = F_\xi e^{i\xi c_1 t} + C_\xi e^{-i\xi c_1 t}, \quad N_\chi(t) = K_\chi e^{i\chi c_2 t} + D_\chi e^{-i\chi c_2 t}. \quad (17)$$

где C_i, D_i, F_i, K_i – произвольные постоянные.

Форма записи гармонической волны, распространяющейся в положительном направлении оси z , определяется соотношением вида [3]

$$A(z, t) = A_0 e^{-i(\omega t - kz)}. \quad (18)$$

Отсюда можно сделать вывод, что функции (17) описывают зависящую от времени компоненту гармонической волны, которая распространяется с некоторой частотой. При этом в выражениях (17) условию (18) удовлетворяют только слагаемые при постоянных C_i и D_i . Остальные слагаемые выражения (17) исключаем в связи с несоответствия условию (18).

Роль частоты в функциях (17) выполняют множители ξc_1 и χc_2 .

Пусть

$$\xi = k_1 = \frac{\omega}{c_1}, \quad \chi = k_2 = \frac{\omega}{c_2}. \quad (19)$$

где k_1 и k_2 – волновые числа продольной и поперечной волны, соответственно, а c_1 и c_2 – их фазовые скорости.

С учетом вышеизложенного собственные функции (17) перепишем в виде

$$T_k(t) = C_k e^{-i\omega_k t}, \quad N_k(t) = D_k e^{-i\omega_k t}. \quad (20)$$

Из уравнений (10) с учетом (12) и (15) получаются еще два дифференциальных уравнения

$$r^2 P'' + rP' + Pr^2 \alpha^2 = 0, \quad r^2 R'' + rR' + R(r^2 \beta^2 - 1) = 0. \quad (21)$$

где $\alpha^2 = \xi^2 - \gamma^2 = k_1^2 - k^2$, $\beta^2 = \chi^2 - \vartheta^2 = k_2^2 - k^2$.

Сделаем замену переменной: $r\alpha = h$, $r\beta = g$.

Следовательно, функции P и R удовлетворяют уравнениям

$$h^2 P'' + hP' + Ph^2 = 0, \quad g^2 R'' + gR' + R(g^2 - 1) = 0. \quad (22)$$

Выражения (22) являются уравнениями Бесселя [1]. С учетом обратной замены переменной общее решение уравнений (22) запишется в виде

$$P_k(r) = F_k J_0(\alpha_k r) + M_k Y_0(\alpha_k r), \quad R_k(r) = K_k J_1(\beta_k r) + W_k Y_1(\beta_k r). \quad (23)$$

где F_i , K_i , M_i , W_i – произвольные постоянные, J_0 и J_1 – цилиндрические функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка, Y_0 и Y_1 – цилиндрические функции Бесселя второго рода нулевого и первого порядка.

Собственные функции (23) описывают компоненту волны, которая зависит от радиуса стержня. Функция Бесселя второго рода Y_i не ограничена в окрестности нуля, поэтому для сплошного стержня необходимо исключить слагаемые с этой функцией из выражений (23). Таким образом, собственные функции (23) переписутся в виде

$$P_k(r) = F_k J_0(\alpha_k r), \quad R_k(r) = K_k J_1(\beta_k r). \quad (24)$$

Собственные функции для потенциалов с учетом (14), (20) и (24) запишутся в виде

$$\Phi_k = M_k e^{ikz} e^{-i\omega_k t} J_0(\alpha_k r), \quad \Psi_k = N_k e^{ikz} e^{-i\omega_k t} J_1(\beta_k r). \quad (25)$$

где M_i , N_i – постоянные, полученные в результате перемножения постоянных A_i , B_i , C_i , D_i , F_i , K_i .

Собственные функции компонент перемещения с учетом (3) и (25) определяются по формуле:

$$\begin{aligned} \bar{u}_r(r, z, t) &= e^{-i(\omega_k t - kz)} \left(\frac{dJ_0(\alpha_k r)}{dr} M_k - ik J_1(\beta_k r) N_k \right), \\ \bar{u}_z(r, z, t) &= e^{-i(\omega_k t - kz)} \left(ik J_0(\alpha_k r) M_k + \left(\frac{dJ_1(\beta_k r)}{dr} + \frac{J_1(\beta_k r)}{r} \right) N_k \right). \end{aligned} \quad (26)$$

Таким образом, получены выражения для собственных функций компонент вектора перемещений. В дальнейшем, выражения (26) могут быть использованы для выведения характеристического уравнения.

Список литературы

1. Ватсон Г. Теория бесселевых функций. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1949. – 799 с.
2. Новацкий В. Теория упругости. / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
3. Савельев И. В. Курс общей физики / Под редакцией Л. И. Гладнева, Н. А. Михалина, Д. А. Миртова. – 3-е изд. – М.: Наука, 1988. – Т. 2. – 496 с.

РАЗРАБОТКА МАКЕТА ПОЛНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖАНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ЗАДАНИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПАРАМЕТРОВ ПОЛЬДЕРНЫХ СИСТЕМ

Бобарыкин Н.Д.

профессор, док. тех. наук, профессор,
Калининградский государственный технический университет,
Россия, г. Калининград

Графова Е.Н.

доцент, канд. тех. наук, доцент,
Калининградский государственный технический университет,
Россия, г. Калининград

Седов Р.Л.

доцент, канд. тех. наук, доцент,
СПбГУП, Россия, г. Санкт-Петербург

Создан макет технологической системы управления поддержанием уровня грунтовых вод в польдерных системах (СП УГВ ПС), обеспечивающий оптимальную влажность почвы У ПС, на основе решения обратной задачи и базе промышленного контроллера Micro PC фирмы Octagon Systems, который включает программное обеспечение и исполняющее устройства. При этом разработано автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора (технолога), которое является верхним уровнем контроллера, включает в себя персональный компьютер с программным обеспечением, устройство вывода на печать и т.д.

Ключевые слова: аппроксимация трехмерных функций, решение обратных задач, прямое математическое моделирование, оптимизация, теория управления, польдерные системы, АРМ оператора.

Ранее разработан алгоритм расчёта максимально возможного потока влаги от грунтовых вод U_{op} при оптимальных значениях УГВ H_{op} и высоты корнеобитаемого слоя hk_{op} на основе оптимизации целевой функции [1].

Система управления УГВ, обеспечивает необходимую оптимальную влажность почвы ПС, организуется в виде распределённой двухуровневой системы на базе промышленного контроллера MicroPC фирмы Octagon Systems и включает в себя импортную и отечественную элементную базу приборов и средств автоматизации, выполняющую измерения, контроль, регистрацию, регулирования параметров польдерных систем.

Польдерные системы включают в себя: проводящие открытые каналы сети ПС с прилегающими к ним осушаемым массивам, капиллярный вертикальный перенос влаги, дренажные системы, что еще усложняется и структурой обрабатываемых данных, в частности, входных и выходных параметров, выполняемых на основе трехмерной нестационарной математической модели польдерных систем (ПС) [1], является решение обратной задачи, которое

строится на основе трехмерного функционала потока влажности почвы $U(Q, hk_{op}, H)$, при этом управления УГВ осуществляется путем варьирования Q [2].

Верхний уровень контроллера представляет собой автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора, которое включает в себя персональный компьютер (ПК), устройство вывода на печать и блок бесперебойного питания (ББП). На мониторе ПК оператора – технолога выводится мнемосхема УГВ ПС в виде мультипликационного изображения текущего рабочего состояния оборудования. На мнемосхеме в зелёном окне отображаются параметры работы участка и динамика режимных параметров процесса для каждого элемента СУ и открытых проводящих каналов польдерных систем, состояния насосных станций (степень открытия – закрытия). Параметры, выходящие за заданный диапазон, выделяются жёлтым (предупредительная) или красным (аварийная сигнализация) цветом окна. В СУ предусмотрена сигнализация об отключения несоосных станций. При этом включается световая и звуковая сигнализация. Для проведения плановых осмотров оборудования и выполнения ремонтных работ приглашается наладчик. Оператор наблюдает за ходом процесса увлажнения корневой системы почвы ПС, а в аварийной ситуации при отказе технических средств частично или полностью принимает на себя управление участком, которое осуществляется с удалённого терминала по сети Ethernet или компьютером, подключенным непосредственно к контроллеру нижнего уровня Octagon по протоколу RS232.

Информационное обеспечение системы управления ПС организуется в виде базы данных, которая содержит информацию о длительности процесса увлажнения почвы ПС $t_{ПСi}$ и технологического цикла $T_{ТЦi}$ для размерного ряда i воды из проводящих каналов, и обеспечивает ввод с пульта и получение любой необходимой информации в простой и удобной форме оператором – технологом. При поступлении (забора) i воды из проводящих каналов в осушаемый массив, оператор с помощью соответствующего математического и программного обеспечения выбирает нужный режим.

Таким образом, верхний уровень системы микропроцессорного управления осушения (увлажнения) земельного массива реализует гибкую стратегию управления ПС, координирует взаимодействие всех элементов СП УГВ при работе их в едином комплексе, включая операции по транспорту воды в ёмкости, необходимые для полива в засушливые сезоны года.

Контроллер Octagon нижнего уровня позволяет осуществлять программное управление насосными станциями в соответствии с алгоритмом управления ПС; получать информацию по текущему состоянию технологического оборудования, которое определяется командами готовности к поставке влаги в почву ПС и переходу оборудования в режим ожидания. Таким образом, верхний уровень системы микропроцессорного управления осушения (увлажнения) земельного массива реализует гибкую стратегию управления ПС, координирует взаимодействие всех элементов СП УГВ при работе их в едином комплексе, включая операции по транспорту воды в ёмкости, необходимые для полива в засушливые сезоны года.

Контроллер Octagon нижнего уровня позволяет осуществлять программное управление насосными станциями в соответствии с алгоритмом управления ПС; получать информацию по текущему состоянию технологического оборудования, которое определяется командами готовности к поставке влаги в почву ПС и переходу оборудования в режим ожидания. Верхний уровень вырабатывает сигналы задания для нижнего уровня на основе результатов измерения увлажненности почвы, прогнозирования длительности подачи воды по проводящим каналам до заданной влажности корнеобитаемого слоя почвы, обеспечивая необходимую динамику ТП посредством переключением соответствующих насосных станций и координированного взаимодействия другими элементами технологической системы (рисунок). Контроллер Octagon обладает достаточным количеством дискретных и аналоговых входов – выходов для управления процессом увлажнения почвы; обеспечивает высокую надёжность (время наработки на отказ более 40 лет, что соответствует нормам MIL-217F).



Рис. Технологическая схема макета системы поддержания УГВ ПС

Разработку и отладку программного обеспечения производится на обычном персональном компьютере, установив в него платы ввода-вывода MicroPC, а затем переносить готовое программное обеспечение в контроллер,

где в ПЗУ уже находится ядро операционной системы DOS 6.22. При этом возможно использование практически любого программного обеспечения и средств разработки (например, DOS, Windows NT/95/98, QNX, Linux и др.), работающие на стандартной IBM PC платформе или специальные инструментальные пакеты и библиотеки (UltraLogik, RTKernel и др.).

На процессорной плате 6225, выполненной в формате MicroPC, установлены процессор 386SX/40 МГц и подсистемы ввода-вывода.

Модуль 6225 имеет интерфейс Ethernet (встроенный контроллер Ethernet 10Base-T с соединителем RJ-45) и содержит четыре последовательных и два параллельных порта. К другим техническим особенностям модуля можно отнести встроенный флэш-диск емкостью 1 Мбайт, поддержку до 144 Мбайт DiskOnChip, а также интегрированный датчик температуры с точностью ± 3 °C. Диапазон рабочих температур – от -40 до +85 °C. Плата совместима с операционными системами DOS, QNX и Linux, а программные драйверы позволяют подключать к изделию компоненты пользовательского интерфейса, такие как ЖК-дисплей и матричные клавиатуры.

Монтаж производится в каркас модели 5204 (AX), имеющей 4 слота для установки плат MicroPC и 8-разрядную шину ISA. На задней открытой стороне каркаса установлена пассивная объединительная плата с гнездами магистрали ISA. На боковых стенках имеются посадочные отверстия, предназначенные для крепления блока питания.

Для связи с системой управления используются платы ввода – вывода сигналов: плата расширения 5600-96 для обеспечения дискретных каналов ввода-вывода (96 каналов ввода-вывода, программируемые как вход или выход, низкая стоимость); плата AI16- 5A для аналоговых входов (16 однопроводных или 8 дифференциальных каналов с программируемым типом подключения).

Модуль AI16_5A предназначен для преобразования 16 сигналов напряжения в 14-разрядный дополнительный код. Каналы модуля имеют групповую гальваническую изоляцию и индивидуальную защиту от перенапряжения до 1000 В и могут быть программно настроены на прием 16 аналоговых сигналов с использованием однопроводной схемы подключения.

Для увеличения количества каналов аналогового ввода, опрашиваемых с помощью модуля AI16_5A, имеется возможность включения в состав системы до 16 коммутаторов аналоговых сигналов типа AIMUX_32A.

Для подключения исполнительных устройств использована плата TBI-16L, предназначенная для установки 8/12 модулей гальванической развязки серии 70L/73LC фирмы Grayhill. Интерфейс с модулями гальванической развязки реализуется с помощью модулей дискретного ввода-вывода UNIO или любых модулей с портом дискретного ввода-вывода. Платы могут устанавливаться на панель или DIN-рейку. Совместно с платой использованы модули 70L-OACA-L Dual AC Output Module, 240 VAC фирмы Grayhill.

Технические характеристики контроллера MicroPC фирмы Octagon Systems: процессор 80386SX/40 МГц; ОЗУ до 8 Мбайт EDO; BIOS Phoenix с промышленными расширениями; MS-DOS 6.22 и ПО TCP/IP стека в ПЗУ;

система снижения потребляемой мощности; флэш-диск DiskOnChip 2000 до 144 Мбайт; четыре последовательных порта RS-232/422/485; два параллельных порта с поддержкой режимов EPP и ECP; контроллеры НЖМД и НГМД; контроллер Ethernet 10Base-T.

Преимуществами данного подхода являются: архитектура IBM PC и лежащая в ее основе шина ISA, обеспечивающая функциональную гибкость, простоту модернизации и обслуживания; малый размер плат, обеспечивающий высокие механические характеристики системы и легкое встраивание изделий MicroPC в любое оборудование; возможность проведения разработки и отладки программного обеспечения на IBM PC с последующим переносом готового программного обеспечения в контроллер, где в ПЗУ уже находится ядро операционной системы DOS 6.22.

Список литературы

1. Графова Е.Н., Бобарыкин Н.Д. Математическое моделирование совершенных польдерных систем. – Калининград: Изд-во КГТУ, 2009. – 229 с.
2. Графова Е.Н., Бобарыкин Н.Д., Смертин В.М. Адаптивная математическая модель системы управления уровнем грунтовых вод с применением аппроксимаций многомерных функций/Е.Н. Графова [и др.] // Известия КГТУ. – 2011. – №23. – С.- 69-75.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОРИЕНТАЦИОННЫХ ВОЛН И ИХ РЕЛАКСАЦИЯ В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Денисова О.А.

заведующий кафедрой «Технологические машины и прикладная физика»,
д-р физ.-мат. наук, доцент,
Уфимский государственный университет экономики и сервиса, Россия, г. Уфа

Абрамишвили Р.Л.

аспирант 1 года обучения кафедры «Технологические машины и прикладная физика», Уфимский государственный университет экономики и сервиса,
Россия, г. Уфа

В представленной работе экспериментально исследовались гомеотропные слои нематических жидких кристаллов толщиной 35 – 105 мкм под действием импульсного сдвига. Объектом исследования был 4–октил–4'-цианобифенил (ОЦБ), находившийся в нематической фазе при 34,0 – 41,3 °С. Ячейка представляла собой двойной сэндвич. Диапазон амплитуд воздействия от 100 до 600 мкм. При увеличении скорости сдвига обнаружено уменьшение вязкости НЖК, появляется сдвиговое «утонение», при этом скорость релаксации деформации определяется двумя временами от линейной деформации и от сдвигового «утонения». При импульсе от 200 до 350 мкм слой НЖК разбивается на линейные домены, ортогональные направлению импульса, с периодом $d \approx 0,5$ мм. Дальнейшая временная динамика образующихся доменов не зависит от движения подвижной пластины.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, релаксация жидких кристаллов, импульсный сдвиг.

При деформации гомеотропного слоя нематического жидкого кристалла (НЖК) механическим импульсом препарат просветляется (наблюдается "вспышка"). Это явление было названо фотоупругостью. Еще в работе [1] изучалось влияние механического импульса и температуры на фотоупругий эффект. Было обнаружено, что он связан с микроструктурой мезофазы, степенью ее упорядоченности, зависит от температуры, величины и характера механического воздействия. В работе [2] рассматривалось уравнение для движения НЖК под действием зависящего от времени сдвига. Показано, что возможны два типа солитонов, которые движутся с зависящей от времени скоростью, пропорциональной скорости сдвига, сохраняя свою форму.

Нами исследовались нематические слои толщиной $h=35-105$ мкм с гомеотропной ориентацией молекул жидкого кристалла. Объектом исследования служил 4-октил-4'-цианобифенил (ОЦБ), который находится в нематической фазе при $34,0 - 41,3$ °С. Применялся метод фонера [3-5]. Для создания в образце НЖК сдвиговых импульсных возмущений мембрана вибратора соединялась при помощи волновода с подвижной пластиной, свободно центрируемой силами натяжения. Измерение амплитуды колебаний тонкой подложки ячейки производилось индуктивным способом. Исследуемый диапазон амплитуд $a=100-600$ мкм.

Рассмотрим воздействие импульса на гомеотропно ориентированный слой нематического ЖК толщиной $h = 35$ мкм. Опуская промежуточные выкладки, выпишем уравнения движения НЖК для скорости и директора сформулируем начальные и граничные условия. При выбранной геометрии уравнения движения континуума длинных осей и центров инерции молекул соответственно имеют вид [6]:

$$\begin{aligned} K_{11} \frac{\partial^2 \delta n}{\partial y^2} + K_{33} \frac{\partial^2 \delta n}{\partial z^2} - \eta_4 \frac{\partial \delta n}{\partial t} + \eta_1 \frac{\partial v}{\partial z} &= 0, \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} &= \eta_o \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} - \eta_1 \frac{\partial^2 \delta n}{\partial z \partial y} + \eta_3 \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

здесь K_{ii} , η_i – коэффициенты упругости Франка и вязкости Лесли. Для упрощения выражений положено $0,5(\alpha_4 + \alpha_5 - \alpha_2) = \eta_3$, $\eta_4 = \alpha_3 - \alpha_2 = \gamma_1$, $\eta_1 = -\alpha_2$, $\alpha_1 + \alpha_2 = \eta_o$. В дальнейшем положим отклонения директора малыми, т.е. $\delta n \sim \theta \ll 1$. Сформулируем начальные и граничные условия для директора и скоростей. Поместим начало координат в середину НЖК-слоя. Из постановки задачи следует:

$$\theta|_{z=\pm d} = 0, \quad \theta|_{t=0} = 0, \quad (2)$$

где $\pm d$ – координаты поверхностей ограничивающих НЖК. Выберем возмущение в общей форме. Тогда

$$v|_{z=-d} = f(y, t), \quad v|_{z=+d} = 0, \quad v|_{t=0} = 0. \quad (3)$$

Решение задачи (1-3) в общем виде даже в линейном приближении представляет большую трудность. Поэтому ограничимся рассмотрением слу-

чая, когда возмущение есть функция лишь времени. В этом случае уравнения движения имеют вид [6]:

$$\begin{aligned} K_{33} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - \gamma_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} - \alpha_2 \frac{\partial v}{\partial z} &= 0, \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} - \alpha_2 \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial t} - \frac{1}{2}(\alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_2) \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнения (4) при условии (1-3) легко решаются методом преобразований Лапласа [7]. В пространстве изображений выражение для скорости [6]

$$\bar{v} = F(p) \frac{\sin \lambda_2 d \operatorname{sh} \lambda_1 z + \operatorname{sh} \lambda_1 d \sin \lambda_2 z}{\sin \lambda_2 d \operatorname{sh} \lambda_1 d}.$$

Здесь λ_1 и λ_2 – корни характеристического уравнения системы (1), $F(p)$ изображение функции возмущения $f(t)$. Характеристическое уравнение, соответствующее системе уравнений (1) имеет вид [6]:

$$\frac{\eta_3}{\eta_4} \lambda^4 + \frac{\eta_1^2 - \rho K_{33} - \eta_3 \eta_4}{K_{33} \eta_3} p \lambda^2 + \frac{\rho p^2 \eta_4}{\eta_3 K_{33}} = 0.$$

В случае импульсных возмущений, рассмотренных в работе [7], смещение пластины можно представить в виде $y = y_o \delta(t)$, то есть $\dot{y}|_{z=d} = v_o \delta(t)$. Тогда имеем [6]:

$$\begin{aligned} v &= v_o \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[- (2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4|\lambda_o^2|d^2} t \right] \frac{\sin \lambda_2^{(n)} d \operatorname{sh} \lambda_1^{(n)} z + \sin \lambda_2^{(n)} z \operatorname{sh} \lambda_1^{(n)} d}{2 \operatorname{sh}(\lambda_1 \pi / \lambda_o^2 d) (2n+1)^2}, \\ \theta &= \frac{\rho v_o}{\eta_1} \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[- (2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4|\lambda_o^2|d^2} t \right] \left[\operatorname{sh} \lambda_2^{(n)} (2n+1)^2 (\lambda_1^{(n)} \pi / \lambda_o^2 d^2) \right]^{-1} \cdot \\ &\cdot \left[\{ 1 / \lambda_1^{(n)} (\sin \lambda_2^{(n)} d \operatorname{ch} \lambda_1^{(n)} z - \sin \lambda_2^{(n)} d \operatorname{ch} \lambda_1^{(n)} d) - 1 / \lambda_2^{(n)} (\operatorname{ch} \lambda_1^{(n)} d \sin \lambda_2^{(n)} z - \right. \\ &- \operatorname{ch} \lambda_1^{(n)} d \sin \lambda_2^{(n)} d) \} - v_o \eta_3 / \eta_1 [\lambda_1^{(n)} (\sin \lambda_2^{(n)} d \operatorname{ch} \lambda_1^{(n)} z - \sin \lambda_2^{(n)} d \operatorname{ch} \lambda_1^{(n)} d)] - \\ &- \lambda_2^{(n)} (\operatorname{ch} \lambda_1^{(n)} d \sin \lambda_2^{(n)} z - \operatorname{ch} \lambda_1^{(n)} d \sin \lambda_2^{(n)} d) \} \left[(2n+1)^2 \frac{\pi^2 t}{4|\lambda_o^2|d^2} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где $\lambda_o^2 = -\frac{\alpha_2^2 - \eta_3 \gamma_1 - \rho K_{33}}{K_{33} \eta_3} - \left[\left\{ \frac{\alpha_2^2 - \eta_3 \gamma_1 - \rho K_{33}}{K_{33} \eta_3} \right\}^2 + \frac{\rho \gamma_1}{K_{33} \eta_3} \right]^{1/2}, \quad \lambda_{1,2}^{(n)} = \frac{\pi (2n+1)}{2d}.$

Значение λ_o^2 со знаком плюс отбрасывается по физическим соображениям, т.к. дает нарастающее решение. Таким образом, в линейном приближении следует, что возмущение директора релаксирует по экспоненциальному закону [6].

Рассмотрим теперь экспериментальную ситуацию. На рис. 1а представлена фотография возбуждающего сигнала и отклика. При относительно малых величинах импульса (длительность импульса $\Delta t \approx 0,065$ с, форма импульса представлена на рис. 1б) слой однородно просветляется и оптический сигнал релаксирует до нуля, что соответствует видимому темному полю. На рис. 1в представлена зависимость относительной величины I/I_o светопропускания от времени t при величине импульса $a \approx 250$ мкм.

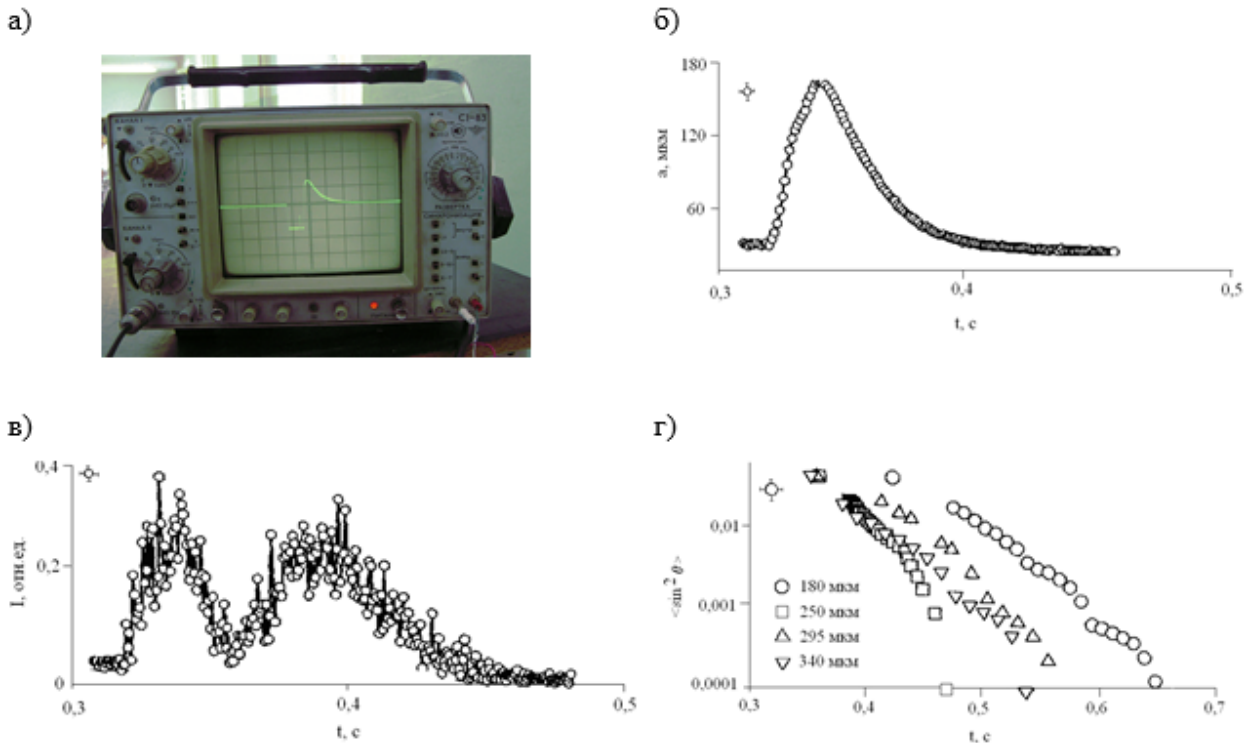


Рис. 1. а) Фотография возбуждающего сигнала и отклика, релаксационные зависимости:
 б) формы воздействующего импульса.
 в) интенсивности оптического сигнала,
 г) среднего квадрата синуса постоянного угла наклона директора.

Наличие осцилляции интенсивности прошедшего поляризованного света связаны с набегом оптической фазы $\delta > \pi$, вследствие изменения показателя преломления и релаксационными процессами реориентации директора в исходное гомеотропное состояние. В этом случае интересной представляется временная зависимость $\langle \sin^2 \theta \rangle$, где θ – угол наклона директора относительно нормали к поверхности (рис. 1г). Проведем количественные оценки

времен τ_n , следуемые из формулы (5). Так как

$$\tau_n = \frac{\tau_o}{(2n+1)^2},$$

где $\tau_o = \left(\frac{2\lambda_o d}{\pi} \right)^2$, то для слоя НЖК полутолщиной $d = h/2 = 1,75 \cdot 10^{-5}$ м, вычисляя величину $\tau_o \approx 1$ с. Значения материальных параметров $K_{33} = 7,86 \cdot 10^{-12}$ Н; $\alpha_2 = -77,0 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м³; $\eta_3 = 101,4 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м³; $\alpha_4 = 63,4 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м³; $\alpha_5 = 62,4 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м³; $\gamma_1 = 72,8 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м³; $\rho = 10^3$ кг/м³ взяты из обзора [9]. Тогда получим спектр времен τ_n . Например, для $n = 0, 1$ – времена $\tau_0 \approx 1$ с, $\tau_1 \approx 0,11$ с и сравним эти значения с экспериментальными $\tau_0 \approx 1,14$ с и $\tau_1 \approx 0,25$ с.

При увеличении скорости сдвига вязкость нематика, как правило, уменьшается, появляется так называемое сдвиговое «утонение», поэтому скорость релаксации деформации определяется двумя временами от линейной деформации и от сдвигового «утонения». Коэффициент для сдвигового

«утонения» в этом случае [10]:

$$k_c = 6D_r \left[\frac{9}{4} \left(\frac{c}{c^*} - \frac{8}{9} \right) + \frac{3}{4} \left(\frac{c}{c^*} \left(\frac{c}{c^*} - \frac{8}{9} \right) \right)^{1/2} \right],$$

где D_r – коэффициент вращательной диффузии, c – исходная концентрация в изотропном состоянии, c^* – объемная концентрация (в нашем случае $c^*=1$).

Можно построить зависимости времен релаксации сигнала t от величины воздействующего импульса a , которые представлены на рис. 2. На рис. 2а представлены амплитудные зависимости времен релаксации. Из зависимостей так же следует, что в области значений амплитуд от 200 до 350 мкм имеет место уменьшение времен $\tau(a)$ (рис. 2а) и $t(a)$ (рис. 2б), что связано с нелинейными процессами, происходящими в слое нематика [11-13].

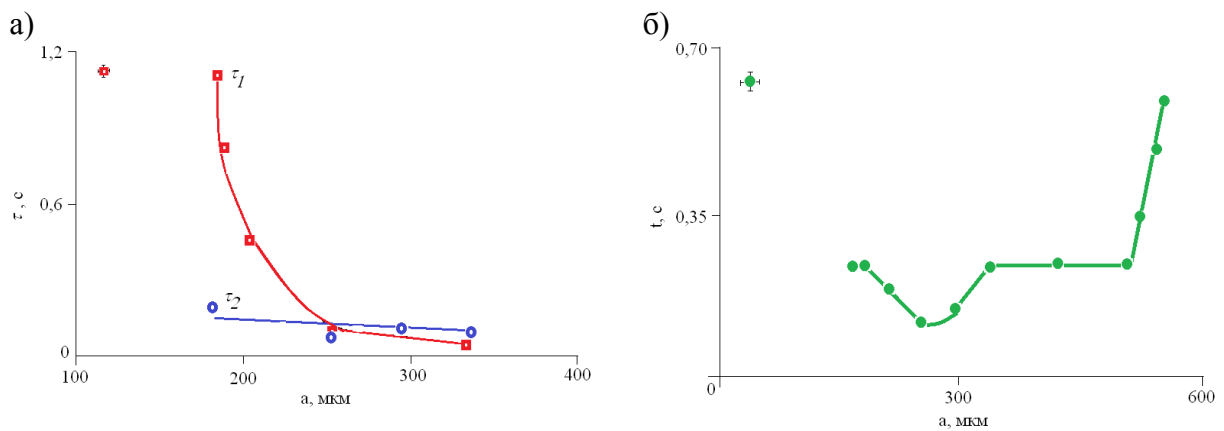


Рис. 2. Амплитудные зависимости: а) времен релаксации, б) времени существования оптического сигнала.

Визуальный анализ за состоянием нематического слоя показывает, что при величинах импульсов от 200 до 350 мкм характер релаксации директора принципиально отличается от состояния с однородной деформацией поля директора. В этом случае слой НЖК разбивается на линейные домены, перпендикулярные направлению импульса, с периодом $d \approx 0,5$ мм. Дальнейшая временная динамика образующихся доменов не зависит от движения подвижной пластины. При этом распространение ориентационных волн происходит по и против направления сдвигового импульса так, что при этом формируются ориентационные волны, которые, при взаимодействии их фронтов, аннигилируют. В этой ситуации время релаксации резко уменьшается. Если и далее увеличивать значение импульса, просветление НЖК становится опять однородным и ориентационные волны не формируются. Зависимость $t(a)$ выходит сначала на плато, а затем при значении амплитуды 500 мкм начинает резко возрастать, что связано уже с большими углами наклона директора в самом слое, разрывами ориентации – переворотом директора на углы $\theta \geq \pi/2$.

Таким образом, в данной статье описаны образование и релаксация ориентационных волн в гомеотропных слоях нематиков при импульсном сдвиге.

Список литературы

1. Капустин, А.П. Фотоупругие явления в некоторых жидких кристаллах [Текст] / А.П. Капустин, З.Х. Куватов, А.И. Трофимов // Учен зап. Ивановского гос.пед. ин-та. - 1972. - №99. - С. 64 – 70.
2. Xu, Gang. Perturbed solitons in NLC under time-dependent shear [Text] / Xu Gang, Shu Chang-Qing, Lei Lin // Phys. Rev. A, Gen. Phys. - 1987. - V. 36. - №1. - P. 277 – 284.
3. Денисова, О.А. Один из методов экспериментальных исследований жидких кристаллов [Текст] / О.А. Денисова // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2013. - Т. 9. - № 2. - С. 107 – 113.
4. Денисова, О.А. Неравновесные структурные превращения жидких кристаллов в электрических полях и акустических потоках: Научное издание [Текст] / О.А. Денисова. - Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2012. -188 с.
5. Чувывров, А.Н. Физика жидких кристаллов: поверхность: Научное издание [Текст] / А.Н. Чувывров, О.А. Денисова, Ф.М. Гирфанова. - Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2009. - 324 с.
6. Кондратенко, В.К. Фотоупругий эффект в нематических жидких кристаллах [Текст] / В.К. Кондратенко, М.М. Фарзтдинов, А.Н. Чувывров // Физика твердого тела. - 1975. - Т. 17. - В. 3. - С. 795 – 799.
7. Детч, Г. Преобразования Лапласа и z-преобразования / Г. Детч. - М.: Мир, 1967. - 325 с.
8. Barnic, M.I. Dielectric regime of electrohydrodynamic instability in nematics [Text] / M.I. Barnic, L.M. Blinov, M.F. Grebenkin, A.N. Trufanov // Mol. Cryst. Liq. Cryst. - 1976. - V. 37. - P. 47.
9. Stephen, T.J., Straley J.P. // Rev. Mod. Phys. - 1974. - V. 46. - P. 617.
10. Дой, М. Динамическая теория полимеров / М. Дой, С. Эдвардс. - М.: Мир, 1998. - 440 с.
11. Баймакова, О.А. Генерация ориентационных волн в НЖК под действием сдвигового импульса / О.А. Баймакова, О.А. Скалдин, А.Н. Чувывров // Кристаллография. - 1999. - Т. 44. - № 3. - С. 544 – 547.
12. Денисова, О.А. Два времени релаксации ЖК при импульсном воздействии [Текст] // Международное научное издание «Современные фундаментальные и прикладные исследования». - 2012. - № 3(6). - С. 39-42.
13. Денисова, О.А. Механизмы релаксации НЖК при действии импульсного сдвига [Текст] // Научное обозрение. - 2012. - № 6. - С. 77-81.

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ РЕГИСТРАЦИИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ КРЕМНИЯ Si-I – Si-II ПРИ НАНОИНДЕНТИРОВАНИИ¹

Дмитриевский А.А.

профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики,
докт. физ.-мат. наук, доцент,
Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,
Россия, г. Тамбов

Ефремова Н.Ю.

доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики,
канд. физ.-мат. наук, доцент,
Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,
Россия, г. Тамбов

Гусева Д.Г.

аспирант кафедры теоретической и экспериментальной физики,
Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,
Россия, г. Тамбов

Жигачев А.О.

аспирант кафедры теоретической и экспериментальной физики,
Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,
Россия, г. Тамбов

В рамках развития оригинального *in situ* метода регистрации фазовых превращений кремния Si-I – Si-II в условиях сосредоточенных нагрузок подобраны оптимальные параметры измерительной ячейки и измерительной аппаратуры (геометрия образца, скоростной режим внедрения/извлечения индентора, длительность выдержки индентора при постоянной нагрузке, а также максимальная глубина внедрения индентора). Это позволит добиваться максимального соотношения сигнал/шум при синхронной регистрации *P-h*-диаграмм и изменении электрического сопротивления кремния.

Ключевые слова: кремний, наноиндентирование, фазовые превращения, металлизированная фаза, *in situ* регистрация.

В процессе микро- и наноконтактных воздействий (механическая шлифовка и полировка, создание точечных контактов и пр.) могут развиваться высокие давления, достаточные для протекания фазовых превращений (ФП) в кремнии [1, с. 2214, 2, с. 1564]. На сегодняшний день известны 13 различных фаз кремния, формируемых в процессе повышения давления, его последующего понижения и отжига при нормальном давлении. Модификация фазового состава в приповерхностной области сопровождается изменением свойств [3, с. 758, 4, с. 62, 5, с. 73]. Следовательно, механические воздействия, ФП и свойства приповерхностных слоев кремния являются взаимосвязанными.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-02-04797 а.

К наиболее распространенным методам регистрации ФП можно отнести анализ P - h -диаграмм (зависимость нагрузка – глубина внедрения индентора) и спектров Рамановского смещения. При этом первый из указанных методов является наиболее экспрессным, но менее информативным (позволяющим лишь регистрировать момент фазовых превращений, но не дающем информации о фазовом составе деформируемой области). Второй – напротив, достаточно информативен (позволяет идентифицировать фазовый состав), но требует гораздо большего времени для сканирования деформированной области и анализа спектров. Кроме того, технические ограничения не позволяют исследовать методом Рамановской спектроскопии фазы высокого давления (Si-X, Si-VII, Si-VI, Si-V, Si-XI и Si-II). Между тем, обладая низким удельным сопротивлением ($\rho_{\text{Si-II}} = 10^{-4} \text{ } \Omega\text{cm}$ [6, с. 177, 7, с. 61]) металлизированная фаза кремния Si-II и связанные с ней ФП представляют значительный интерес, как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. В связи с этим, целью работы являлось установление оптимальных параметров образцов и измерительной аппаратуры для *in situ* метода регистрации фазовых превращений кремния Si-I – Si-II, основанного на синхронной регистрации электрического сопротивления и P - h -диаграммы в процессе наноиндентирования.

Принципиальная схема измерительной ячейки, предложенная в 1972 г. Трефиловым В.И, Мильманом Ю.В. и Гридневой И.В. [6, с. 177,], представлена на рис. 1. Авторы [6, с. 177,] регистрировали сопротивление образца до индентирования, на стадии максимального внедрения индентора и после его извлечения. Анализируя разницу сопротивлений на разных стадиях индентирования они получали информацию (на основе данных об удельных сопротивлениях исходного образца и металлизированной фазы) о содержании фазы Si-II под индентором (на стадии максимального внедрения).

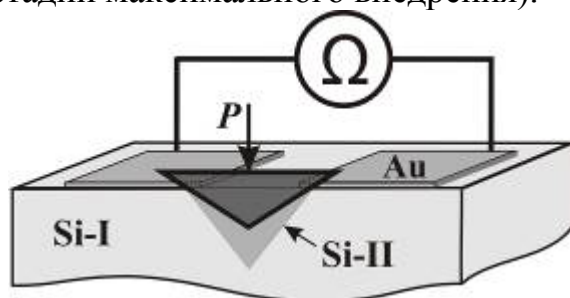


Рис. 1. Схематичное изображение среза измерительной ячейки с внедренным индентором

Современное оборудование позволяет комбинировать мониторинг электрического сопротивления образца с регистрацией P - h -диаграмм (в процессе динамического наноиндентирования) с высоким пространственным и временным разрешением. Для этого в настоящей работе образцы готовили следующим образом. На поверхность (111) монокристаллического кремния (КЭФ-10) термическим напылением в вакууме ($\sim 10^{-3} \text{ Pa}$) наносили слой золота толщиной $l \sim 150 \text{ nm}$. Такой слой позволяет с одной стороны получать надежный электрический контакт, с другой стороны – обеспечивает возможность формирования («вытравливания») в пленке сквозного зазора с использованием сфокусированного ионного пучка (рис. 2). Кроме того, золотая

пленка толщиной $l \sim 150$ nm практически не оказывает влияния на P - h -диаграмму при глубине внедрения индентора $h \geq 750 - 1000$ nm [8, с. 2113].

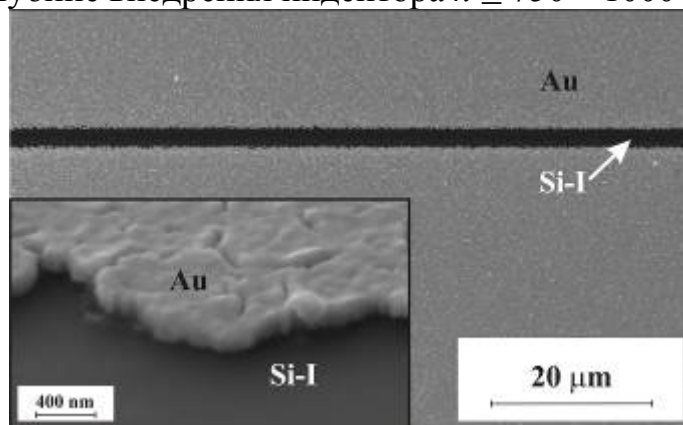


Рис. 2. СЭМ-изображение участка измерительной ячейки (в нанесенной на поверхность монокристалла кремния золотой пленке сформирован сквозной зазор).
На врезке представлено СЭМ-изображение участка измерительной ячейки в увеличенном масштабе

Ширину зазора $d \sim 2$ μm (рис. 2) выбирали таким образом, чтобы с одной стороны зазор обеспечивал надежный разрыв электрического контакта между двумя частями пленки и его было удобно наблюдать в оптический видоискатель индентометра, а с другой стороны – выполнялось требование $a \gg d$, где a – сторона отпечатка. Последнее условие необходимо для «замыкания» золотых пленок металлизированной фазой Si-II в процессе индентирования. Формирование зазора в пленке, визуализацию отпечатков индентора и элементное картирование осуществляли с использованием высокоразрешающего двухлучевого электронно-микроскопического комплекса Neon40 (фирма Carl Zeiss).

К сформированным таким образом контактам подключали стабилизированный источник питания, и с помощью цифрового измерителя тока и напряжения производили мониторинг электрического сопротивления R непосредственно в процессе индентирования (регистрации P - h -диаграммы). Индентирование пирамидой Берковича осуществляли с использованием ультрамикротвердомера DUH-W201 (фирма Shimadzu). Индентирование производили таким образом, чтобы центр и одна из вершин формируемого отпечатка находились примерно посередине зазора между золотыми пленками, а 2 другие вершины – «заминали» пленки как показано на рис. 3, а.

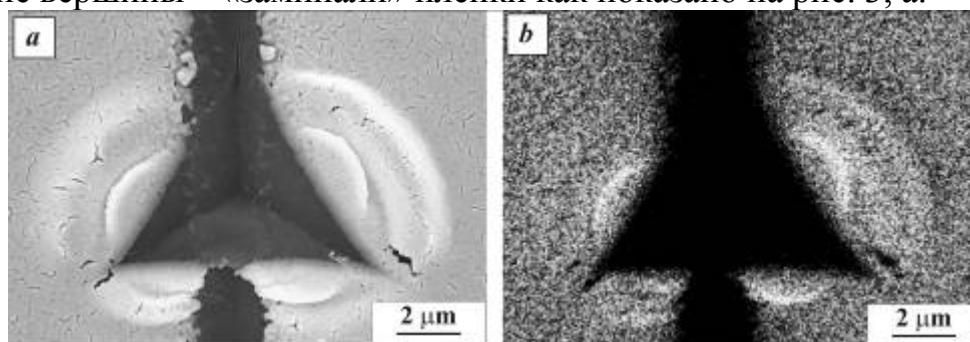


Рис. 3. СЭМ-изображение (а) и карта распределения золота (b) в области отпечатка индентора, сформированного в зазоре между золотыми пленками

Нагрузка на индентор нарастала линейно. При этом скорость нарастания нагрузки dP/dt варьировали в интервале от 3,5 мН/с до 23,5 мН/с. Это обеспечивало возможность достижения максимальной нагрузки $P_{\max} = 300$ мН и максимальной глубины внедрения индентора $h_{\max} \approx 1,5$ мкм за время t от ~ 86 с до ~ 13 с соответственно.

Регистрация и анализ относительного изменения электрического сопротивления R_t/R_0 , наблюдаемого в процессе индентирования образцов, позволили выявить следующие закономерности. До определенного этапа внедрения индентора ($h < 0,5$ мкм) сопротивление образца остается неизменным. Затем, (при $h > 0,5$ мкм) сопротивление падает с выходом в насыщение при достижении максимальной глубины внедрения индентора (рис. 4). На стадии разгрузки сопротивление сначала сохраняет пониженное значение, а затем начинает увеличиваться и достигает исходной величины еще до полного извлечения индентора. Отметим, что наблюдаемые изменения сопротивления образцов не связаны с замыканием золотых пленок частицами золота, оторвавшимися в процессе индентирования. Подтверждением этому служат данные элементного картирования, выполненного в области одного из отпечатков индентора (см. рис. 3, б). Видно, что в процессе индентирования золото «сдвигается» в навалы, тем самым обеспечивая отсутствие контакта. Таким образом, наблюдаемое изменение R_t/R_0 следует связывать с формированием (на определенной стадии индентирования) металлизированной фазы Si-II и «замыканием» ею золотых контактов.

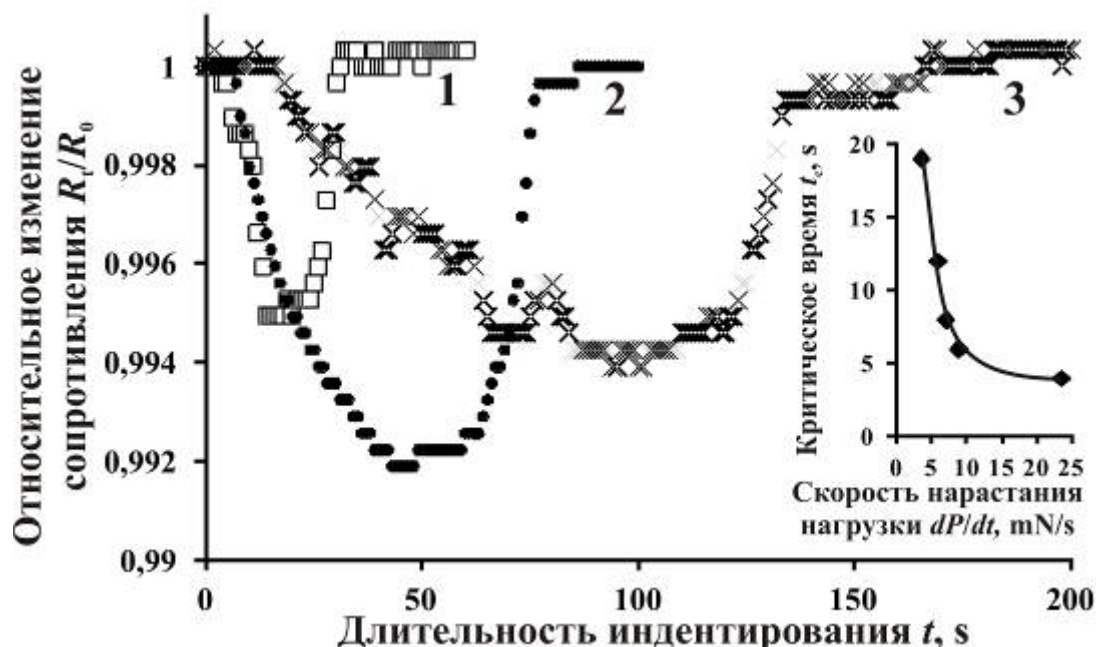


Рис. 4. Зависимости относительного изменения электрического сопротивления измерительной ячейки от длительности индентирования при скорости нарастания/сброса нагрузки $(dP/dt)_1 = 23,5$ мН/с – кривая 1, $(dP/dt)_2 = 7,06$ мН/с – кривая 2, $(dP/dt)_3 = 3,5$ мН/с – кривая 3. На врезке представлена зависимость критического времени индентирования (при котором появляются изменения R_t/R_0) от скорости нарастания нагрузки на индентор

Варьирование скоростного режима внедрения индентора сопровождается изменением длительности индентирования и, как следствие, критического значения времени индентирования, при котором наблюдается скачкообразное уменьшение R_t/R_0 (врезка к рис. 4). Важно отметить, что максимальное отклонение сопротивления от исходной величины наблюдается при средних скоростях внедрения индентора $dP/dt = 7,06 \text{ mN/s}$ (рис. 4, кривая 2). Кроме того, при малых значениях dP/dt зависимость $R_t/R_0(t)$ испытывает серию изломов (рис. 4, кривая 3), очевидно связанных с более интенсивным развитием радиальных трещин при малых скоростях относительной деформации в кремнии [8, с. 2113, 9, с. 34, 10, с. 2].

Таким образом, в работе подобраны оптимальные (для регистрации фазовых превращений под индентором Si-I – Si-II – Si-XII/Si-III) параметры измерительной ячейки (толщина золотой пленки $l \sim 150 \text{ nm}$, ширина сквозного зазора в пленке $d \sim 2 \text{ }\mu\text{m}$) и режимы индентирования (максимальная нагрузка $P = 300 \text{ mN}$, что соответствует максимальной глубине внедрения индентора $h_{\text{max}} \approx 1,5 \text{ }\mu\text{m}$, скорость нарастания нагрузки $dP/dt = 7,06 \text{ mN/s}$). Полученные данные позволяют добиваться максимальной чувствительности метода *in situ* регистрации фазовых превращений Si-I – Si-II и, производить количественную оценку объемной доли фазы Si-II в деформированной области.

Список литературы

1. Domnich, V. Effect of phase transformation on the shape of the unloading curve in the nanoidentification of silicon / V. Domnich, Yu.Gogotsi, Dub S. // Appl. Phys. Lett. – 2000. – V.76. – P.2214–2216.
2. Oliver, W.C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W.C. Oliver, G.M. Pharr // J. Mater. Res. – 1992. – V. 7. – P.1564.
3. Haberl, B. New insight into pressure-induced phase transitions of amorphous silicon: the role of impurities / B. Haberl, M. Guthrie, D.J. Sprouster, J.S. Williamsa, J.E. Bradby // J. Appl. Cryst. – 2013. – V. 46. – P. 758–768.
4. Дмитриевский, А.А. Фазовые превращения под индентором в кремнии, облученном низкоинтенсивным потоком бета-частиц / А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Ефремова, Ю.И. Головин, А.В. Шуклинов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2010. – № 3. – С. 62–65.
5. Головин, Ю.И. Влияние низкоинтенсивного бета-облучения на фазовые превращения в кремнии при микроиндентировании / Ю.И. Головин, А.А. Дмитриевский, А.В. Шуклинов, П.А. Косырев, А.Р. Ловцов // Известия ВУЗов. Серия Физика. – 2011. – Т. 54. – № 8. – С. 73–76.
6. Gridneva I.V. Phase transition in diamond-structure crystals during hardness measurements / I.V. Gridneva, Y.V. Milman, V.I. Trefilov // Phys. Stat. Sol. A. – 1972. – V. 14. – P. 177–182.
7. Дмитриевский, А.А. Влияние бета-облучения на фазовые превращения кремния Si-I $\rightarrow$ Si-II под индентором / А.А. Дмитриевский // ПЖТФ. – 2014. – Т. 40. – №.2. – С.61 – 67.
8. Головин, Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках (Обзор) / Ю.И. Головин // ФТТ. – 2008. – Т. 50. – №12. – С.2113-2142.
9. Головин, Ю.И. Изменения микротвердости кремния, индуцируемые слабоинтенсивным потоком электронов / Ю.И. Головин, А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Сучкова, М.Ю.

Толотаев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2007. – № 4. – С. 34- 36.

10. Дмитриевский, А.А. Влияние малодозового бета-облучения на микромеханические свойства кремния / А.А. Дмитриевский // Деформация и разрушение материалов. – 2013. – №.11. – С.2-11.

О ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПОТОКОВ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ РАДИАЦИИ

Егоров В.К.

с.н.с, к.ф.-м.н.,

Институт проблем технологии микроэлектроники (ИПТМ) РАН,
Россия, г. Черноголовка

Егоров Е.В.

м.н.с., Институт проблем технологии микроэлектроники (ИПТМ) РАН,
Россия, г. Черноголовка

В работе кратко описан механизм волноводно-резонансного распространения потоков рентгеновского излучения, основанный на концепции возникновения однородного интерференционного поля стоячей рентгеновской волны, и эффект нарушенного полного внутреннего отражения, характерный для частичного прохождения потоков оптического излучения через наноразмерные плоские щелевые зазоры. Сделано предположение, подтвержденное экспериментально, о возможности влияния на параметры наноразмерных потоков рентгеновской радиации, формируемых на выходе плоского рентгеновского волновода-резонатора, через взаимодействие интерференционных полей рентгеновских и оптических стоячих волн, возбуждаемых в этом резонаторе потоками характеристического рентгеновского и оптического излучений.

Ключевые слова: оптическое излучение, рентгеновские лучи, полное внешнее отражение, полное внутреннее отражение, стоячие волны, взаимодействие интерференционных полей.

Проблема управления параметрами потоков излучения различных длин волн становится актуальной когда возникает необходимость практического использования этих потоков. В случаях длинноволнового излучения решение такой проблемы не вызывает затруднений. Для радиочастотного диапазона разработан целый ряд средств и устройств, позволяющих легко менять длины волн и направления распространения сигнала, модулировать и перестраивать значения несущих частот [38]. При уменьшении длины волны излучения количество средств управления радиационными потоками уменьшается. Однако в оптическом диапазоне длин волн таких средств и возможностей еще оказывается достаточно. Хорошо известны зеркальное и полное внутреннее отражение света, его заметное преломление на границе прозрачных сред с различающимися преломляющими коэффициентами, а также ряд явлений, связанных с вариацией поляризации (эффект Брюстера, эффект Керра, эффект

Фарадея и др.) [17]. В то же время в области рентгеновских длин волн (1-0.01 нм) арсенал средств, способных изменять параметры потоков рентгеновского излучения, оказывается весьма ограниченным. Это – Брегговское отражение [30], эффект Боррмана [37] и полное внешнее отражение на плоском полированном материальном интерфейсе [4,5]. При этом следует отметить, что Брегговское отражение и эффект Боррмана характерны только для кристаллических структур, а полное внешнее отражение представляет собой универсальное явление, параметры которого зависят главным образом от плотности материала интерфейса [13]. Следует отметить, что Брегговская дифракция, полное внешнее отражение, а также тот факт, что показатель преломления материальных структур оказался меньше единицы¹ позволили создать целый ряд устройств, способных фокусировать рентгеновское излучение. Это – Френелевские зонные пластины [2], линзы Кумахова [14], а также рентгеновские преломляющие линзы [19]. Кроме того, в арсенале рентгеновской фотоники появилось специфическое устройство, названное плоским рентгеновским волноводом-резонатором [7]. Данное устройство, в основе функционирования которого лежит появление однородного интерференционного поля стоячей рентгеновской волны, способно концентрировать рентгеновскую радиацию, транспортировать ее почти без ослабления и формировать потоки наноразмерной ширины. Эти, а также целый ряд других устройств являются пассивными элементами рентгеновской фотоники. В какой-то мере активными устройствами могут считаться двойные поворотные монохроматоры, используемые на синхротронах для вариации энергии формируемого квазимонохроматического потока [41], и эффект модуляции рентгеновского потока в результате рассеяния на монокристаллической поверхности, возбуждаемой акустической волной [6]. В данной работе была сделана попытка изучить возможность влияния на параметры рентгеновского потока оптического излучения путем воздействия интерференционного поля стоячей оптической волны на однородное интерференционное поле стоячей рентгеновской волны, возбуждаемое рентгеновским излучением в плоском протяженном щелевом зазоре шириной менее половины длины когерентности излучения этого потока.

Особенности явлений невозмущенного и нарушенного полного внутреннего отражения потока оптического излучения в плоском протяженном щелевом зазоре

Изучение явления полного внутреннего отражения (ПВО) имеет многовековую историю. Характерные особенности этого явления были описаны И. Ньютоном в его монографии "Оптика", вышедшей в 1704 году. Смысл явления, достаточно полно представленного, например, в монографии Р. Дичьберна [31] состоит в том, что при падении потока оптического излучения на интерфейс, разделяющий две среды с разными показателями преломления, со

¹ Обращаем внимание, что введение показателя преломления рентгеновского излучения в материальной среде, как и усредненное значение диэлектрической проницаемости, принципиально некорректно, так как длина волны этого излучения меньше межатомного расстояния [39].

стороны среды с более высоким показателем, имеет место явление полного отражения этого потока вовнутрь этой среды. Это явление наблюдается для углов падения потока оптического излучения $\theta > \theta_k$ (θ_k – критический угол полного внутреннего отражения). Рисунок 1 показывает геометрию прохождения потока в условиях его падения на интерфейс для углов, не превышающих значение θ_k (а), и углов, превосходящих эту величину (б). В случае идеально прозрачных изотропных сред практически весь поток в геометрии (а) пройдет в оптически менее плотную среду. Во втором случае поток претерпит полное отражение на интерфейсе. При этом в менее плотной среде возникает так называемое "неоднородное" волновое поле [36]. Смысл неоднородности заключается в том, что с одной стороны оно является убывающим, а с другой – оно осциллирует [31]. Решение уравнений Максвелла для условий полного внутреннего отражения показывает, что эти факторы разделены по координатам. Экспериментально факт наличия осцилляций в "неоднородном" волновом поле легко доказывается явлением нарушенного полного внутреннего отражения оптического потока, модельная геометрия которого представлена на рисунке 1в. Нарушенное ПВО наблюдается в случае, когда две среды с высоким значением коэффициента преломления разделены узким зазором, среда которого характеризуется низким значением этого коэффициента. Ширина плоского щелевого зазора "d" определяет фактор разделения исходного оптического потока E_0 на отраженный E_1 и протунелировавший через зазор E_2 [43].

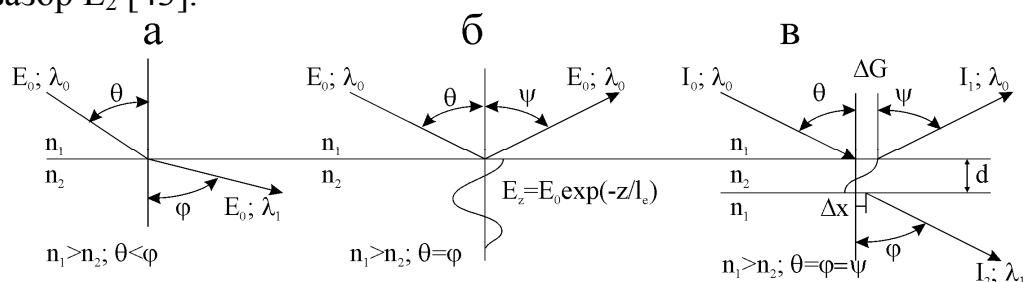


Рис. 1. Геометрия прохождения потока оптического излучения из среды с показателем преломления n_1 в среду с n_2 ($n_1 > n_2$) в области углов $\theta < \theta_k$ – критического угла полного внутреннего отражения (а); геометрия прохождения этого потока в условиях ПВО ($\theta > \theta_k$) (б); геометрия прохождения этого потока в условиях нарушенного ПВО ($\theta > \theta_k$, $d \sim \lambda_0$) (в), Δx – сдвиг потока после преодоления щелевого зазора, l_e – глубина уменьшения поля в е раз

Общепринятое рассмотрение всех трех явлений, графически интерпретированных на рисунке 1, основывается на абсолютной монохроматичности потока оптического излучения и игнорировании факта интерференции падающего и отраженного потоков, в то же время экспериментально обнаруженного для зеркального отражения света [21]. Он же характерен и для явлений невозмущенного и нарушенного полного внутреннего отражения [18]. Учет наличия интерференционного фактора заставил М. Милошевича ввести ряд уточнений в описание особенностей этих явлений. В то же время введение интерференционного фактора требует некоторого уточнения и в исходной парадигме. Дело в том, что при рассмотрении размера интерференционного поля появляется параметр степени монохроматичности излучения. Для абсо-

лотно монохроматического потока степень монохроматичности равна нулю и размер поля интерференции становится бесконечным, что экспериментально не подтверждается. При рассмотрении потоков электромагнитного излучения важно иметь ввиду, что любой их тип, рожденный в результате релаксации возбужденных состояний зонных, атомных или ядерных уровней, а также выделенных с помощью монохроматизации из непрерывного континуума, всегда характеризуется средней длиной волны λ_0 , степенью монохроматизации $\Delta\lambda$ и параметром длины когерентности $L=\lambda_0^2/\Delta\lambda$, который фактически характеризует продольный размер каждого фотона, составляющего поток излучения [27]. В этом случае размеры интерференционного поля будут ограничены величиной параметра длины когерентности излучения.

Еще одним важным фактором, который необходимо учитывать при рассмотрении явления ПВО оптического излучения, является смещение отраженного потока относительно падающего на некоторую экспериментально измеряемую величину, получившее название "сдвиг Гуса-Хансен" [11,28]. Теоретическое рассмотрение показало, что его наличие следует из детального анализа решений уравнений Максвелла, описывающих явление полного внутреннего отражения [29]. В то же время оценки показывают, что величина сдвига Гуса-Хансен существенно меньше длины когерентности оптического излучения, как лазерной, так и не лазерной природы. С учетом указанных факторов можно рассмотреть распространение квазимонохроматического оптического потока в оптической системе, эквивалентной сборке плоского рентгеновского волновода-резонатора [34], фрагмент которой вместе с четверть-цилиндрической призмой показан на рисунке 2.

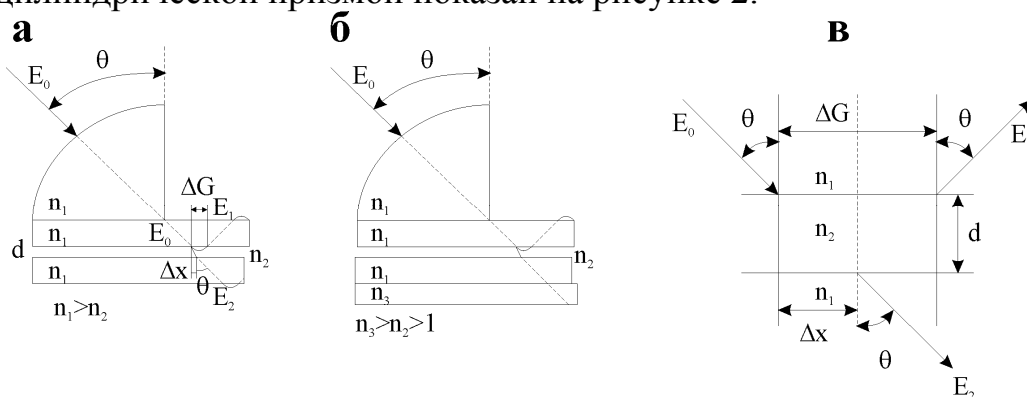


Рис. 2. Фрагмент рефлекторной сборки плоского рентгеновского волновода-резонатора с четверть-цилиндрической призмой для ввода потока оптического излучения в один из его рефлекторов. Показана геометрия нарушенного полного внутреннего отражения ($\theta > \theta_k$) для тунелирования потока через плоский щелевой зазор шириной d . ΔG – сдвиг Гуса-Хансен [11], Δx – сдвиг потока после преодоления щелевого зазора [12], $n_{21}=n_2/n_1$

В верхнем кварцевом рефлекторе, сопряженном с цилиндрической призмой, поле оптического излучения характеризуется величиной E_0 . Поскольку угол падения оптического потока больше значения критического угла полного внутреннего отражения для кварца, поле в воздушном щелевом зазоре будет определяться выражением [18,43]:

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_0 e^{-\frac{z}{\lambda_0} 2\pi \sqrt{\sin^2 \theta - n_{21}^2}} \quad (1)$$

Следовательно, значение поля во втором рефлекторе будет определяться выражением:

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_0 e^{-\frac{d}{\lambda_0} 2\pi \sqrt{\sin^2 \theta - n_{21}^2}} \quad (2)$$

а поле отраженного потока в первом рефлекторе представится выражением:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_0 \left(1 - e^{-\frac{d}{\lambda_0} 2\pi \sqrt{\sin^2 \theta - n_{21}^2}} \right) \quad (3)$$

Величина сдвига Гуса-Хансен имеет вид [28]:

$$\Delta G = \frac{\lambda_0}{\pi m_1} \frac{\tan \theta_c}{\sqrt{\sin^2 \theta - \sin^2 \theta_c}} \quad (4)$$

где θ_c – критически угол полного внутреннего отражения. Существенно заметить, что оптический поток, прошедший через плоский щелевой зазор шириной d , испытывает некоторое смещение по оси "х", зависящее от ширины этого зазора. В работе [12] величина этого смещения определяется значением половины длины сдвига Гуса-Хансен:

$$\Delta x = \frac{\Delta G}{2} = \frac{\lambda_0}{2\pi m_1} \frac{\tan \theta_c}{\sqrt{\sin^2 \theta - \sin^2 \theta_c}} \quad (5)$$

На нижнем интерфейсе нижнего рефлектора прошедший через щелевой зазор поток, описываемый выражением (2), тоже испытывает полное внутреннее отражение и готов выйти в щелевой зазор. Часть исходного потока, возникшая в верхнем рефлекторе в результате явления нарушенного полного отражения, также испытывает явление полного внутреннего отражения на его верхнем интерфейсе. Оба эти потока последовательно претерпевают возмущенное и невозмущенное полное внутреннее отражение и последовательно теряют интенсивность, порождая новые потоки в результате их расщепления. При этом каждое возмущенное и невозмущенное ПВО будет приводить к появлению фазовых сдвигов относительно фазы исходного потока. Чтобы в какой-то степени упростить ситуацию, можно поместить за вторым рефлектором поглотитель оптического излучения с коэффициентом преломления n_3 , превышающим величину коэффициента преломления n_1 (рис. 2б). В этом случае все оптические потоки, возникающие в нижнем рефлекторе, будут подавлены за счет поглощения в этой рефлекторной пластине. При этом в верхнем рефлекторе в результате последовательного возмущенного и невозмущенного полного внутреннего отражения появится набор локальных интерференционных зон стоячей оптической волны, которые будут характеризоваться некоторым фазовым сдвигом относительно друг друга (рис. 2в). Вследствие наличия возмущенного ПВО, интенсивность поля по мере претерпевания возмущенных и невозмущенных отражений ПВО, вместе с интенсивностями стоячих волн локальных интерференционных зон полного внутреннего отражения, уменьшается по мере увеличения порядка отражения. Вариацией угла падения исходного оптического потока в границах углового интервала полного внутреннего отражения принципиально возможно добиться сфазированности локальных интерференционных полей. В этих условиях в объеме верхнего рефлектора и в щелевом зазоре будет иницииро-

вано интерференционное поле стоячей оптической волны. Поляризационные проблемы в первом приближении представляется целесообразным из рассмотрения исключить.

Распространение потока квазимонохроматического рентгеновского излучения в планарных узких протяженных щелевых зазорах

Экспериментальные исследования особенностей распространения потока квазимонохроматического (характеристического) рентгеновского излучения в плоском протяженном щелевом зазоре позволили сформулировать концепцию волноводно-резонансного распространения этого потока, характерного для подобных щелевых зазоров наноразмерной ширины. Концепция волноводно-резонансного распространения потока рентгеновских лучей естественным образом опирается на явление его полного внешнего отражения на материальном интерфейсе. На рисунке 3а показана схема, в значительной степени характеризующая это явление. Схема несколько отличается от аналогичной схемы, представленной в работе [4], в которой впервые было экспериментально зарегистрировано наличие стоячей рентгеновской волны в воздухе над отражающим материальным интерфейсом в процессе ПВО потока монохроматической рентгеновской радиации. Несмотря на то, что при нашем рассмотрении мы учли некоторые дополнительные обстоятельства, показанная на рисунке 3а схема, по-прежнему является идеализированной. Дело в том, что поток электромагнитного излучения, ограниченный хотя бы в одном измерении, должен характеризоваться краевыми эффектами [15]. Поскольку введение краевых эффектов существенно усложняет рассмотрение, они опущены в предположении, что это незначительно повлияет на адекватность модели.

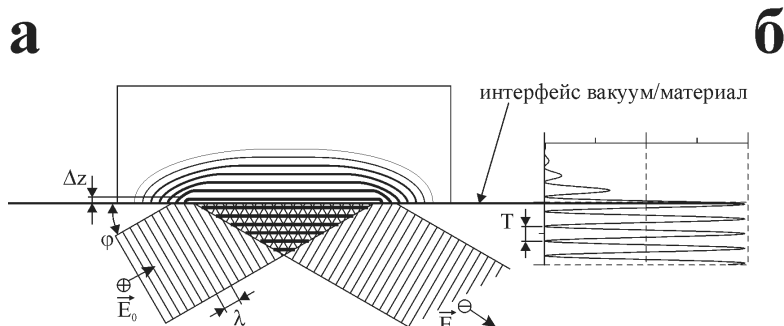


Рис. 3. (а) Схема образования интерференционного поля стоячей рентгеновской волны при полном внешнем отражении ограниченного потока излучения на материальном интерфейсе. Δz – глубина проникновения излучения, T – период стоячей волны в вакууме. (б) Кривая пространственного распределения интенсивности стоячей волны в зоне отражения над и под интерфейсом

Появление исследования [4], экспериментально доказавшего наличие интерференционного поля стоячей рентгеновской волны в области полного внешнего отражения потока РИ, имеет принципиальное значение. Предположение о возможности возникновения такого поля казалось вполне естественным, поскольку, несмотря на малость углов отражения при явлении ПВО, возникает область взаимного перекрытия падающего и отраженного потоков. Более того, предположение появления такой зоны интерференции

должно было бы считаться очевидным в свете работы Андерсена с сотрудниками, экспериментально показавших, что интерференционное поле стоячей рентгеновской волны возникает при Брегговском отражении над материальным монокристаллическим интерфейсом [1]. Однако до появления работы Бедзика с сотрудниками [4] возможность возникновения интерференционного поля стоячей рентгеновской волны при ПВО потока рентгеновских лучей на материальном интерфейсе полностью игнорировалась [24]. После опубликования этих исследований факт возникновения стоячих рентгеновских волн при полном внешнем отражении потока РИ на материальном интерфейсе стал сам собой разумеющимся [13,35]. Однако авторы указанных и других многочисленных исследований продолжали использовать предельно упрощенную модель ПВО, развитую в работе [4]. Согласно этой модели, возбуждаемое в объеме рефрактора при полном отражении потока РИ электромагнитное поле описывается монотонной экспоненциально убывающей функцией [13,25]. Однако такой подход игнорирует наличие фундаментального физического принципа непрерывности [26], который в применении к явлению ПВО с необходимостью требует проникновения интерференционного поля стоячей рентгеновской волны в объем материального рефрактора. Более того, наличие неразрывности такого поля на интерфейсе вакуум-материальная среда ни у кого не вызывает сомнения в случае Брегговского отражения [3].

Таким образом, одним из аспектов, дополняющих упрощенную модель, принятую для описания явления ПВО, является предположение о проникновении стоячей рентгеновской волны в объем материала рефрактора. Проникновение интерференционного поля стоячей рентгеновской волны в его объем должно приводить к модуляции экспоненциальной функции, описывающей убывание поля (рис. 3б). Учет появления интерференции в объеме материала рефрактора приводит к некоторому увеличению коэффициента ПВО при ненулевом коэффициенте поглощения этого материала [7,34]. Еще одним важным аспектом, дополняющим простейшую модель, является утверждение, что полное отражение даже пространственно ограниченного рентгеновского пучка вызывает возбуждение всего объема рефрактора независимо от его размера.

Исходя из посылок геометрической оптики (рис. 3а) можно заключить, что размер интерференционного поля при ПВО рентгеновских лучей в вакууме (в воздухе) в области интерфейса определяется шириной падающего потока. Однако это ни единственный и ни главный критерий, определяющий размер интерференционной зоны. Физическим фактором, определяющим размер этой зоны, является параметр, характеризующий степень монохроматичности падающего излучения. В качестве такого параметра обычно принимается линейный размер, называемый длиной когерентности излучения $L=\lambda^2/\Delta\lambda$ [27]. В случае излучения, генерируемого в результате внутриатомных электронных переходов, длина волны λ определяется средним расстоянием между энергетическими уровнями, соответствующими этому переходу,

а степень монохроматичности $\Delta\lambda$ отражает суммарную энергетическую ширину этих уровней. Длина когерентности соответствует фазовому сдвигу между падающим и отраженным потоками излучения, при котором интерференция исчезает вовсе. (Этот параметр условно можно трактовать как размер кванта излучения.) Не учет этого параметра приводит к появлению трудностей даже при интерпретации экспериментальных данных, получаемых для оптического диапазона. Вследствие этого вторым принципиальным аспектом, которым на наш взгляд было необходимо дополнить простейшую модель ПВО рентгеновских лучей, явился учет параметра длины когерентности отражаемого излучения.

Однако не только он оказывается ответственным с физической точки зрения за размер зоны интерференционного поля стоячей рентгеновской волны. Фазовые изменения возникают и при формировании отраженного радиационного потока, причем величина фазового сдвига ψ является функцией, зависящей от угла падающего излучения φ [4,34]:

$$\psi = 2 \arctan \left(\frac{\sqrt{\theta_c^2 - \varphi^2}}{\varphi} \right) \quad (6)$$

где θ_c – критический угол ПВО. Пример зависимости фазового сдвига от угла падения излучения в условиях его полного отражения приведен на рисунке 4. Этот пример показывает, что фазовый сдвиг при ПВО меняется от π до нуля при изменении угла падения от нуля до его критического значения. В качестве первого приближения для оценки размера интерференционной зоны в вакууме в области ПВО было предложено использовать минимальное значение фазового сдвига [7,34]. В этом приближении максимальный размер интерференционной зоны определяется половиной параметра длины когерентности падающего излучения. Однако более детальное рассмотрение показывает, что этот размер является функцией угла падения отражаемого потока:

$$D_{\max} = \frac{\lambda^2}{2\pi\Delta\lambda} (\pi + \psi) \quad (7)$$

Пример подобной зависимости показан на рисунке 5. При этом надо иметь в виду, что оценка, соответствующая выражению (7), не является окончательной, поскольку она не учитывает проникновения стоячей волны в объем материала рефлектора и искусственности представления интерфейса в качестве жесткой геометрической границы [10], а также в результате того, что выражения (6) и (7) получены в рамках Френелевского приближения, что не вполне законно для интерпретации явления полного внешнего отражения рентгеновского излучения на материальном интерфейсе [39].

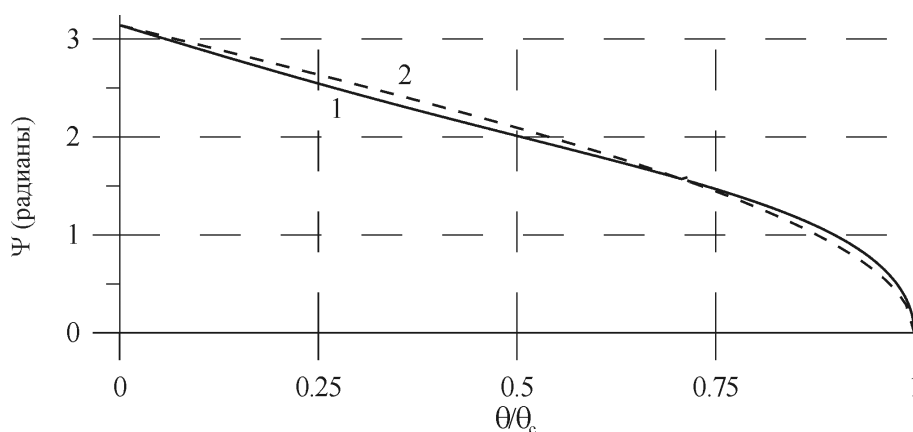


Рис. 4. Расчетные зависимости угла фазового сдвига ψ от угла падения потока излучения CuK_α при его полном внешнем отражении на интерфейсе вакуум (воздух)/ SiO_2 с учетом (2) и без учета коэффициента поглощения среды. θ_c – критический угол ПВО [9]

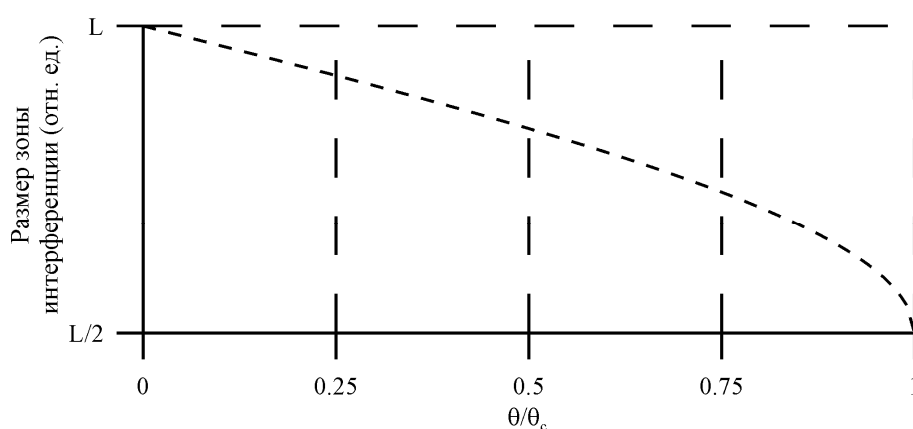


Рис. 5. Ожидаемая зависимость размера верхней границы, допускающей образование однородного интерференционного поля стоячей рентгеновской волны в плоском воздушном протяженном зазоре, образованном полированными материальными рефлекторами, от угла падения потока излучения

При параллельном расположении двух плоских рефлекторов на некотором расстоянии друг от друга возникают условия для реализации последовательного полного многократного внешнего отражения в воздушном щелевом зазоре, образованном этими рефлекторами. В таких условиях явление многократного ПВО охарактеризуется образованием внутри зазора множества локальных интерференционных зон рентгеновской стоячей волны, а также сериями явления многократного перевозбуждения рефлекторных объемов (рис. 6а). Размер возникающих локальных зон ограничен длиной когерентности падающего излучения, а расстояние между ними может варьироваться либо изменением угла падения первичного потока ϕ , либо в результате регулировки ширины зазора плоской щелевой структуры. При этом можно добиться условий сфазированности последовательных отражений. Явление многократного ПВО в условиях сфазированности отражений энергетически более выгодно, чем в отсутствие фазировки, поскольку в этом случае будут снижены потери потока РИ на многократное перевозбуждение объемов рефлекторов. Таким образом в режиме многократного ПВО может быть реализован ряд геометрических условий с повышенной радиационно-транспортной эффективностью. В теории оптических волноводов набор этих условия при-

нято называть модовой структурой [22]. Естественно такая модовая структура будет носить ярко выраженный дискретный характер, который для подобных структур был экспериментально зафиксирован в ряде работ группы Званенбурга [23].

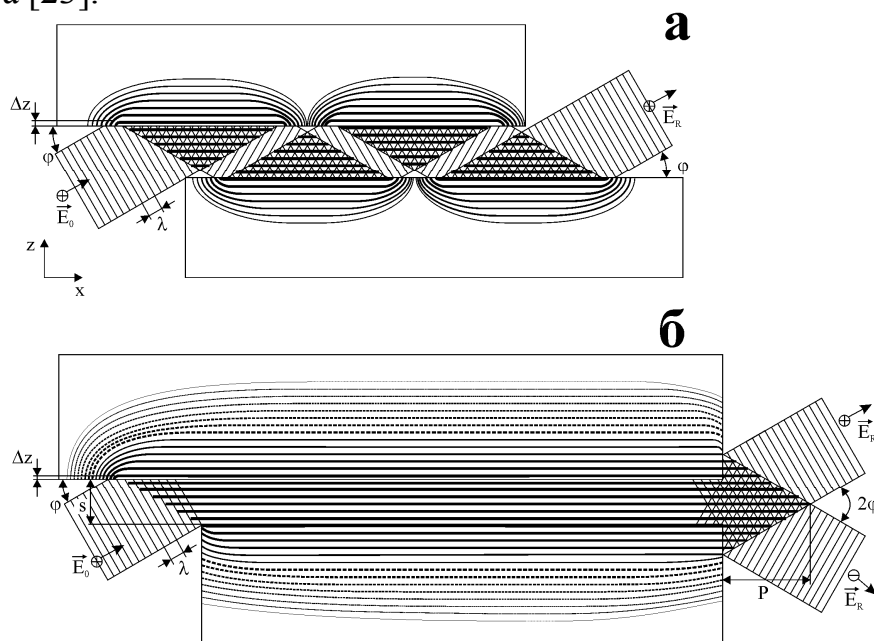


Рис. 6. Схемы образования локальных зон при многократном ПВО в плоском протяженном широкощелевом зазоре (а) и однородного интерференционного поля стоячей рентгеновской волны за счет взаимного перекрытия локальных интерференционных полей при ширине транспортного зазора s , попадающего в размерный интервал $D_{min} \leq s \leq D_{max}$ (б). P – параметр выпячивания интерференционного поля из зазора волноводно-резонансной структуры

Механизм полного многократного внешнего отражения хорошо описывает транспортировку потока РИ широкощелевыми плоскими протяженными щелевыми зазорами. Однако он оказывается бессилем адекватно охарактеризовать распространение этого потока вдоль узкощелевых плоских протяженных зазоров, когда расстояние между рефлекторами становится меньше половины длины когерентности излучения [7,34]. В условиях использования плоских щелевых зазоров такой ширины, транспортировка излучения происходит по волноводно-резонансному механизму [7]. Узкощелевые зазоры характеризуются образованием однородного интерференционного поля стоячей рентгеновской волны во всем пространстве щелевого зазора вследствие взаимного перекрытия локальных интерференционных полей (рис. 6б). Поскольку такое перекрытие возникает независимо от величины угла падения потока РИ на входное окно узкощелевой структуры φ ($\varphi \leq \theta_c$), при волноводно-резонансном механизме распространения излучения реализуется непрерывная модовая структура. При этом в объемах рефлекторов устанавливается стационарное интерференционное поле убывающей по амплитуде стоячей рентгеновской волны. Устройство, представляющее собой такую плоскую узкощелевую структуру, было названо плоским рентгеновским волноводно-резонатором (ПРВР) [9].

Независимым подтверждением справедливости концепции волноводно-резонансного распространения РИ явились исследования японских авторов [20]. В работе изучалась радиационно-транспортная эффективность угловой рентгеноотражающей структуры или скошенного рентгеновода (рис. 7а). Угловая рефлекторная структура была собрана из двух плоских кремниевых полированных пластин, имевших линейный контакт и образующих между собой угол φ . Этот угол мог варьироваться и жестко фиксироваться с помощью высокоточного цифрового линейного координатора. Прошедшее через угловую структуру РИ регистрировалось с помощью дрейфового полупроводникового детектора. Измерения проводились поточно со скважностью $\Delta\varphi=0.007^\circ$ с использованием трубки с Мо анодом и монохроматора.

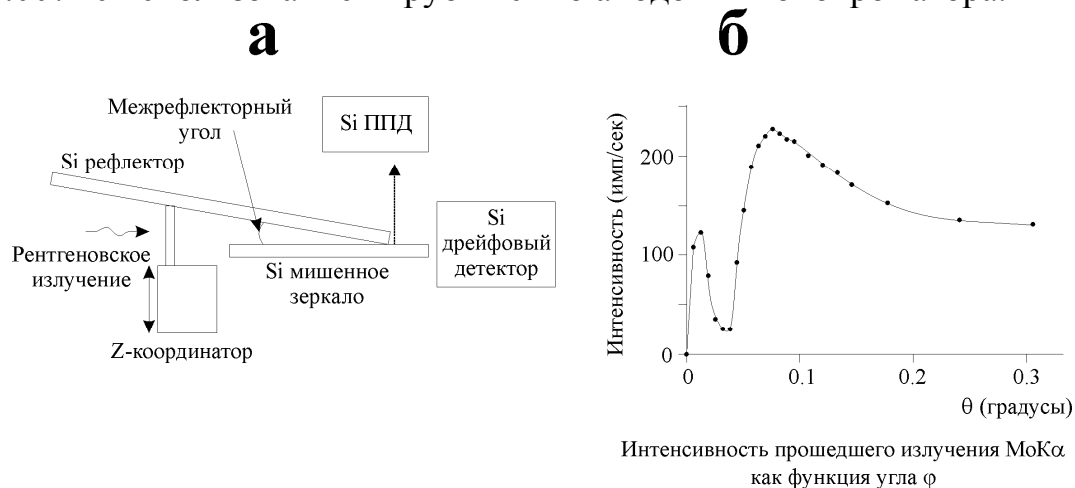


Рис. 7. (а) Схема измерений рентгенотранспортных свойств угловой структуры, построенной на базе двух плоских полированных Si рефлексоров, имеющих линейный контакт и образующих между собой угол φ (скошенный рентгеновод). (б) Экспериментально полученная зависимость транспортной эффективности скошенного рентгеновода от угла между рефлекторами [20]

На рисунке 7б показана типичная зависимость интегральной интенсивности потока $\text{MoK}\alpha$, пропущенного скошенным рентгеноводом, от величины межрефлекторного угла. Представленная зависимость характеризуется двумя очевидными экстремумами. Максимум в области угла $\varphi \approx 0.1^\circ$ соответствует достижению критического угла ПВО молибденового излучения на Si. В области углов $0.1 > \varphi > 0.05^\circ$ скошенный рентгеновод транспортирует излучение по механизму многократного полного внешнего отражения. Уменьшение интегральной интенсивности в этом угловом интервале связано с сокращением входной угловой апертуры рентгеновода. Интересно заметить, что в отличие от плоской широкощелевой структуры, формирующий поток рентгеновских лучей с участием вклада прямого пучка, скошенная рентгеноводная структура формирует поток только на базе механизма многократного полного отражения. Поэтому на основе такой структуры возможно построение рентгеновского β -фильтра, в спектре выходного пучка которого монохроматическая β -компонента окажется полностью подавленной.

Второй очевидный максимум на диаграмме, представленной на рисунке 7б, наблюдается в районе угла $\varphi \approx 0.01^\circ$. Его появление является результа-

том смены механизма транспортировки потока рентгеновского излучения от многократного ПВО к его волноводно-резонансному распространению. Снижение интегральной интенсивности пучка на выходе скошенного рентгеновода при дальнейшем уменьшении межрефлекторного угла связано с недостаточной точностью взаимной юстировки формирователя потока монохроматической радиации и угловой рефлекторной структуры. В условиях точной юстировки интегральная интенсивность на выходе этой угловой структуры будет оставаться постоянной величиной вплоть до $\varphi=0$, когда структура превратится в обычный бесщелевой коллиматор.

Кванто-механическая трактовка механизма волноводно-резонансного распространения потока квазимонохроматического рентгеновского излучения приведена ниже.

В основе механизма волноводно-резонансного распространения потока рентгеновского излучения лежит предположение о наличии когерентности внутри этого потока при его транспортировке плоским протяженным щелевым зазором. Это предположение опирается на экспериментальный факт фиксации возникновения поля интерференции стоячей рентгеновской волны при полном внешнем отражении потока рентгеновских лучей на плоском материальном интерфейсе [4]. Наличие этого интерференционного поля в воздухе над материальным интерфейсом наблюдалось и в ряде более поздних исследований [35]. При этом существенно заметить, что во всех измерениях, фиксировавших существование интерференционного поля стоячей рентгеновской волны, использовались источники рентгеновского излучения, которые никаким образом не могут рассматриваться в качестве источников плоских волн, так и считаться точечными источниками. Само интерференционное поле фиксировалось для характеристической компоненты излучения источника. Факт использования характеристической компоненты спектра позволяет утверждать, что размер регистрируемой в эксперименте области интерференции может регламентироваться двумя факторами – шириной используемого в измерениях падающего пучка и длиной когерентности квазимонохроматического излучения.

В наших предыдущих публикациях в целях упрощения формирования модели волноводно-резонансного распространения потока рентгеновского излучения в узких плоских протяженных зазорах влияние ширины пучка на размеры интерференционного поля игнорировались [7]. Однако принятие во внимание лишь фундаментального свойства излучения – степени его монохроматичности, связанной с размерами волнового цуга, оказывается недостаточным для интерпретации полученных экспериментальных результатов. Дело в том, что практическая ширина щелевого зазора волновода-резонатора фактически определяется не продольными размерами локальной области интерференции, которая непосредственно связана с параметром длины когерентности излучения потока, отражаемого материальным интерфейсом, а ее поперечным сечением. Прямые расчеты показывают, что если принять во внимание только длину когерентности излучения, то окажется, что при полном внешнем отражении область интерференции в силу малости угла полно-

го отражения вообще не может возникнуть, так как ее ширина оказывается меньше периода стоячей рентгеновской волны. Поскольку прямые экспериментальные измерения фиксируют наличие интерференционного поля стоячей рентгеновской волны, следует признать, что адекватная модель, описывающая эти эксперименты, должна учитывать и размеры падающего пучка. Такая модель требует привлечения понятия пространственной когерентности излучения [42].

Пространственная когерентность проявляется в интерференции как каждого фотона с самим собой, так и во взаимной интерференции разных квазимонохроматических фотонов, испускаемых одними и теми же элементами протяженного источника излучения. Для наблюдения пространственной интерференции излучения протяженного квазимонохроматического источника необходимо, чтобы произведение угла расходимости потока на ширину фокального пятна этого источника оказывалось меньше длины волны излучения [40]. В приложении к плоскому рентгеновскому волноводу-резонатору и лабораторному источнику излучения это условие означает, что пространственная когерентность реализуется, когда длина волны рентгеновских лучей будет больше произведения ширины щели плоского рентгеновода на отношение размера фокального пятна рентгеновской трубки к расстоянию между этим пятном и входным срезом рентгеновода. Поскольку каждый элемент протяженного источника излучения фактически представляет собой точечный источник, в оптике принято выделять некоторое пространство облучаемого объекта, называемое площадью когерентности [40]. Применительно к щелевому зазору плоского рентгеновода под такой площадью следует понимать квадратное сечение со стороной, равной ширине этого зазора. Площадь такого сечения определяется произведением квадрата длины волны излучения на квадрат расстояния между фокальным пятном рентгеновской трубки и входным срезом рентгеновода, деленным на квадрат ширины фокального пятна. При этом продольный размер области когерентности по-прежнему будет определяться длиной когерентности излучения. Произведение площади когерентности на длину когерентности квазимонохроматического излучения обычно называют объемом когерентности [40]. Таким образом, в рамках идеологии пространственной когерентности идея механизма волноводно-резонансного распространения рентгеновского излучения может быть представлена как возникновение перекрытия между локальными объемами когерентности, характерными для каждого последовательного отражения потока в пространстве между рефлекторами рентгеновода. Эта идея становится еще более впечатляющей при сопоставлении объема когерентности квазимонохроматического излучения с размером ячейки фазового пространства фотона. Оказывается, что квантово-механическое определение размера этой ячейки однозначно соответствует объему когерентности излучения [16]. В свете такого рассмотрения модель волноводно-резонансного распространения потока рентгеновского излучения в узком протяженном щелевом зазоре может трактоваться как достижение условий без зазорного заполнения всего простран-

ства щели плоского рентгеновода ячейками фотонного фазового пространства.

Конструкция плоского рентгеновского волновода-резонатора

На рисунке 8 представлен эскиз, отражающий принципиальные конструктивные особенности компоновки волноводного формирователя пучка рентгеновского излучения. Главными узлами формирователя являются два плоских полированных рефлектора, изготовленных из кварцевого стекла, размером $100 \times 33 \times 2.5 \text{ мм}^3$. Рефлекторы в волноводе расположены параллельно на фиксированном расстоянии друг от друга. Величина этого расстояния задается толщиной металлических (Ti) полосок, напыленных на края одного из рефлекторов. Их напыление осуществлялось с помощью метода электронно-лучевого испарения на установке L-560 Leybold AG при скорости осаждения около 0.1 нм/сек. Важнейшим фактором при выборе условий напыления было требование получения покрытий с минимально возможной вариацией толщины вдоль их длины. Подбор условий выполнен с использованием тестовых образцов, толщина покрытий которых диагностировалась методом резерфордовского обратного рассеяния на установке Сокол-3 ИПТМ РАН [33,34]. Измерения показали, что при расстоянии между распыляемой Ti мишенью и волноводным рефлексом, равным 1000 мм, вариация толщины покрытия по длине напыленных полос не превышала 1%. Для изучения транспортных свойств узких плоских протяженных щелей был приготовлен набор рефлекторов, для которых толщина этих полосок изменялась в интервале толщин $43 \div 6000 \text{ нм}$. Рентгеновские волноводы со щелями большей ширины изготавливались путем установки между рефлексорами прокладок из металлических фольг с калиброванной толщиной. Более детально подготовительные вопросы изложены в работах [8,33].

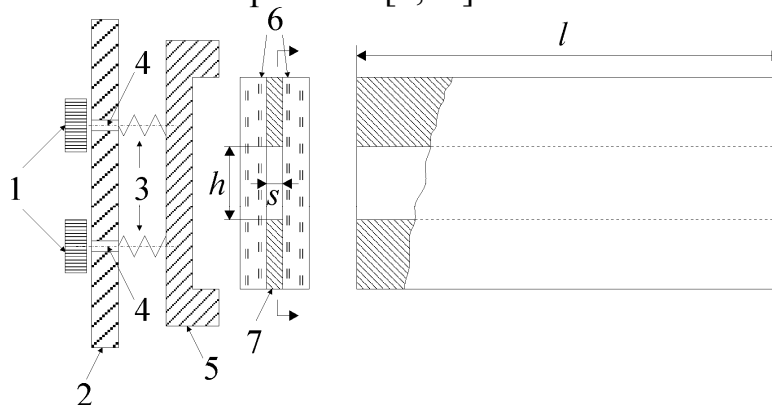


Рис. 8. Схема устройства волноводного формирователя пучка рентгеновского излучения, построенного на основе плоской протяженной щели, образованной кварцевыми рефлексорами. 1 – юстировочные головки; 2 – установочная пластина; 3 – пружинные фиксаторы; 4 – юстировочные микровинты; 5 – оправка волновода; 6 – кварцевые рефлекторы; 7 – металлические полоски

Специальное внимание было уделено определению среднего размера интерфейсного зазора бесщелевого рентгеновского коллиматора, составленного из двух кварцевых стекол, изготовленных по единой технологии и используемых нами в качестве рефлекторов для волноводов. Исследования,

выполненные с использованием метода нарушенного полного внутреннего отражения оптического излучения, показали, что средняя ширина интерфейсного зазора составляет 30 нм, а ее изменение по длине бесщелевого коллиматора варьирует в интервале $0 \div 60$ нм [34].

Держатель волновода жестко фиксирует взаимное положение рефлекторов. Сам держатель устанавливается на плиту, относительно которой он может смещаться в перпендикулярном направлении и разворачиваться в двух угловых направлениях с помощью четырех микровинтов, расположенных по его углам. Неизменность положения волновода в пространстве обеспечивается наличием четырех пружинных амортизаторов, расположенных соосно с микровинтами. Установочная плита волновода может быть зафиксирована на стандартном трехкружном рентгеновском дифрактометре HZG-4 вместо узла, формирующего пучок с помощью стандартной системы обрезающих щелей. Использование волноводной ячейки, построенной в соответствии с показанной конструкционной схемой, для формирования пучка РИ в комплекте рентгеновского гониометра в течение десяти лет показало ее высочайшую надежность и стабильность в работе.

Пространственное распределения интенсивности характеристического рентгеновского излучения на выходе ПРВР

Для проведения экспериментальных исследований пространственного распределения интенсивности рентгеновского характеристического излучения в пучках, сформированных плоскими протяженными кварцевыми волноводами, узел с волноводной ячейкой включался в рентгенооптическую схему гониометра вместо щелевого формирования пучка. Геометрическое положение волноводного формирователя, показанное в верхней части рисунка 9, оставалось строго одинаковым при изучении волноводов всего щелевого ряда. Поскольку расстояние от входного среза волновода до фокуса трубки составляло 75 мм, угловая ширина его проекции для этой точки равнялась 0.08° . Этот угол соответствует углу захвата излучения волноводной щелью. Расстояние между выходным срезом волновода и детекторной щелью было выбрано равным 460 мм. Это расстояние определяет угловую ширину детекторной щели, соответствующую 0.01° . Все экспериментальные измерения пространственного распределения интенсивности излучения выполнялись с шагом $\Delta(2\theta)=0.02^\circ$. Поэтому для расчета интегральной интенсивности характеристической составляющей пучка величину суммы содержания каналов спектров распределений, представленных в нижней части рисунка 9, приходилось умножать на два. Спектральные данные собирались в течение 10 секунд и потом нормировались для улучшения спектральной статистики. Необходимо отметить, что угол φ_2 , отражающий угловое распределение характеристической составляющей интенсивности РИ на выходе волновода, несколько меньше угла поворота детектора вокруг оси ω , показанного на рисунке 9.

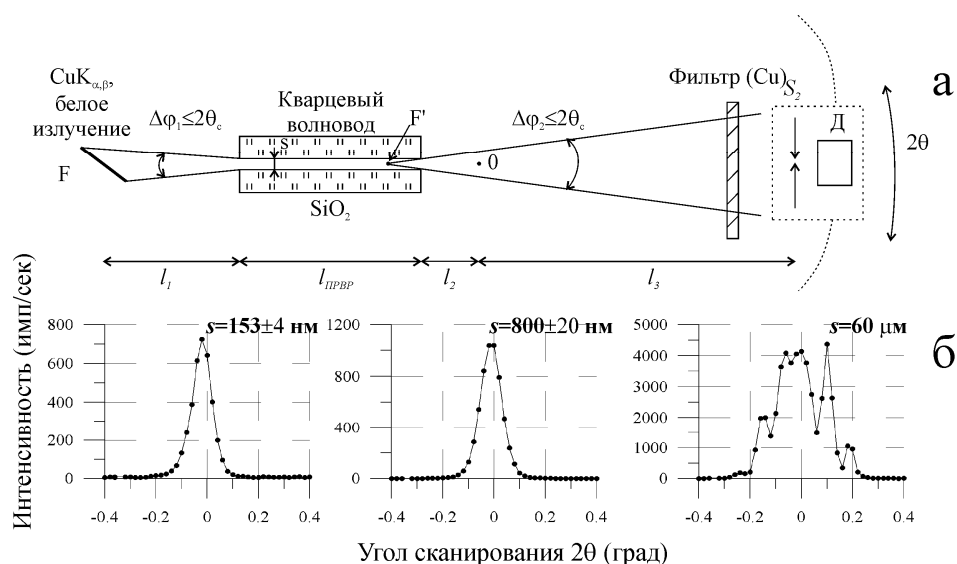


Рис. 9. (а) Схема экспериментальных измерений пространственного распределения интенсивности излучения $\text{CuK}_{\alpha\beta}$ в пучках, сформированных кварцевыми волноводами с различной шириной волноводной щели. $l_1=75$ мм, $l_{\text{ПРВ}}=100$ мм, $l_2=60$ мм, $l_3=400$ мм, $S_2=0.1$ мм, А – ослабитель (фактор ослабления для $\text{CuK}_{\alpha\beta}$ $K=200$). (б) Экспериментально полученные пространственные (по углу сканирования 2θ) распределения интенсивности излучения $\text{CuK}_{\alpha\beta}$ в пучках, сформированных волноводами, в которых ширина щели составляла 153, 800 и 60000 нм. Измерения выполнены при режиме источника $U=20$ кэВ, $I=10$ мА

В нижней части рисунка 9 в качестве примеров приведены экспериментально полученные распределения интенсивности излучения CuK_{α} для волноводов с шириной щели $s=153$ нм, 800 нм и 60000 нм. Наиболее полные сведения по пространственному распределению характеристического излучения в пучках, сформированных волноводами с различной шириной щели, приведены в работах [8,34]. Огибающая распределения для интервала размеров щели 30÷2000 нм представляет собой однокомпонентный пик, симметричный относительно плоскости симметрии волновода. Форма пика близка к гауссовой. Его полуширина оказывается близкой к величине, соответствующей углу захвата излучения. В области размеров щели $s>3000$ нм форма распределения интенсивности в пучке, сформированном волноводом, кардинально меняется. В этом размерном интервале огибающая распределения представлена набором узких линий, взаимное соотношение интенсивностей которых резко меняется при малейшем повороте юстировочных винтов, определяющих положение волновода в пространстве. Показанное в правой нижней части рисунка 9 распределение для волновода с шириной щели 60 мкм отражает некоторую случайно зарегистрированную картину. Дело в том, что наличие в спектре распределения большого количества узких компонент не позволяет ввести какой-то формально определенный критерий достижения точного взаимного расположения проекции фокуса, щели детектора и плоской протяженной волноводной структуры (точной юстировки). Определенно можно утверждать следующее. При незначительном изменении юстировки интегральная интенсивность спектра не меняется. Не меняется положение, полуширина, число компонент спектра и общая полуширина распределения. Однако, если для распределений, полученных для щелей с

$s < 2000$ нм, угол захвата излучения и угловая полуширина распределения интенсивности в пучке на выходе волновода были равны (рисунок 10 работы [34]), то для интервала $s > 3000$ нм угловая зона, занимаемая потоком излучения сформированного пучка, оказывается равной удвоенной величине критического угла полного внешнего отражения независимо от величины угла захвата РИ. При этом полуширины компонент, составляющих спектры пространственного распределения характеристического излучения, оказывались приблизительно равными между собой, но соответствовали величинам, приблизительно вдвое меньшим полуширины распределений, характерных для узких щелей.

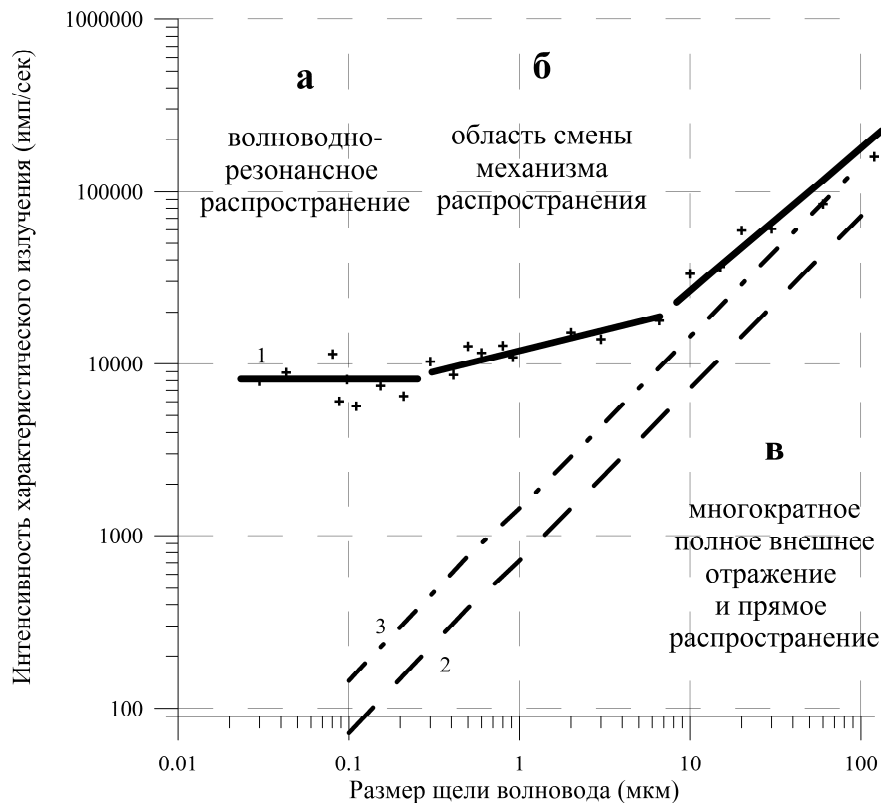


Рис. 10. (а) Экспериментальная зависимость интегральной интенсивности характеристической составляющей ($\text{CuK}_{\alpha\beta}$) пучка, сформированного плоским кварцевым волноводом от ширины щели, транспортирующей излучение. (б) Линейная функция, характеризующая зависимость интегральной интенсивности характеристической составляющей ($\text{CuK}_{\alpha\beta}$) прямого пучка, проходящего через щель рентгеновского волновода, от ширины его щели. (в) Ожидаемая удвоенная интегральная интенсивность ($\text{CuK}_{\alpha\beta}$) для пучка, испытавшего многократное полное внешнее отражение в щели

Очень неординарным оказалось очертание представленной на рисунке 10 зависимости интегральной интенсивности потока характеристического излучения, прошедшего через волновод, от ширины щели, транспортирующей это излучение. В первом приближении эту зависимость можно рассматривать состоящей из трех частей, соответствующих размерным интервалам $s < 200$ нм, $200 < s < 2000$ нм и $s > 3000$ нм. Первый интервал характеризуется независимостью интенсивности потока транспортируемого излучения от ширины щели, второй – незначительным ростом интенсивности этого потока при увеличении ее ширины и третий – существенной зависимостью интенсивно-

сти от размера щелевого зазора. При этом крайне интересно отметить, что при увеличении ширины зазора в 4000 раз интегральная интенсивность пучка, сформированного плоским кварцевым волноводом, возрастает лишь приблизительно на порядок.

Изучение влияния оптического излучения на поток рентгеновских лучей в щели ПРВР

Сечение прямого взаимодействия фотонных потоков вне материальной среды исчезающее мало. Поэтому для возможной реализации такого взаимодействия возникла идея попытаться использовать для этого стоячие волны, возбуждаемые потоками фотонов, как в материальной среде, так и вне ее. Возможным инструментом для выполнения подобных экспериментов представлялся плоский рентгеновский волновод-резонатор, образованный прозрачными (кварцевыми) рефлекторами. В щелевом зазоре этого устройства, как было указано выше, при транспортировке характеристического рентгеновского излучения возникает однородное интерференционное поле стоячей рентгеновской волны с периодом на два-три порядка превышающим длину этой волны (в силу малости угла полного внешнего отражения). Если запустить поток квазимонохроматического оптического излучения в один из рефлекторов рентгеновского волновода-резонатора под углами, соответствующими явлению полного внутреннего отражения, то, как было показано выше, в рефлекторной паре, образующей ПРВР, будет реализовано явление нарушенного полного внутреннего отражения. При этом в рефлекторной пластине возникнет ряд локальных интерференционных областей, каждая из которых будет распространяться в воздушный щелевой зазор. Период стоячих волн в этих областях будет зависеть от угла падения потока оптического излучения на поверхность рефлектора. От этого угла будут зависеть и фазовые соотношения стоячих волн в этих областях. Естественно, рентгеновская стоячая волна также будет проникать в объемы обоих рефлекторов. На рисунке 11 приведена схема эксперимента для изучения возможного взаимодействия квазимонохроматических потоков рентгеновского и оптического излучений через взаимное влияние интерференционных областей возбуждающих ими стоячих волн.

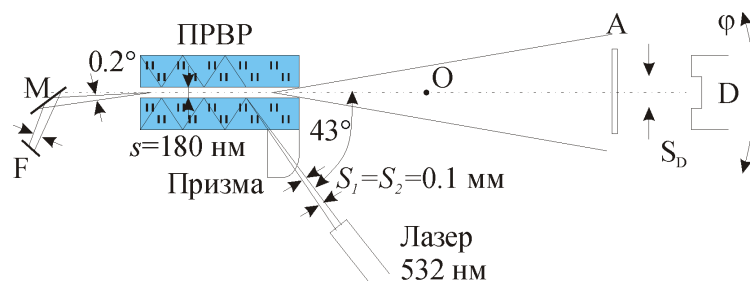


Рис. 11. Геометрия выполнения исследований взаимодействия потоков оптического и рентгеновского излучений через интерференцию возбуждаемых ими интерференционных полей стоячих волн. F – фокус рентгеновского источника; M – монохроматор Si(111); A – ослабитель потока ($K=740$); S_D – детекторная щель 0.1 мм; D – сцинтилляционный детектор

Основным узлом схемы является плоская протяженная щелевая структура, образованная плоскими полированными кварцевыми рефлекторами. Расстояние между рефлекторами было выбрано равным 180 нм, что обеспечивало транспортировку потока рентгеновского излучения $\text{CuK}\alpha\beta$ по волноводно-резонансному механизму. Рентгеновский поток направлялся в щелевое пространство с помощью монохроматора.

Поток оптического излучения вводился в устройство через четвертьцилиндрическую кварцевую призму. На призму направлялся поток, сформированный плоской щелью шириной 0.1 мм. К щели поток подводился стеклянным оптическим фибером диаметром 5 мм. В качестве источника оптического излучения использовался твердотельный зеленый лазер с длиной волны 532 ± 1 нм, мощностью 300 мВ. Критический угол полного внутреннего отражения для этого излучения в кварце составлял $\theta_k=42.5^\circ$. Эксперимент заключался в поиске углов падения потока рентгеновского излучения на щель ПРВР и углов падения оптического излучения в интервале его полного внутреннего отражения, при которых ожидалось наблюдать различие в пространственном распределении интенсивности пучка рентгеновского излучения, формируемого на выходе ПРВР, в условиях наличия – отсутствия светового возбуждения. Этот поиск действительно увенчался успехом. Его результаты представлены на рисунке 12. При угле падения рентгеновского потока $\text{CuK}\alpha\beta$ под углом к оси ПРВР 0.02° и угле ввода потока оптического излучения 43° удалось наблюдать появление изменения в распределении интенсивности рентгеновских лучей в условиях воздействия оптического излучения. Это отличие выражается в некотором смещении центра тяжести распределения и небольшом уменьшении его интегральной интенсивности. Следует заметить, что экспериментальный поиск условий, позволивший зарегистрировать влияние потока оптического излучения на интерференционное поле стоячей рентгеновской волны оказался весьма не тривиальной задачей, поскольку проявление эффекта оказалось крайне чувствительным к малейшему изменению экспериментальных параметров. Этот факт дает основание полагать, что наблюдаемое явление имеет узко резонансный характер.

В качестве возможной интерпретации зарегистрированного эффекта можно предположить, что имеет место взаимодействие интерференционных полей стоячих рентгеновских и оптических волн. Изменение угла падения потока рентгеновского квазимонохроматического потока ($\text{CuK}\alpha\beta$) на входную щель ПРВР для реализации механизма волноводно-резонансного распространения излучения возможно в угловом интервале $0.02\text{--}0.21^\circ$. Нижний предел интервала связан с тем, что период возникающей в щелевом зазоре стоячей волны оказывается больше его ширины и волна начинает испытывать значительное ослабление. Угловое ограничение сверху определяется величиной критического угла полного внешнего отражения для медного излучения на поверхности кварца. Вариация угла падения в указанном интервале приводит к появлению рентгеновских стоячих волн с периодом 180–21 нанометр, соответственно.

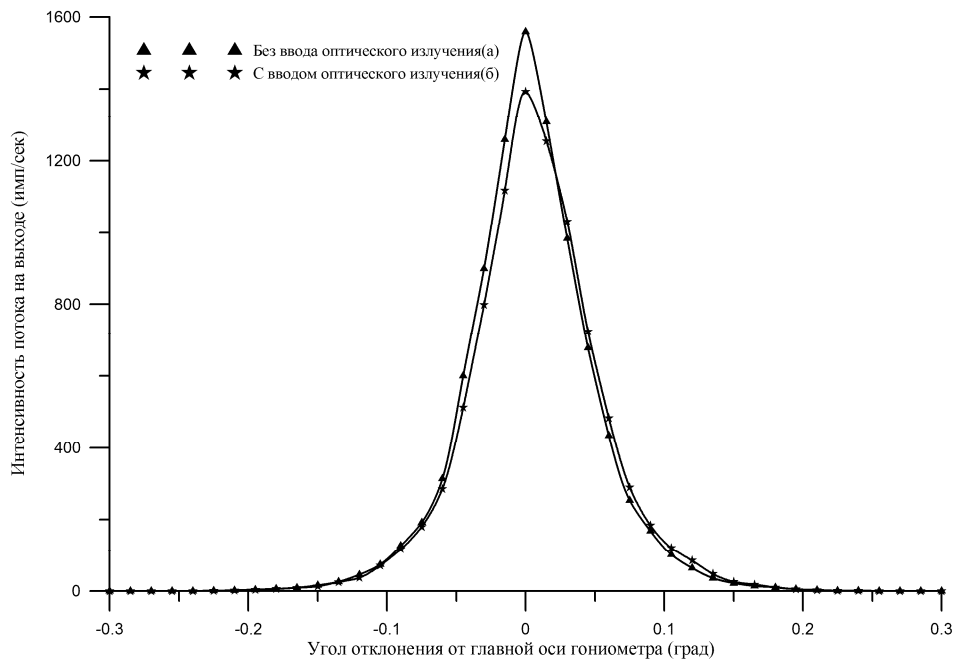


Рис. 12. Результат воздействия потока оптического излучения на распределение интенсивности в потоке излучения $\text{CuK}\alpha\beta$ на выходе ПРВР

В построенном нами устройстве вариация угла падения потока оптического квазимонохроматического излучения с длиной волны 532 нм в условиях реализации его полного внутреннего отражения в прозрачном кварцевом рефлекторе могла осуществляться в интервале углов $42.5\text{--}75^\circ$. При этом период стоячей оптической волны варьировался в размерном интервале 360–1027 нанометров, соответственно. (Надо иметь в виду, что угол полного внешнего отражения рентгеновского излучения θ , отсчитывается от отражающей поверхности, а угол полного внутреннего отражения в оптической литературе принято отсчитывать от перпендикуляра к этой поверхности.) На краях обоих интервалов периодов рентгеновских и оптических стоячих волн наблюдается двукратное различие этих периодов. В качестве рабочей гипотезы наблюдаемого эффекта предполагается появление регулярных искажений в структуре однородного интерференционного поля стоячей рентгеновской волны, возбуждаемой в щелевом зазоре плоского рентгеновского волновода-резонатора, которые могут быть представлены выражением:

$$\vec{E}(x) = \vec{A}\sin(\omega t + \psi_1) + \vec{B}\sin(2\omega t + \psi_2) \quad (8)$$

где ω – период стоячей рентгеновской волны, ψ_1 – ее исходный фазовый сдвиг, ψ_2 – фаза оптических стоячих волн. $\vec{A}$ и $\vec{B}$ – амплитуды этих стоячих волн.

Выдвинутая гипотеза имеет свои изъяны и главным из них является неопределенность фазы оптических стоячих волн. Дело в том, что при каждом акте возмущенного и невозмущенного полного внутреннего отражения набегает фазовые сдвиги и интерференционные области оптической стоячей волны могут оказаться несфазированными. Резонансный характер эффекта вроде бы не вызывает сомнений. В то же время не ясно, как оценить взаимные соотношения амплитуды $\vec{A}$ и $\vec{B}$ в выражении (8), поскольку возмущение интерференционного поля стоячей рентгеновской волны зависит не только от

соотношения фаз, но и от значений амплитуд, которые в нашей экспериментальной схеме регулировать не удастся. В рамках выполненного нами эксперимента не ясно также влияние поляризации потоков излучений. Определенные трудности связаны и с тем, что использованный нами световод выполнен из стеклянных, а не из кварцевых волокон. Использование кварцевого световода позволило бы нам использовать фиолетовый лазер. Еще одним фактором, создававшим дополнительные экспериментальные трудности, было отсутствие стабилизации потока лазерного излучения. В целом можно констатировать, что проведенные исследования позволили экспериментально доказать, что возможно инициировать фотон-фотонное взаимодействие через интерференцию интерференционных полей стоячих волн, возбужденных потоками этих фотонов. Для экспериментов в работе использовались потоки рентгеновского и оптического излучений и плоский рентгеновский волновод-резонатор, позволивший реализовать их взаимодействие. В то же время интересно отметить, что некоторая модификация использованного нами устройства позволит создать условия для взаимодействия независимых потоков оптического излучения различной природы.

Список литературы

1. Andersen S.K., Golovchenko J.A., Mair G. New applications of X-ray standing-wave fields to solid state physics // *Phys. Rev. Lett.* 1976. V.17. #17. P. 1141-1145.
2. Balz A.V. Fresnel zone plate for optical image formation using extreme ultraviolet soft X-ray radiation // *J. Opt. Soc. Am.* 1961. V.51. P. 405-412.
3. Batterman B.W. Effect of dynamical diffraction in X-ray fluorescence scattering // *Phys. Rev.* 1964. V.133. #3a. P. A759-A764.
4. Bedzyk M.J., Bommarito G.M., Schildraut J.S. X-ray standing waves at a reflecting mirror surface // *Phys. Rev. Lett.* 1989. V.62. #12. P. 1376-1379.
5. Compton A.H. The total reflection of X-rays // *Philos. Mag.* 1923. V.45. #270. P. 1121-1131.
6. da Cunka M.P., Fagundes S.A. Investigation of recent quartz-like materials for SAW application // *IEEE Trans. Ultrason, Ferroelect., Fre. Contr.* 1999. V.46. P. 1583-1590.
7. Egorov V.K., Egorov E.V. Planar waveguide-resonator: a new device for X-ray optics // *X-ray Spectrometry.* 2004. V.33. # 5. P. 360-371.
8. Egorov V.K., Egorov E.V. The experimental background and the model description for the waveguide-resonance propagation of X-ray radiation through a planar narrow extended slit // *Spectrochimica Acta.* 2004. V.B59. P. 1049-1069.
9. Egorov V.K., Egorov E.V., Bil'chik T.V. Planar X-ray waveguide-resonator and some aspects of it's practical application // *Исследовано в России: электронный многопредм. науч. журн.* 2002. т.3. С. 423-441. URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/040e.pdf>
10. Gasgnier M., Nevot L. Analysis and crystallographic structures of chromium thin films // *Phys. Status Solidi.* 1981. V.66a. P. 525-540.
11. Goos F., Hanchen H. Novel and fundamental investigation of total internal reflection // *Ann. Phys.* 1947. V.1. P. 333-346.
12. Jakiel J., Kantor W. Quantum (not frustrated) theory of the total internal reflection as the source of the Goos-Hanchen shift // *Eur. Phys. J.D.* 2014. V.68. P. 305-315.
13. Klockenkamper R. Total reflection X-ray fluorescence analysis. New York: Wiley, 2015. 519 p.
14. Kumakhov M., Komarov F. Multiple reflection from surface X-ray optics // *Phys. Rep.* 1990. V.191. P. 289-352.

15. Lotsch H.K.V. Reflecting and refraction of a beam of a light at a plane interface // JOSA. 1968. V.58. #4. P. 551-561.
16. Mandel L., Wolf E. Optical coherence and quantum optics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995. 631 p.
17. Meyer-Arendt J.R. Introduction to classical and modern optics. London: Prentice-Hall, 1984. 559 p.
18. Milosevic M. Internal reflection and art spectroscopy. New York: Wiley, 2012. 256 p.
19. Snigirev A., Kohn V., Snigireva I., Lengeler B. A compound refractive lens for focusing high energy X-ray // Nature. 1996. V.384. P. 49-51.
20. Tsuji K., Delalieux F. Characterization of X-ray emerging from between reflector and sample carrier in reflector-assisted TXRF analysis // X-ray Spectrometry. 2004. V.33. P. 281-284.
21. Wiener O. Standing light waves and direction of the polarized light oscillation // Ann. Phys. 1890. V. 40. P. 203-211.
22. Zwanenburg M.J., Peters J.F., Bongaerts J.H.H. and others. Coherent propagation of X-ray in a planar waveguide with a turnable air gap // Phys. Rev. Lett. 1999. V.82. #2. P. 1696-1699.
23. Zwanenburg M.J., van de Veen J.F., Ficke H.G. and others. A planar X-ray waveguide with a turnable air gap for the structure investigation of confined fluids // Rev. Sci. Instr. 2000. V.71. #4. P. 1723-1732.
24. Афанасьев А.М., Александров П.А., Имамов Р.М. Рентгенодифракционная диагностика субмикронных слоев. М.: Наука, 1989. 152 с.
25. Блохин М.А. Физика рентгеновских лучей. М.: ГИТТЛ, 1957. 518 с.
26. Бом Д. Квантовая теория. М.: Наука, 1965. 727 с.
27. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.
28. Бреховских Л.М. Волны в слоистых структурах. М.: Наука, 1973. 344 с.
29. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979. 374 с.
30. Джеймс Р. Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей. М.: ИИЛ, 1950. 572 с.
31. Дичьберн Р. Физическая оптика. М.: Наука, 1965. 631 с.
32. Егоров В.К., Егоров Е.В. Технологические аспекты построения плоского рентгеновского волновода-резонатора // Поверхность (рент., синх. нейтр. исследования). 2013. №7. С. 40-49.
33. Егоров В.К., Егоров Е.В., Афанасьев М.С. Ионопучковая диагностика тонкопленочных перовскитовых покрытий // Нанотехнология. 2012. №11. С. 46-59.
34. Егоров Е.В., Егоров В.К. Волновод-резонатор рентгеновского излучения как будущий конкурент синхротронных источников радиации // Поверхность (рентг., синхр. и нейтр. исследования). 2005. № 2. С. 5-16.
35. Желудева С.И., Ковальчук М.В., Новинкова Н.Н. и др. Рентгеновские волноводные моды в слоистых структурах // Кристаллография. 1995. т. 40. №1. С. 145-158.
36. Зоммерфельд А. Оптика. М.: ИИЛ, 1953. 486 с.
37. Иверонова В.И., Ревкевич Г.П. Теория рассеяния рентгеновских лучей. М.: изд. МГУ, 1978. 277 с.
38. Крылов Н.Н. Теоретические основы радиотехники. М.: Морской транспорт, 1961. 416 с.
39. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: ГИФМЛ, 1959. 532 с.
40. Перина Я. Когерентность света. М.: Мир, 1974. 367 с.
41. Фетисов Г.В. Синхротронное излучение, методы исследования структуры веществ. М.: Физматлит, 2007. 671 с.
42. Франсон М., Сланский С. Когерентность в оптике. М.: Наука, 1967. 80 с.
43. Харрик Н. Спектроскопия внутреннего отражения. М.: Мир, 1970. 335 с.

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ АЧХ ОДНОРОДНОГО УПРУГОГО СТЕРЖНЯ ПРИ СИНФАЗНОМ И ПРОТИВОФАЗНОМ ВИБРАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Затылкин С.В.

аспирант кафедры КиПРА,
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», Россия, г. Пенза

Телегин А.В.

старший научный сотрудник НИО, канд. техн. наук,
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», Россия, г. Пенза

Юрков Н.К.

зав. кафедрой КиПРА, доктор техн. наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», Россия, г. Пенза

В статье предложен алгоритм программы для проведения моделирования влияния деформационной составляющей на частотные свойства однородного упругого стержня, с учетом введения фазового сдвига во внешнее вибрационное воздействие в точках закрепления объекта исследования. Предложенный алгоритм доведен до программной реализации. В результате показано, что наличие разности фаз в точках возбуждения колебаний приводит к изменению частотных характеристик исследуемого объекта и появлению новых резонансов.

Ключевые слова: вибрация, надежность, радиоэлектронные средства, моделирование, конечные разности, смещение фаз.

Для исследования влияния деформационной составляющей на частотные свойства однородного упругого стержня в рамках данной работы было проведено компьютерное моделирование одномерного объекта. Для этого разработана новая программа, позволяющая пользователю ввести данные необходимые для проведения расчетов, просмотреть результаты и сохранить их в файл. Отличительной особенностью программы является возможность вводить фазовый сдвиг во внешнее вибрационное воздействие (изменяющееся по гармоническому закону) в точках закрепления стержня.

Основная программа должна содержать перечень всех используемых модулей и несколько исполняемых операторов, обеспечивающих создание нужных окон и связь программы с Windows. Работоспособность программы обеспечивается кодом, содержащимся в отдельных модулях. Код процедур и функций располагается в исполняемой части модуля, которая может быть скрыта от пользователя.

Алгоритмическое обеспечение разработанной программы показано на рисунке 1. Представленный алгоритм содержит циклические структуры (циклические алгоритмы). Циклическое описание многократно повторяемых процессов значительно снижает трудоемкость написания программ. Порядок выполнения операторов соответствует решению математических уравнений и соответствует предложенной структурной схеме программы.

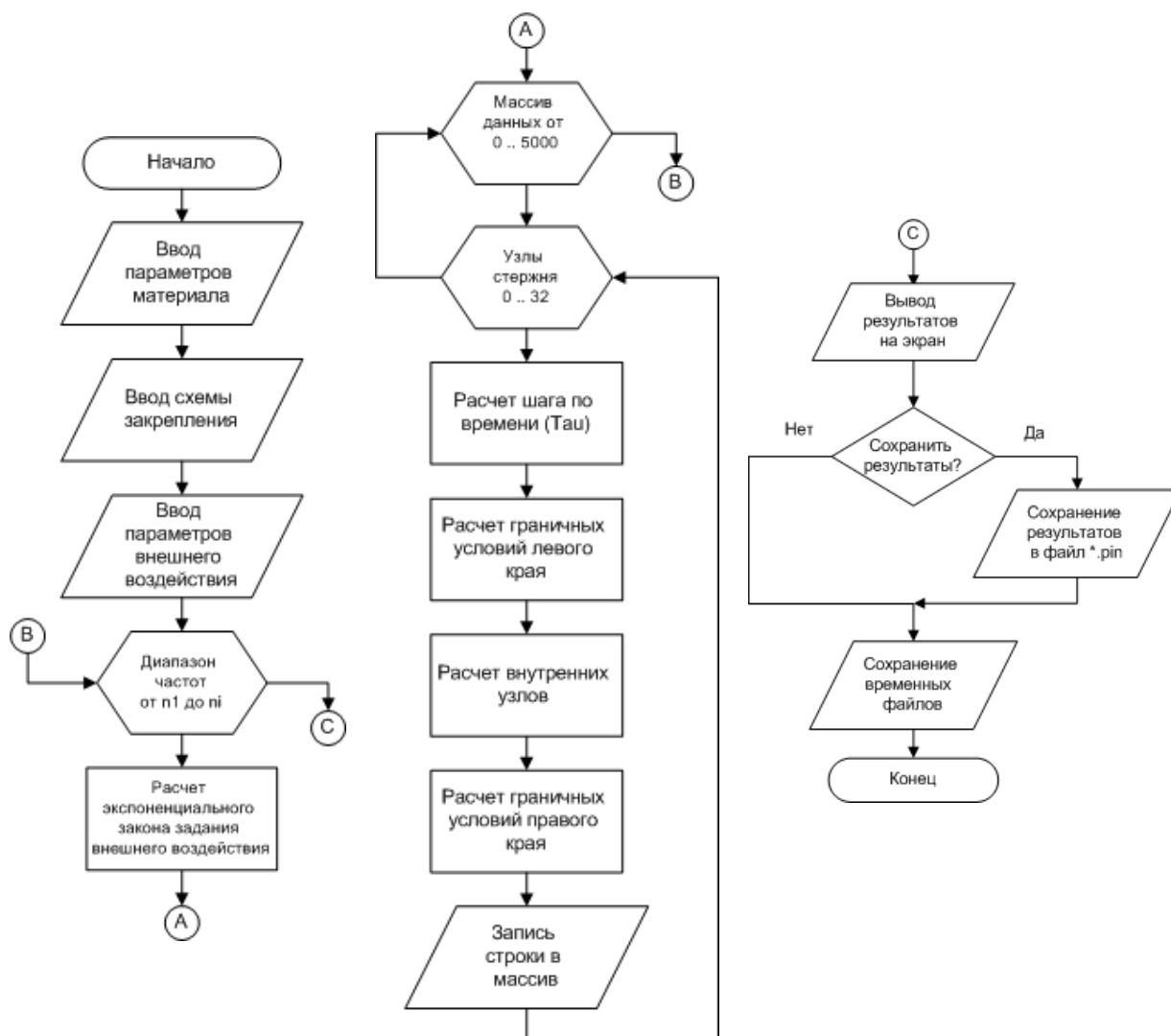


Рис. 1. Алгоритмическое обеспечение программы

Предложен интерфейс программы имитационного моделирования АЧХ стержневых конструкций бортовых РЭС, показанный на рисунках 2 и 3.

На графиках видно, что при синфазном вибрационном воздействии возбуждаются резонансы только на нечетных модах собственных колебаний. При противофазном воздействии возбуждаются резонансы нечетных мод.

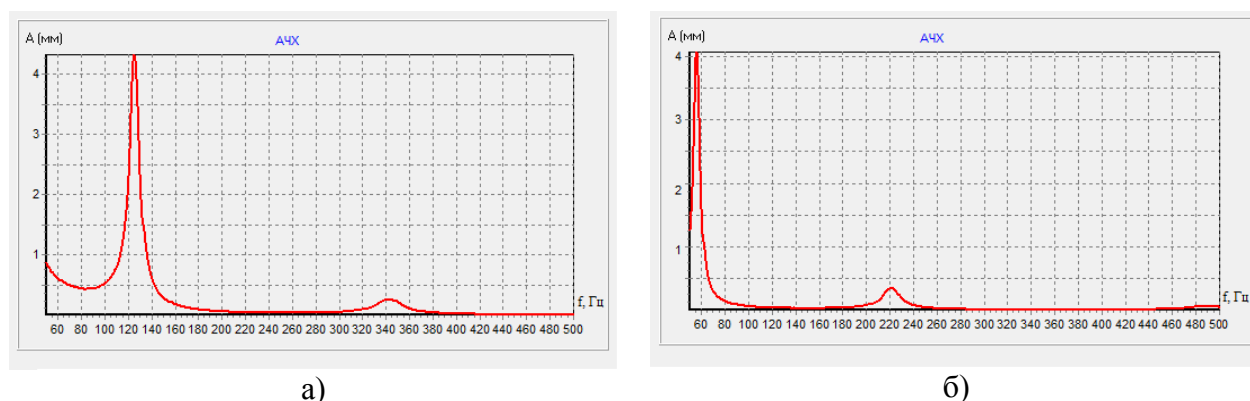


Рис. 2. Результаты моделирования АЧХ при синфазном (а) и противофазном (б) вибрационном воздействии

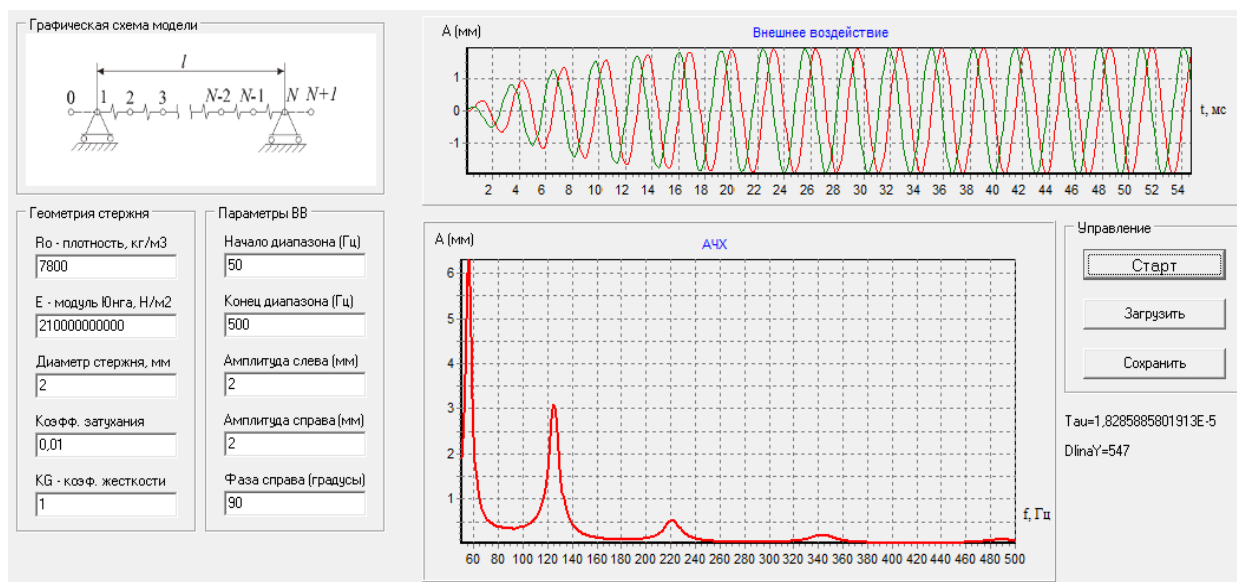


Рис. 3. Результаты моделирования АЧХ при фазовом сдвиге вибрационного воздействия на 90°

При возбуждении колебаний с фазовым сдвигом 90° возбуждаются все собственные формы, однако амплитуды колебаний ниже, чем при синфазном и противофазном воздействии.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Разработка методов и средств создания высоконадежных компонентов и систем бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и транспортной техники нового поколения» (Соглашение № 15-19-10037 от 20 мая 2015 г.) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

Список литературы

1. Затылкин, А.В. Дискретная модель процесса распространения импульса смещения в упругом стержне постоянного сечения при торцевом ударе [Текст] / Затылкин А.В., Таньков Г.В., Ольхов Д.В. // Вестник Пензенского государственного университета. 2013. № 4. С. 79-85.
2. Затылкин, А.В. Исследование влияния деформационной составляющей внешнего вибрационного воздействия на надёжность радиоэлектронных средств [Текст] / Затылкин А.В., Голушко Д.А., Рындин Д.А. // Труды международного симпозиума Надёжность и качество. 2013. Т. 2. С. 42-43.
3. Структурное обнаружение и различение вырывов проводящего рисунка печатных плат [Текст] / Григорьев А.В., Юрков Н.К., Затылкин А.В., Данилова Е.А., Држевецкий А.Л. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 4 (28). С. 97-108.
4. Установка для экспонирования фоторезиста на печатных платах в условиях учебной лаборатории [Текст] / Володин П.Н., Затылкин А.В. // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-1. С. 34-35.
5. Затылкин, А.В. Модели и методики управления интеллектуальными компьютерными обучающими системами [Текст] / Затылкин А.В. // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пензенский государственный университет. Пенза, 2009.
6. Затылкин, А.В. Опыт применения технологии ERM в разработке интеллектуальных средств обучения [Текст] / Затылкин А.В., Буц В.П., Юрков Н.К. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 5 (118). С. 218-223.

ЯВНОЕ РАЗНОСТНОЕ УРАВНЕНИЕ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ ОДНОРОДНОГО УПРУГОГО СТЕРЖНЯ

Лысенко А.В.

доцент кафедры КиПРА, канд. техн. наук,
Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза

Калаев В.С.

старший научный сотрудник НИО, канд. техн. наук,
Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза

Яшин Д.С.

преподаватель кафедры КиЭРО
Военный институт Сил воздушной обороны имени дважды Героя Со-
ветского Союза Бегельдинова Т.Я., Казахстан, г. Актобе,

В статье рассмотрено дифференциальное уравнение, описывающее изгибные колебания однородного упругого стержня. Проведены его преобразования к виду явного разностного уравнения, которое, будучи дополнено граничными и начальными условиями, образует явную разностную схему, позволяющую в сочетании с геометрической моделью получить расчетную модель стержня, достаточно просто реализуемую на ПК и позволяющую проводить теоретические исследования влияния внешних вибрационных воздействий на динамические характеристики одномерных объектов.

Ключевые слова: вибрация, надежность, радиоэлектронные средства, моделирование, конечные разности, стержневая модель.

В настоящее время существует различное программное обеспечение по моделированию внешних механических воздействий на конструкции [1-3]. Большая их часть ориентирована на проведение расчетов для строительных сооружений и мало пригодна для проведения расчетов в области электроники [4]. Кроме того, наиболее функциональные программы не бесплатны.

Основным их недостатком является построение АЧХ конструкции на основе результатов модального анализа, проводимого на различных частотах, что во-первых очень долго, а во-вторых есть возможность пропуска той или иной резонансной частоты [5]. Поэтому принято решение разработать простую программу для проведения анализа АЧХ стержневых элементов на основе хорошо известных методов математического моделирования.

Для определения амплитуд, механических напряжений в элементах стержневых конструкций в процессе эксплуатации рассмотрим уравнение их движения при вынужденных колебаниях. Изгибные колебания в стержне, описываются однородным уравнением:

$$EJ \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где $\omega(x,t)$ – смещение точек стержня перпендикулярно упругой оси; E – модуль Юнга; J – момент инерции сечения относительно оси, перпендикуляр-

ной плоскости изгиба; ρ – плотность материала; S – площадь поперечного сечения стержня.

Обозначая изгибную жесткость стержня как $C_s = EJ$, учтём потери энергии при колебаниях в виде диссипативной силы, пропорциональной скорости деформации и в правую часть добавим внешнюю силу $F(x, t)$, возбуждающую колебания и приложенную в точках крепления. Тогда уравнение вынужденных изгибных колебаний стержня запишется в виде:

$$C_s \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + \eta \frac{\partial}{\partial t} C_s \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = F(x, t), \quad (2)$$

где η – коэффициент вязкости материала.

В соответствии с методом конечных разностей заменим сплошной стержень совокупностью дискретных элементов с шагом разбиения по оси x , равным h_x . Массу каждого дискретного элемента сосредоточим в его центре – узле, лежащем на оси x ; силы взаимодействия между дискретными элементами заменяем упругими связями между узлами. Получим геометрическую дискретную модель стержня, состоящую из n узлов, соединенных упругими связями [6].

Заменив первую производную по времени в левой части (2) её разностным аналогом, и полагая, что $L(\omega) = \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4}$ запишем его в виде:

$$C_s L(\omega)_t + \frac{\eta}{\tau} [C_s L(\omega)_t - C_s L(\omega)_{t-\tau}] = -\rho S \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2}, \quad (3)$$

где τ – шаг дискретизации по времени, а сила $F(x, t)$ учитывается в начальных условиях.

Раскрыв скобки и сгруппировав подобные члены (3), получим:

$$-\left[\frac{(1 + \frac{\eta}{\tau}) C_s}{\rho S} L(\omega)_t - \frac{\frac{\eta}{\tau} C_s}{\rho S} L(\omega)_{t-\tau} \right] = \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2}, \quad (4)$$

Учитывая, что вторая производная от перемещения по времени есть ускорение a узла, запишем (4) в виде $a = \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2}$ и, заменив вторую производную по времени разностным аналогом, получим:

$$-\tau^2 a = \omega_x(t + \tau) - 2\omega_x(t) + \omega_x(t - \tau).$$

Преобразуем (4) к виду явного разностного уравнения:

$$-\tau^2 a + 2\omega_x(t) - \omega_x(t - \tau) = \omega_x(t + \tau),$$

которое, будучи дополнено граничными и начальными условиями, образует явную разностную схему, которая в сочетании с геометрической моделью дает расчетную модель стержня, достаточно просто реализуемую на ПК.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Разработка методов и средств создания высоконадежных компонентов и систем бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и транспортной техники нового поколения» (Соглашение № 15-19-10037 от 20 мая 2015г.) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

Список литературы

1. Затылкин, А.В. Дискретная модель процесса распространения импульса смещения в упругом стержне постоянного сечения при торцевом ударе [Текст] / Затылкин А.В., Таньков Г.В., Ольхов Д.В. // Вестник Пензенского государственного университета. 2013. № 4. С. 79-85.
2. Затылкин, А.В. Исследование влияния деформационной составляющей внешнего вибрационного воздействия на надёжность радиоэлектронных средств [Текст] / Затылкин А.В., Голушко Д.А., Рындин Д.А. // Труды международного симпозиума Надёжность и качество. 2013. Т. 2. С. 42-43.
3. Структурное обнаружение и различение вырывов проводящего рисунка печатных плат [Текст] / Григорьев А.В., Юрков Н.К., Затылкин А.В., Данилова Е.А., Држевецкий А.Л. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 4 (28). С. 97-108.
4. Установка для экспонирования фоторезиста на печатных платах в условиях учебной лаборатории [Текст] / Володин П.Н., Затылкин А.В. // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-1. С. 34-35.
5. Затылкин, А.В. Модели и методики управления интеллектуальными компьютерными обучающими системами [Текст] / Затылкин А.В. // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пензенский государственный университет. Пенза, 2009.
6. Затылкин, А.В. Опыт применения технологии ERM в разработке интеллектуальных средств обучения [Текст] / Затылкин А.В., Буц В.П., Юрков Н.К. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 5 (118). С. 218-223.

ВЫБОР БАЗОВЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ И СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ И СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Макаров В.Н.

ведущий инженер кафедры общей физики,
Оренбургский государственный университет, Россия, г. Оренбург

В статье рассмотрен способ нахождения базовых ферромагнетика и сегнетоэлектрика для конкретного типа кристаллической решетки. В качестве базовых ферромагнетика и сегнетоэлектрика предложены титанат бария (BaTiO_3) и интерметаллид золото-марганец (Au_2Mn), соответственно, что доказывается подобием кристаллических решеток и одинаковых типов связей.

Ключевые слова: базовый ферромагнетик и сегнетоэлектрик, идентификация, ферромагнетик, сегнетоэлектрик, титанат бария, интерметаллид золото-марганец.

Ранее [1] нами была предложена методика идентификации ферромагнитных и сегнетоэлектрических свойств материалов, основанная на сравне-

нии критериев подобия исследуемого материала с критерием подобия базовых ферромагнетика и сегнетоэлектрика. В данной работе рассмотрен способ нахождения базовых ферромагнетика и сегнетоэлектрика для конкретного типа кристаллической решетки. Условие принадлежности к одному структурному типу необходимо для обеспечения математического подобия исследуемых систем.

Тетрагональная решетка имеет среднюю категорию симметрии. Для данного типа кристаллической решетки материал способен быть сегнетоэлектриком и ферромагнетиком.

В качестве базовых сегнетоэлектрика и ферромагнетика нами предлагается титанат бария (BaTiO_3) и интерметаллид золото-марганец (Au_4Mn), соответственно, которые обладают сегнетоэлектрическими и ферромагнитными свойствами [2, 3, 4], имеющие тетрагональную структуру [2, 3, 5]. Интерметаллид золото-марганец имеет кристаллическую решетку типа Ni_4Mo [5]. Элементарные ячейки титаната бария (BaTiO_3) и интерметаллида золото-марганец (Au_4Mn) изображены на рисунке 1 и 2.

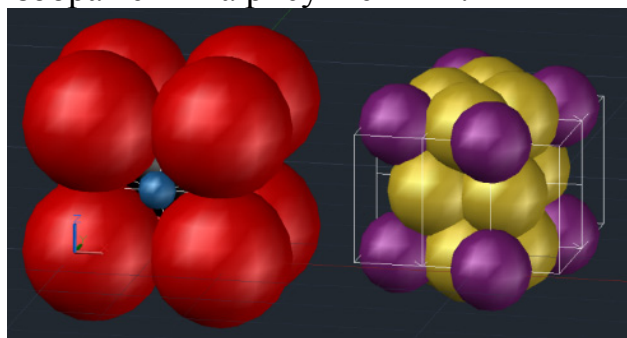


Рис. 1. Элементарные ячейки титаната бария (слева) и интерметаллида золото-марганец (справа). Построение выполнено в соответствии с параметрами кристаллической решетки [3, 5, 6] и атомными радиусами химических элементов [7]

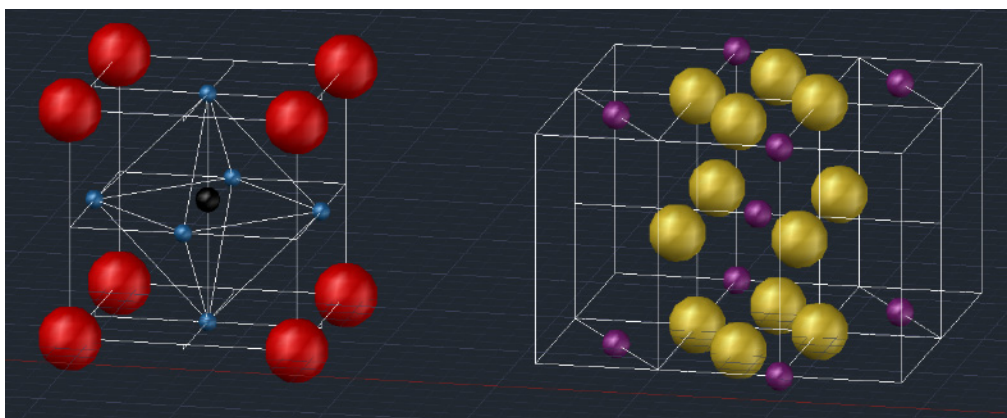


Рис. 2. Элементарные ячейки титаната бария (слева) и интерметаллида золото-марганец (справа). Построение выполнено в соответствии с параметрами кристаллической решетки [3, 5, 6] и атомными радиусами химических элементов, взятыми произвольно для наглядности

Кроме одинакового структурного типа базовые ферромагнетик и сегнетоэлектрик обладают одинаковыми типами связей. Титанат бария можно рассмотреть как интерметаллид (Ba_2Ti) с металлической связью и атомы кислорода, имеющие между собой ковалентную связь. Интерметаллид золото-

марганец обладает металлической связью, а атомы золота имеющие свободные электроны на d электронной оболочке, создают ковалентную связь [8].

На основании подобия кристаллических решеток и одинаковых типов связи интерметаллид золото-марганец (Au_4Mn) и титанат бария (BaTiO_3) можно рассматривать как базовые ферромагнетик и сегнетоэлектрик, и применять в качестве идентификации ферромагнитных и сегнетоэлектрических свойств материалов.

Список литературы

1. Макаров, В.Н. К вопросу об обменном и кулоновском взаимодействиях в ферромагнетиках и сегнетоэлектриках [Текст]/ В.Н. Макаров, О.Н. Каныгина// Физика прочности и пластичности материалов: сб. тез. XIX Международной конференции/ Ответственный редактор А.М. Штеренберг. – Самара: Самар. гос. тех. ун-т, 2015. – С. 72.
2. Иона, Ф. Сегнетоэлектрические кристаллы [Текст] / Ф. Иона, Д. Ширане; пер. с англ. Л.А. Фейгина и Б.К. Севастьянова, под ред. Л.А. Шувалова. – М.: Мир, 1965. – 555 с.
3. Physics of Ferroelectrics. A Modern Perspective / K. Rabe, Ch.H. Ahn, J.-M. Triscone (Eds.). – New York: PACS, 2007. – 383.
4. On the magnetism of Au_4Ti , Au_4V , Au_4Cr , Au_4Mn , Au_8TiCr , and Au_8VMn [Text]/ H. Yahagi, K. Yano, H. Itoga and etc.// Journal of applied physics/ Department of Electronics, Shibaura Institute of Tecnology. – Tokyo. – 1963. – 69. – P. 4651-4653.
5. Watanabe, D. The Crystal Structure of the Ordered Alloy Au_4Mn [Text]/ D. Watanabe// Acta Crystallogr. – 1957. – 10. – P. 483-485.
6. Soffa, W.A. High-strength age hardening copper–titanium alloys: redivivus [Text]/ W.A. Soffa, D.E. Laughlin// Progress in Materials Science. – 2004. – 49. – P. 347–366.
7. Физические величины. Справочник [Текст]/ под ред. И.С Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
8. Ашкрофт, Н. Физика твердого тела. Том 2 [Текст]/ Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М.: Мир, 1979. – 422 с.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ВЕРХНЕГО СПЕКТРА ЧАСТОТ НА НАДЕЖНОСТЬ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Ольхов Д.В.

студент кафедры КиПРА,
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», Россия, г. Пенза

Бушмелев П.Е.

старший научный сотрудник НИО, канд. техн. наук,
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», Россия, г. Пенза

Юрков Н.К.

зав. кафедрой КиПРА, доктор техн. наук, профессор,
Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза

В статье проведен анализ динамических характеристик пластины, с учетом разного удаления точек крепления пластины к поверхности, в которой происходит распространение сферической волны от источника вибрации. В результате показано, что наличие

разности фаз в точках возбуждения колебаний приводит к изменению частотных характеристик исследуемого объекта и появлению новых резонансов с высокой добротностью.

Ключевые слова: вибрация, надежность, радиоэлектронные средства, моделирование, сферическая волна, смещение фаз, источник вибрации.

В настоящее время задача повышения надежности радиоэлектронных средств (РЭС), устанавливаемых на подвижных носителях является актуальной. Анализ результатов испытаний на устойчивость к вибрации простейших элементов конструкций РЭС (стержней и пластин) показал, что с ростом частоты вибровоздействия повышается вероятность его механического повреждения [1].

Для выяснения причин попробуем разобраться в том, что же происходит с текстолитовой пластиной, закрепленной в четырех точках.

Уравнением волны называется выражение, которое дает смещение колеблющейся точки как функцию ее координат (x, y, z) и времени t . В случае, когда скорость волны v во всех направлениях постоянна, а источник точечный, волна называется сферической. В этом случае амплитуда колебаний, даже если волна не поглощается средой, будет не постоянной, а обратно пропорциональной расстоянию (r) от источника, что следует из рассмотрения энергии, переносимой волной. Уравнение сферической волны имеет вид:

$$\xi = \frac{A_0}{r} \cos(\omega \cdot t - k \cdot x + \phi_0), \quad (1)$$

где A_0 – амплитуда источника; ω – частота источника; ϕ_0 – фаза источника колебаний; k – волновое число.

Уравнение (1) неприменимо для малых r , т.к. при $r \rightarrow 0$, $\xi \rightarrow \infty$, а справедливо на больших расстояниях от источника (по крайней мере, больше длины волны) [2].

Объектом исследования является пластина (стеклотекстолит), закрепленная на сплошном стальном основании резьбовыми бонками в четырех точках с помощью винтового соединения. Предметом исследования являются динамические характеристики пластины (в частности, значения критических частот, выявленных в процессе испытаний). Критическая частота: частота на которой в зависимости от уровня вибрации появляется эффект неправильного функционирования образца или ухудшение его эксплуатационных характеристик или наблюдаются механические резонансы или другие эффекты, связанные с вибрацией, например, дребезжание [3].

В ходе теоретических экспериментов были проведены расчёты воздействия удаленного источника вибрации на исследуемый объект. В виде объекта исследования была пластина стеклотекстолита 12x18x0,2 см (рис. 1). Средой распространения гармонического воздействия являлась сталь. Источник колебаний находился на расстоянии 1,3 м (точка №1 крепления объекта исследования), 1,34 м (точка №2 точки), 1,48 м (3 точка), 1,52 м (4 точки).

В ходе теоретического эксперимента была исследована зависимость фазочастотных характеристик вибрации возникающей в точках крепления

исследуемого объекта. На рисунке 1 показаны сигналы вибрационного воздействия возбуждаемого во всех точках крепления исследуемого объекта относительно источника вибрации на частотах 200 Гц и 2 кГц (рисунки 2 и 3). Расчёты показали, что на частоте от 1 000 Гц и выше между 1 и 4 точками крепления наблюдается разность фаз – более 60° .

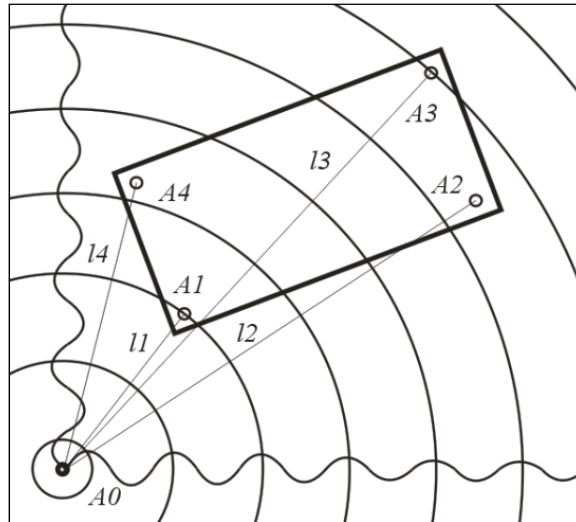


Рис. 1. Распространение сферической волны от источника вибрации к точкам крепления ОИ

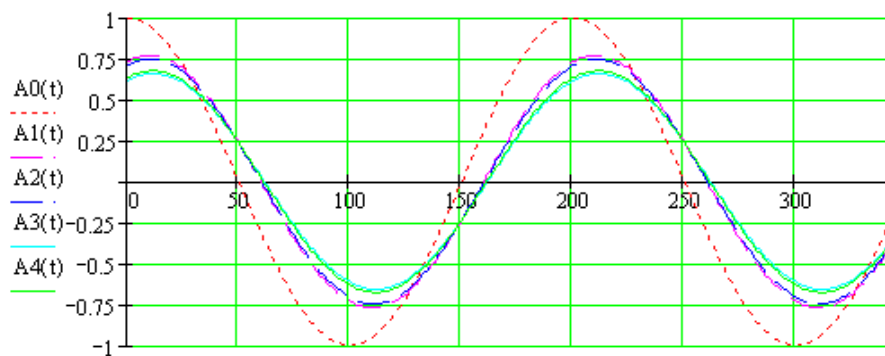


Рис. 2. Смещение фаз вибрационного воздействия в точках крепления пластины (A1-A4) относительно источника вибрации (A0) на частоте 200 Гц

На рисунке 4 видно, что колебания точек (A1-A4) смещены не только относительно источника вибрации (A0), но и относительно друг друга (частота 2 кГц). Очевидно, что наибольшее смещение оказалось между точками A1 и A3. Это смещение равно 55% от амплитудного [4].

Дальнейшее повышение частоты внешнего воздействия приводит к увеличению фазового сдвига в точках крепления пластины (рис. 2) и даже может привести к разности фаз 180° , т.е. колебанию точек крепления в противофазе (!) друг относительно друга.

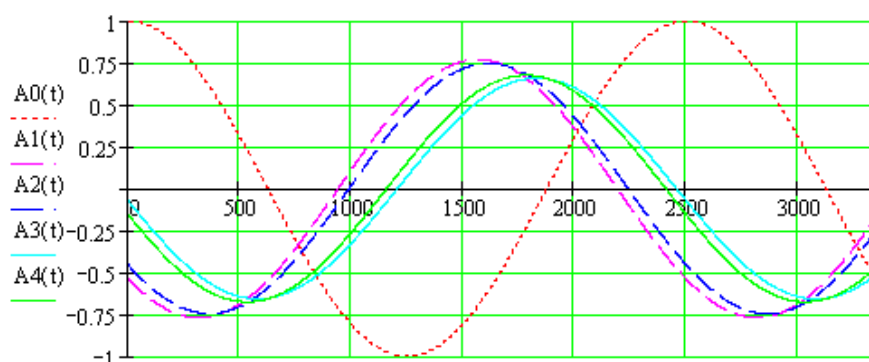


Рис. 3. Смещение фаз вибрационного воздействия в точках крепления пластины (A1-A4) относительно источника вибрации (A0) и на частоте 2 кГц

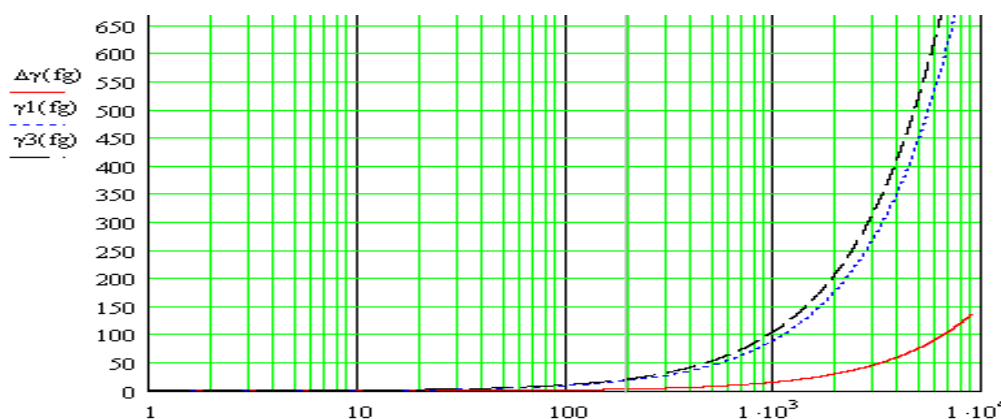


Рис. 4. Зависимость величины фазового сдвига в наиболее удаленных точках крепления исследуемой пластины от частоты внешнего вибрационного воздействия

Спектр критических частот определяется частотной зависимостью затухания акустических колебаний в материале, размерами и формой образца, координатами источника и приемника сигнала, а так же характером процесса возбуждения [5]. Наличие деформационной составляющей приводит к изменению частотных характеристик и появлению новых резонансов с высокой добротностью [2, 6]. В связи с этим в дальнейшем необходимо провести анализ распространения стоячих волн в одномерных (стержни) и двумерных (пластины) элементах, к набору которых можно свести любую конструкцию РЭС.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Разработка методов и средств создания высоконадежных компонентов и систем бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и транспортной техники нового поколения» (Соглашение № 15-19-10037 от 20 мая 2015 г.) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

Список литературы

1. Затылкин, А.В. Дискретная модель процесса распространения импульса смещения в упругом стержне постоянного сечения при торцевом ударе [Текст] / Затылкин А.В., Таньков Г.В., Ольхов Д.В. // Вестник Пензенского государственного университета. 2013. № 4. С. 79-85.
2. Затылкин, А.В. Исследование влияния деформационной составляющей внешнего вибрационного воздействия на надёжность радиоэлектронных средств [Текст] / Затылкин

А.В., Голушко Д.А., Рындин Д.А. // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2013. Т. 2. С. 42-43.

3. Структурное обнаружение и различение вырывов проводящего рисунка печатных плат [Текст] / Григорьев А.В., Юрков Н.К., Затылкин А.В., Данилова Е.А., Држевецкий А.Л. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 4 (28). С. 97-108.

4. Установка для экспонирования фоторезиста на печатных платах в условиях учебной лаборатории [Текст] / Володин П.Н., Затылкин А.В. // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-1. С. 34-35.

5. Затылкин, А.В. Модели и методики управления интеллектуальными компьютерными обучающими системами [Текст] / Затылкин А.В. // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пензенский государственный университет. Пенза, 2009.

6. Затылкин, А.В. Опыт применения технологии ERM в разработке интеллектуальных средств обучения [Текст] / Затылкин А.В., Буц В.П., Юрков Н.К. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 5 (118). С. 218-223.

КОНЕЧНЫЕ РЕШЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ

Тасмамбетова А.Ж.

заместитель руководителя Службы актуарных расчетов и анализа,
АО «Компания по страхованию жизни «Государственная аннуитетная
компания», Казахстан, г. Астана

Тасмамбетов Ж.Н.

профессор кафедры Информатики и вычислительной техники,
д-р. физ.-мат. наук, профессор,
Актюбинский региональный государственный университет имени К. Жубанова,
Казахстан, г. Актобе

Установлены необходимые и достаточные условия существования конечного решения для одной специальной системы дифференциальных уравнений в частных производных, находящей большое применение при решении задач матфизики и механики.

Ключевые слова: регулярная особенность, необходимое, система, существование, конечное решение.

1. Постановка задачи. Рассматривается система с регулярной особенностью в $(x=0, y=0)$:

$$\left. \begin{aligned} x^2 p_0 \cdot Z_{xx} + x p_1 \cdot Z_x + y p_2 \cdot Z_y + p_3 \cdot Z &= 0, \\ y^2 g_0 \cdot Z_{yy} + x g_1 \cdot Z_x + y g_3 \cdot Z_y + g_3 \cdot Z &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

где $p_i(x, y)$ и $g_i(x, y)$ ($i=0, 1, 2, 3$) многочлены двух переменных

$$p_i(x, y) = \sum_{s,l=0}^{h,r} a_{s,l}^{(i)} \cdot x^s \cdot y^l, g_i(x, y) = \sum_{s,l=0}^{h,r} b_{s,l}^{(i)} \cdot x^s \cdot y^l, (i=0, 1, 2, 3) \quad (1.2)$$

а $Z = Z(x, y)$ - общая неизвестная, которая следует определить.

Требуется установить необходимые и достаточные условия существования решений в конечной форме, исследуя по ходу всевозможные различные частные случаи.

Общие системы, с произвольными коэффициентами были изучены в работах [1]-[2]. Американский математик Е. Вильчинский [3] такие системы использовал для обоснования проективно-дифференциальной геометрии [3]. В работах [4]-[5] были построены нормальные и нормально-решения решения системы методом Фробениуса –Латышевой вблизи регулярных и иррегулярных особенностей используя понятия ранга и антиранга. В случае линейных обыкновенных дифференциальных уравнений понятия ранга $p = 1 + k$ (k -подранг) введенного А.Пуанкаре и антиранга $m = -1 - \lambda$ (λ - антиранг), введенного Л.Томе используется для установления общего вида решения. В случае изучаемой системы (1.1)-(1.2) ранг и антиранг определяются неравенствами

$$1 + \min_{(0 \leq \nu \leq n-1)} \frac{\beta_n - \beta_0}{n - \nu} \leq p \leq 1 + \max_{(0 \leq \nu \leq n)} \frac{\beta_n - \beta_0}{\nu} \quad (\text{ранг}) \quad (1.3)$$

$$1 + \min_{(1 \leq \nu \leq n)} \frac{\pi_\nu - \pi_0}{\nu} = -m \leq 1 + \max_{(0 \leq \nu \leq n-1)} \frac{\pi_\nu - \pi_0}{n - \nu} \quad (\text{антиранг}) \quad (1.4)$$

Ранг определяются по наибольшим, а антиранг по наименьшим степеням независимых переменных x и y . Так, в случае регулярной системы ранг $p = 0$ и антиранг $m = 0$. Это дает признак регулярности изучаемой системы. Обычно понятия ранга связывают с особенностью (∞, ∞) , а антиранга с особенностью $(0, 0)$. Если особенность $(0, 0)$ регулярная, то нормальное решение превращается в ряд

$$Z = x^\rho \cdot y^\sigma = \sum_{\mu, \nu=0}^{h, r} B_{\mu, \nu} \cdot x^{-\mu} \cdot y^{-\nu} \quad (B_{0,0} \neq 0) \quad (1.5)$$

а нормально-регулярное решение представляется в виде ряда

$$Z = x^\rho \cdot y^\sigma \cdot \sum_{\mu, \nu=0}^{\infty} A_{\mu, \nu} \cdot x^\mu \cdot y^\nu \quad (A_{0,0} \neq 0), \quad (1.6)$$

где $\rho, \sigma, B_{\mu, \nu}$ и $A_{\mu, \nu}$ ($\mu, \nu = 0, 1, 2, \dots$) -неизвестные постоянные.

2. Применения метода Фробениуса-Латышевой

Для исследования системы (1.1)-(1.2) будем пользоваться методом Фробениуса-Латышевой [5]. С этой целью запишем систему характеристических уравнений полученной из заданной системы путем подстановки вместо неизвестной $Z(x, y) = x^\rho \cdot y^\sigma$:

$$L_j [x^\rho y^\sigma] \equiv x^\rho y^\sigma \{ f_{00}^{(j)}(\rho, \sigma) + f_{10}^{(j)}(\rho, \sigma)x + f_{01}^{(j)}(\rho, \sigma)y + \dots + f_{h,r}^{(j)}(\rho, \sigma)x^h y^r \}, \quad (2.1)$$

где $f_{s,l}^{(j)}(\rho, \sigma)$ ($j = 1, 2, \dots, h; l = 1, 2, \dots, r$) коэффициенты зависящие от ρ и σ .

Решения системы ищем в виде (1.5) или (1.6). Поэтому, нам сначала важно установить необходимые условия существования решения вида (1.5) и (1.6).

Теорема 2.1. Для того, чтобы система (1.1) – (1.2) имела решения вида (1.6), необходимо, чтобы пара (ρ, σ) была корнем системы определяющих уравнений относительно особенности $(0,0)$ вида

$$\left. \begin{aligned} f_{00}^{(1)}(\rho, \sigma) &= a_{00}^{(0)}\rho(\rho-1) + a_{00}^{(1)}\rho + a_{00}^{(2)}\sigma + a_{00}^{(3)} \equiv 0, \\ f_{00}^{(2)}(\rho, \sigma) &= b_{00}^{(0)}\sigma(\sigma-1) + b_{00}^{(1)}\rho + b_{00}^{(2)}\sigma + b_{00}^{(3)} \equiv 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

где $f_{00}^{(j)}(\rho, \sigma)$ ($j=1,2$) есть коэффициенты при нулевых степенях (x^0 и y^0) системы характеристических уравнений полученной из системы (1.1) – (1.2) путем подстановки вместо неизвестной $Z(x, y) = x^\rho \cdot y^\sigma$.

Теорема 2.2. Для того, чтобы система (1.1) – (1.2) имела решения вида (1.5) необходимо, чтобы пара (ρ, σ) была корнем системы определяющих уравнений относительно особенности (∞, ∞) вида:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{00}^{(1)}(\rho, \sigma) &= a_{h,r}^{(0)}\rho(\rho-1) + a_{h,r}^{(1)}\rho + a_{h,r}^{(2)}\sigma + a_{h,r}^{(3)} = 0, \\ \varphi_{00}^{(2)}(\rho, \sigma) &= b_{h,r}^{(0)}\sigma(\sigma-1) + b_{h,r}^{(1)}\rho + b_{h,r}^{(2)}\sigma + b_{h,r}^{(3)} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где $\varphi_{00}^{(j)}(\rho, \sigma)$ ($j=1,2$)-коэффициенты при наибольших степенях системы характеристических функций.

Из каждой двух систем (2.2) и (2.3) определяются до четырех пар корней (ρ_k, σ_k) , ($k=1,2,3,4$), что дает возможность построить по четыре линейно-независимых решений вблизи особенностей $(0,0)$ и (∞, ∞) . Неизвестные коэффициенты $A_{\mu, \nu}$ и $B_{\mu, \nu}$ ($\mu, \nu=0,1,2, \dots$) определяются из рекуррентных последовательностей систем [5].

Дальнейшее наши исследования будут связаны с понятием **размаха** коэффициентов изучаемой системы.

Определение 2.1. Размахом коэффициентов системы (1.1) – (1.2) называется число слагаемых в правой части системы характеристических уравнений (2.1).

Изучим возможности существования конечных решений для системы (1.1) – (1.2) при значениях размаха коэффициентов $\nu = 0,1,2$. В первом случае, когда $\nu = 0$, получим систему типа Эйлера

$$\left. \begin{aligned} a_{00}^{(0)} \cdot x^2 \cdot Z_{xx} + a_{00}^{(1)} x \cdot Z_x + a_{00}^{(2)} y \cdot Z_y + a_{00}^{(3)} \cdot Z &= 0, \\ b_{00}^{(0)} y^2 \cdot Z_{yy} + b_{00}^{(1)} x \cdot Z_x + b_{00}^{(2)} y \cdot Z_y + b_{00}^{(3)} \cdot Z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Система определяющих уравнений относительно особенностей $(0,0)$ и (∞, ∞) совпадают, то есть выполняются равенства

$$\left. \begin{aligned} f_{00}^{(1)} &\equiv \varphi_{00}^{(1)} = a_{00}^{(0)} \cdot \rho(\rho-1) + a_{00}^{(1)}\rho + a_{00}^{(2)}\sigma + a_{00}^{(3)} \equiv 0, \\ f_{00}^{(2)} &\equiv \varphi_{00}^{(2)} = b_{00}^{(0)} \cdot \sigma(\sigma-1) + b_{00}^{(1)}\rho + b_{00}^{(2)}\sigma + b_{00}^{(3)} \equiv 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Предполагая, что пары корней различны, четыре линейно независимых решения в конечной форме получаем, в виде

$$Z_k = x^{\rho_k} \cdot y^{\sigma_k} \quad (k=1,2,3,4). \quad (2.6)$$

Если $\rho_1 = \rho_2$ и $\sigma_1 = \sigma_2$, то система будет иметь логарифмические решения

$$Z_2 = x^{\rho_1} \cdot y^{\sigma_1} \cdot \ln x, \quad Z_3 = x^{\rho_1} \cdot y^{\sigma_1} \cdot \ln y, \quad Z_4 = x^{\rho_1} \cdot y^{\sigma_1} \cdot \ln x \cdot \ln y. \quad (2.7)$$

Пусть теперь $\nu = 1$. Из нескольких возможных представлений выбираем следующее:

$$\rho_i(x, y) = a_{00}^{(i)} + a_{10}^{(i)} x, \quad g_i(x, y) = b_{00}^{(i)} + b_{0,1}^{(i)} y \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (2.8)$$

тогда получаем систему

$$\left. \begin{aligned} x_2 \cdot p_0(x, y) Z_{xx} + x \cdot p_1(x, y) Z_x + y \cdot p_2(x, y) Z_y + p_3(x, y) Z &= 0, \\ y_2 \cdot g_0(x, y) Z_{yy} + x \cdot g_1(x, y) Z_y + y \cdot g_3(x, y) Z_y + g_3(x, y) Z &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

с учетом коэффициентов (2.8).

Систему характеристических уравнений Фробениуса для рассматриваемой системы получим или в виде

$$\begin{aligned} L_1[x^\rho \cdot y^\sigma] &\equiv x^\rho \cdot y^\sigma \{f_{00}^{(1)}(\rho, \sigma) + f_{1,0}^{(1)}(\rho, \sigma) \cdot x\}, \\ L_2[x^\rho \cdot y^\sigma] &\equiv x^\rho \cdot y^\sigma \{f_{00}^{(2)}(\rho, \sigma) + f_{1,0}^{(2)}(\rho, \sigma) \cdot y\} \end{aligned} \quad (2.10)$$

или

$$\begin{aligned} L_1[x^\rho \cdot y^\sigma] &\equiv x^{\rho+1} \cdot y^\sigma \left\{ \varphi_{00}^{(1)}(\rho, \sigma) + \frac{\varphi_{1,0}^{(1)}(\rho, \sigma)}{x} \right\}, \\ L_2[x^\rho \cdot y^\sigma] &\equiv x^\rho \cdot y^{\sigma+1} \left\{ \varphi_{00}^{(2)}(\rho, \sigma) + \frac{\varphi_{0,1}^{(2)}(\rho, \sigma)}{y} \right\}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

где

$$f_{00}^{(1)}(\rho, \sigma) \equiv \varphi_{10}^{(1)}(\rho, \sigma), \quad f_{00}^{(2)}(\rho, \sigma) \equiv \varphi_{00}^{(2)}(\rho, \sigma), \quad f_{10}^{(1)}(\rho, \sigma) \equiv \varphi_{10}^{(1)}(\rho, \sigma), \quad f_{01}^{(2)}(\rho, \sigma) \equiv \varphi_{00}^{(2)}(\rho, \sigma).$$

Наиболее важным моментом является установление характера особенностей. Исходя из рассуждений простого признака [5] устанавливаем регулярность особенностей $(0, 0)$ и (∞, ∞) .

Признак 1. Если коэффициенты $a_{00}^{(0)}$ и $b_{00}^{(0)}$ при старших производных Z_{xx} и Z_{yy} отличны от нуля, то особенность $(0, 0)$ для системы (2.4) с коэффициентами вида (2.8) является регулярной особенностью и решения системы определяется в виде (1.6).

Признак 2. Если коэффициенты $a_{10}^{(0)}$ и $b_{01}^{(0)}$ при старших производных Z_{xx} и Z_{yy} отличны от нуля, то особенность (∞, ∞) для системы (2.4) с коэффициентами вида (2.8) является регулярной особенностью в виде (1.5).

Конечные решения существует тогда, когда ряды (1.6) и (1.5) **вырождаются** в многочлены двух переменных

$$Z = x^\alpha \cdot y^\beta \cdot (A_{0,0} + A_{1,0} \cdot x + A_{0,1} \cdot y + \dots + A_{h,r} \cdot x^h \cdot y^r) \quad (2.12)$$

или

$$Z = x^\gamma \cdot y^\delta \cdot (B_{0,0} + B_{1,0} \cdot x + B_{0,1} \cdot y + \dots + B_{h,r} \cdot x^h \cdot y^r) \quad (2.13)$$

где h и r - целые неотрицательные числа; α, β -некоторые постоянные; $\gamma = \alpha + h, \delta = \beta + r$ -также некоторые постоянные. Тогда справедливо утверждение.

Теорема 2.3. Для того, чтобы система дифференциальных уравнений в частных производных специального вида (2.4) с полиномиальными коэффициентами (2.8), размах которой равен двум ($\nu+1=2$), имела решения в конечном виде необходимо и достаточно, чтобы β разности пар $(\gamma, \delta) - (\alpha, \beta) = (g, q)$ числа g и q - были целыми числами или нулями.

Эту теорему можно обобщить для наиболее общих случаев размаха коэффициентов $\nu+1$. При доказательстве применяется методика приведенная в [6].

Теорема 2.4. Для того, чтобы система (2.4) с полиномиальными коэффициентами (2.8), для которой ($\nu_1=1$), не имела логарифмического решения, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись равенства

$$f_{10}^{(1)}(\alpha + g - 1, \beta + q) = 0, f_{01}^{(2)}(\alpha + g, \beta + q - 1) = 0.$$

Здесь уместно подчеркнуть связь изучаемых систем со специальными функциями двух переменных. Из 34-систем со списка Горна[8], только система (Ψ_2) связана с изученной нами системой (1.1)-(1.2).

Пример 2.1. Система

$$\left. \begin{aligned} x \cdot Z_{xx} + (\gamma - x) \cdot Z_x - y Z_y - \lambda Z &= 0, \\ y \cdot Z_{yy} + (\gamma' - y) \cdot Z_y - x Z_x - \lambda Z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

является частным случаем системы (2.9) с коэффициентами вида (2.8). Это соответствует случаю размаха коэффициентов $\nu+1=2$.

Система определяющих уравнений относительно особенности $(0,0)$: имеет четыре пары корней:

$$(\rho_1 = 0, \sigma_1 = 0), (\rho_1 = 0, \sigma_2 = 1 - \gamma'), (\rho_2 = 1 - \gamma, \sigma_1 = 0), (\rho_2 = 1 - \gamma, \sigma_2 = 1 - \gamma').$$

Решение соответствующее показателю $(\rho_1 = 0, \sigma_1 = 0)$ дает первое частное решение

$$Z_1 = 1 + \frac{\lambda}{\gamma} \cdot x + \frac{\lambda}{\gamma'} \cdot y + \frac{\lambda(\lambda+1)}{\gamma \cdot \gamma'} \cdot xy + \dots$$

Это решение является известной вырожденной гипергеометрической функцией Куммера Ψ_2 :

$$Z_1 = \sum_{\mu, \nu=0}^{\infty} \frac{(\lambda)_{\mu+\nu}}{(\gamma)_{\mu} (\gamma')_{\nu} \cdot \mu \cdot \nu!} \cdot x^{\mu} y^{\nu} = \Psi_2(\lambda, \gamma, \gamma'; x, y).$$

Если $\lambda = 0$ или целому отрицательному числу, то ряд Z_1 обрывается, то есть решения в конечной форме в зависимости от значения λ . Так, при $\alpha=0, Z_1=1$, а при $\lambda=-1, Z_1=1-\frac{1}{\gamma}x-\frac{1}{\gamma'}y$, и т.д. Это на самом деле соответствует определенными нами условиям: $(\gamma, \delta) - (\alpha, \beta) = (g, q)$, где

$(g, q) = (0, 0), (g, q) = (-1, -1)$ и т.д. Если параметры $\gamma = 1, \gamma' = 1$, то система определяющих уравнений (2.15) имеет кратные пары корней ($\rho_i = 0, \sigma_i > 0$), тогда система (2.15) имеет логарифмические решения. Случаи размаха коэффициентов $\nu + 1 = 3, \nu + 1 = 4, \dots$ рассматриваются аналогичным образом. Таким образом, используя понятие размаха коэффициентов нам удалось доказать необходимое и достаточное условие существования конечного решения изучаемой системы.

Список литературы

1. Appell P., Kampe de Fériet m.g. Fonctions hypergeométriques de hypersphériques. Polynômes d'Hermite. – Paris: Gauthier-Villars, 1926, 434 p.
2. Sterberg W. Über die asymptotische Integration von Differentialgleichungen // Math. Ann.-1920, Bd. 81, p.119-186.
3. Wilczynski E.J. Projective Differential Geometry of Curves and Ruled Surfaces.- Leipzig: Leubner, 1906, 120 p.
4. Самойленко А.М., Перестюк Н.А. Нормальные решения одной специальной системы дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка. (Препр, АН УССР; Институт математики; 89.4). Киев, 1989, 40с.
5. Тасмамбетов Ж.Н. Построение решения системы дифференциальных уравнений в частных производных с регулярной особенностью обобщенным методом Фробениуса.-(Препр./ АН УССР. Институт математики; 91.29). Киев, 1999, 44 с.
6. Тасмамбетов Ж.Н. Конечные решения системы Айнса с регулярной особенностью// Материалы II-ой Международной конференции «Проблемы дифференциальных уравнений, анализы и алгебры» (Актобе, 15-19 сентября 1999 г.) Актобе, 2000, с. 181-184.
7. Бейтмен Г. И Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции, ч.I. Гипергеометрическая функция. Функции Лежандра.-М.: Наука, 1965, 294с.

ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ГАУССОВСКОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ЭНТРОПИЙНОЙ МОДЕЛИ

Тырсин А.Н.

старший научный сотрудник, д-р техн. наук, доцент,
Институт экономики УрО РАН, Россия, г. Екатеринбург

Соколова И.С.

ведущий специалист, канд. физ.-мат. наук,
ООО «Прикладные технологии», Россия, г. Челябинск

Рассмотрены задачи управления гауссовской стохастической системой с помощью увеличения и уменьшения ее дифференциальной энтропии. В качестве модели стохастической системы используется многомерная гауссовская случайная величина.

Ключевые слова: математическая модель, дифференциальная энтропия, стохастическая система, случайный вектор, нормальное распределение, управление.

Рассмотрим гауссовскую открытую стохастическую систему S . Ее можно представить в виде случайного вектора $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$, имеющего

совместное нормальное распределение. Каждый элемент Y_i этого вектора является одномерной случайной величиной (с. в.), которая характеризует функционирование соответствующего элемента системы. Элементы могут быть как взаимозависимыми, так и не зависеть друг от друга. В [1] предложено использовать для описания системы S дифференциальную энтропию непрерывного случайного вектора, введенную в [2]. Для многомерной нормально распределенной с. в. $\mathbf{Y}$ дифференциальная энтропия $H(\mathbf{Y})$ равна [3]

$$H(\mathbf{Y}) = \frac{1}{2} \ln[(2\pi e)^m |\Sigma|], \quad (1)$$

где Σ – ковариационная матрица с элементами $\sigma_{ij} = \text{cov}(Y_i, Y_j)$, $\sigma_{ii} = \sigma_{Y_i}^2$ – дисперсия случайной величины Y_i , $i, j = 1, 2, \dots, m$.

Дифференциальная энтропия (1), являясь функционалом, заданным на множестве плотностей вероятностей случайного вектора $\mathbf{Y}$, представляет собой число. И поэтому не может являться адекватной математической моделью многомерной системы. Представим (1) в виде суммы двух слагаемых [1]

$$H(\mathbf{Y}) = H(\mathbf{Y})_\Sigma + H(\mathbf{Y})_R, \quad (2)$$

где $H(\mathbf{Y})_\Sigma = \sum_{k=1}^m H(Y_k)$, $H(Y_i) = \frac{1}{2} \ln[(2\pi e)\sigma_{Y_i}^2]$, $i = 1, 2, \dots, m$; $H(\mathbf{Y})_R = \frac{1}{2} \ln(|\mathbf{R}|)$,

$|\mathbf{R}|$ – определитель корреляционной матрицы $\mathbf{R} = \{r_{Y_i Y_j}\}_{m \times m}$ случайного вектора $\mathbf{Y}$.

Первое слагаемое в (2) представляет собой сумму дифференциальных энтропий, и равно совместной энтропии в случае взаимной независимости компонент Y_j случайного вектора $\mathbf{Y}$. Его условно можно назвать энтропией хаотичности. Второе слагаемое в (2) равно энтропии за счет совместной корреляционной взаимосвязи между элементами системы, его условно можно назвать энтропией самоорганизации [4].

Многие авторы отмечают [5–7], что повышение эффективности функционирования систем можно рассматривать с позиции увеличения или уменьшения ее энтропии. Поэтому энтропийная модель (2) позволяет решать задачи эффективного управления стохастической системой. Самый очевидный вариант управления представляет собой оказание управляющего воздействия на систему с целью увеличения или уменьшения ее энтропии. Увеличение энтропии всей системы можно достичь за счет роста неопределенности (дисперсий) одного или нескольких ее элементов, или уменьшая степень взаимосвязи элементов (увеличение определителя корреляционной матрицы). Уменьшение энтропии системы, наоборот, достигается уменьшением дисперсий ее элементов, или увеличением степени взаимосвязи элементов.

Отметим, что при управлении открытой системой мы располагаем некоторым ресурсом (энергией) для воздействия на систему. Одним из ключевых направлений для эффективного решения подобных задач является концепция «точек роста», впервые предложенная Франсуа Перу [8]. Концепция «точек роста» позволяет выделить особенно чувствительные к изменению энтропии элементы системы и при, например, довольно ограниченном, ма-

лом количестве выделенного ресурса использовать его наиболее выигрышно. Суть концепции в том, что управляющее воздействие целенаправленно концентрируют в одной или нескольких конкретных «точках роста». Т.к. система представляет собой множество взаимосвязанных элементов, то воздействие на правильно подобранную точку спровоцирует процессы, приводящие к наибольшему изменению энтропии во всей системе.

Определение 1. Под точкой роста системы в задаче увеличения (уменьшения) энтропии вектора $\mathbf{Y}=(Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ путем воздействия на дисперсии ее элементов $\sigma_{Y_i}^2$ будем понимать компоненту Y_i , увеличение (уменьшение) дисперсии $\sigma_{Y_i}^2$ которой на фиксированную величину приводит к наибольшему увеличению (уменьшению) энтропии $H(\mathbf{Y})$ по сравнению с другими компонентами Y_j , $i \neq j$.

Определение 2. Под точками роста системы в задаче увеличения (уменьшения) энтропии вектора $\mathbf{Y}=(Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ путем воздействия на корреляционные связи между ее элементами $r_{Y_i Y_j}$ будем понимать пару компонент Y_i и Y_j , $i \neq j$, изменение $r_{Y_i Y_j}$ для которых на фиксированную величину приводит к наибольшему увеличению (уменьшению) энтропии $H(\mathbf{Y})$ по сравнению с другими парами компонент.

В зависимости от цели управления и имеющихся ресурсов можно сформулировать различные задачи изменения энтропии системы [1,9,10]: изменение уровня энтропии до ее максимального или минимального значения при имеющихся ограничениях; изменение уровня энтропии в сторону ее увеличения или уменьшения.

Рассмотрим задачи максимизации энтропии стохастической системы.

Выявим одну точку роста. Имеем задачу:

$$\begin{cases} 0,5 \ln[(2\pi e)^m (|\Sigma| + \sigma_U^2 M_{ii})] \rightarrow \max_{i \in [1, m]}, \\ \sigma_U^2 = \sigma^2, \\ \text{cov}(U, Y_i) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{cases} \quad (3)$$

Задача (3) позволит осуществить максимальный прирост энтропии с помощью оптимального выбора соответствующего элемента системы Y_i , к которому прибавляется гауссовская с. в. U с заданной дисперсией.

Если имеется возможность одновременного воздействия на несколько элементов системы, то задачу (3.1) можно усложнить. В этом случае будем аддитивно воздействовать на многомерную с. в. $\mathbf{Y}$ дополнительным случайным вектором, компоненты которого не зависят от элементов исходной случайной величины. Тогда получим задачу максимального прироста энтропии многомерной с. в. путем добавления нормально распределенных с. в. U_i , $U_i \sim N(a_{U_i}, \sigma_{U_i}^2)$, ($i=1, 2, \dots, m$) к компонентам Y_i с. в. $\mathbf{Y}$. Задача имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \ln[(2\pi e)^m |\Sigma^*|] \rightarrow \max_{\sigma_{U_i}^2}, \\ \sum_{i=1}^m \sigma_{U_i}^2 = \sigma^2, \\ \text{cov}(U_i, Y_j) = 0, \quad i, j = 1, 2, \dots, m, \\ \text{cov}(U_i, U_j) = 0, \quad i, j = 1, 2, \dots, m, i \neq j, \end{cases} \quad (4)$$

где $|\Sigma^*| = \begin{vmatrix} \sigma_{Y_1}^2 + \sigma_{U_1}^2 & \dots & \text{cov}(Y_1, Y_i) & \dots & \text{cov}(Y_1, Y_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{cov}(Y_i, Y_1) & \dots & \sigma_{Y_i}^2 + \sigma_{U_i}^2 & \dots & \text{cov}(Y_i, Y_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{cov}(Y_m, Y_1) & \dots & \text{cov}(Y_m, Y_i) & \dots & \sigma_{Y_m}^2 + \sigma_{U_m}^2 \end{vmatrix}.$

Задача (4) позволит осуществить оптимальное распределение имеющегося ресурса σ^2 между элементами системы Y_i , к которым прибавляются независимые с. в. U_i . Решение данной задачи нелинейного программирования можно получить с помощью численных методов. Исследуем вопрос существования решения задачи (4).

Теорема 1. Пусть $\mathbf{Y}$ – случайный нормально распределенный вектор с ковариационной матрицей Σ , $Y_i \sim N(a_i, \sigma_{Y_i}^2)$; $\mathbf{U} = (U_1, U_2, \dots, U_m)$ – случайный вектор, $U_i \sim N(a_{U_i}, \sigma_{U_i}^2)$. Тогда решение задачи (4) существует, и любой локальный максимум является глобальным.

Доказательство. Обозначим: $\sigma_{U_i}^2 = x_i$, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, $i = 1, 2, \dots, m$. Представим задачу (4) в виде

$$f(\mathbf{x}^*) = \max_{\mathbf{x} \in X} f(\mathbf{x}) = -\min_{\mathbf{x} \in X} (-f(\mathbf{x})), \quad X = \left\{ \mathbf{x} : \sum_{i=1}^m x_i \leq \sigma^2, 0 \leq x_i \leq \sigma^2, i = \overline{1, m} \right\}.$$

Таким образом, необходимо найти точку минимума функции $-f(\mathbf{x})$ на множестве X . Рассмотрим множество X . Оно целиком содержится в некотором «прямоугольном параллелепипеде» в совокупности со своими пограничными точками: $\forall i \quad 0 \leq x_i \leq \sigma^2$. Поэтому множество X ограничено и замкнуто [11].

Очевидно, что $-f(\mathbf{x})$ – непрерывная функция на множестве X , следовательно, для нее на X выполнены условия теоремы Вейерштрасса [11], а значит, функция $-f(\mathbf{x})$ достигает своего наибольшего и наименьшего значений на X и решение задачи (4) существует.

Представим целевую функцию $-f(\mathbf{x})$ в виде суперпозиции двух функций $-f(\mathbf{x}) = -f_1(f_2(\mathbf{x}))$, где $-f_1(z) = -\ln(z)$ – монотонно убывающая и выпуклая функция, $f_1: R \rightarrow R$; $f_2(\mathbf{x}) = |\Sigma^*|$, $f_2: R^m \rightarrow R$.

Исследуем $f_2(\mathbf{x}) = |\Sigma^*|$ на вогнутость. Можно показать, что функция $f_2(\mathbf{x})$ представима в виде суммы неотрицательных слагаемых вида: $g_k(\mathbf{x}) = Mx_1x_2\dots x_k$, где M – неотрицательное число, представляющее собой определитель ковариационной матрицы размерности $m - k$, $k = 1, 2, \dots, m$.

По определению [12] функция $-g_k$ будет выпуклая (а g_k – вогнутая), если эпиграф $epi(-g_k)$ есть выпуклое множество. Обозначим $epi(-g_k) = C$. Известно [12], что $C = \{(\mathbf{x}, \mu) : \mathbf{x} \in X, \mu \in R, -g_k(\mathbf{x}) \leq \mu\}$, $C \in R^{m+1}$. Так как $\forall i$ $0 \leq x_i \leq \sigma^2$, то имеем $C = \{(\mathbf{x}, \mu) : \mathbf{x} \in X, \mu \in R, g_k(\mathbf{x}) \geq 0\}$, $k = 1, 2, \dots, m$.

Проверим множество C выпуклость. Оно будет выпуклым [12], если $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in C, \forall \alpha \in (0; 1): (1-\alpha)\mathbf{x} + \alpha\mathbf{y} \in C$.

Рассмотрим $(1-\alpha)\mathbf{x} + \alpha\mathbf{y}$. Пусть $y_i > x_i$. Тогда $\forall i \in \overline{1, m}$:

$$0 \leq x_i = (1-\alpha)x_i + \alpha x_i < (1-\alpha)x_i + \alpha y_i < (1-\alpha)y_i + \alpha y_i \leq y_i = \sigma^2,$$

$$\sum_{i=1}^k (1-\alpha)x_i + \alpha y_i < \sum_{i=1}^k (1-\alpha)y_i + \alpha y_i \leq \sum_{i=1}^k y_i = \sigma^2, \quad k \leq m.$$

Случай $y_i < x_i$ аналогичен.

Если $y_i = x_i$, то $(1-\alpha)x_i + \alpha y_i = x_i$, $\sum_{i=1}^l (1-\alpha)x_i + \alpha y_i \leq \sum_{i=1}^l x_i \leq \sigma^2$, $l \leq m$.

$$i = m + 1: (1-\alpha)x_i + \alpha y_i = (1-\alpha) \cdot 0 + \alpha \cdot 0 = 0.$$

Следовательно, $(1-\alpha)\mathbf{x} + \alpha\mathbf{y} \in C$, и функция g_k – вогнутая. Тогда $f_2(\mathbf{x}) = |\Sigma^*|$ – вогнутая функция, как сумма вогнутых функций [12], и $-f(\mathbf{x}) = -f_1(f_2(\mathbf{x}))$ – выпуклая как суперпозиция выпуклой неубывающей функции и вогнутой [11].

Кроме того, $\left(\frac{\partial f_2(\mathbf{x})}{\partial x_i}\right) \geq 0$ для любого i , и $f_2(\mathbf{x})$ не убывает по всем направлениям. Т.к. $f_1(z) = \ln(z)$ – монотонно возрастающая функция, следовательно, решение (4) будет достигаться при $\sum_{i=1}^m x_i = \sigma^2$.

Множество X , очевидно, будет выпуклое, поскольку проверка этого утверждения аналогично проверке выпуклости множества C . Таким образом, мы имеем выпуклую функцию $-f(\mathbf{x})$ на выпуклом множестве X значит, любой ее локальный минимум является глобальным.

Замечание 1. Поскольку система – это взаимосвязанное множество элементов, то в некоторых случаях в задачи (3), (4) следует вводить дополнительные ограничения на коррелированность ее элементов вида $a \leq |\mathbf{R}| \leq b$, которые позволяют учитывать диапазон возможных значений степени взаимосвязей в системе.

Рассмотрим теперь задачу *минимизации энтропии* стохастической системы. Минимизируем энтропию путем уменьшения дисперсий компонент случайного вектора $\mathbf{Y}$, компоненты которого для определенности будем считать центрированными. Исходя из свойств дисперсии случайной величины, ее уменьшение достигается путем деления случайной величины на положительное число. Отметим, что переход к измененной дисперсии $\sigma_{Y_i}^2 \rightarrow \sigma_{Y_i}^2 / x_i$ оставит неизменной корреляционную матрицу.

В таком случае имеем задачу, в которой необходимо оптимальным образом уменьшить дисперсию некоторых компонент случайного вектора:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \ln \left[(2\pi e)^m \sigma_{Y_1}^2 \sigma_{Y_2}^2 \dots \sigma_{Y_m}^2 |\mathbf{R}| / \prod_{i=1}^l x_i \right] \rightarrow \min_{x_i}, \\ \sum_{i=1}^l x_i \leq W, x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, l, \end{cases} \quad (5)$$

где $|\mathbf{R}|$ – определитель корреляционной матрицы, W – количество имеющегося ресурса для снижения дисперсии, $l = 1, 2, \dots, m$.

Теорема 2. Пусть $\mathbf{Y}$ – случайный нормально распределенный вектор с корреляционной матрицей $\mathbf{R}$. Тогда решением задачи (5) является $x_i = W/l$,

где l соответствует максимуму значения $\max_l \left(\frac{W}{l} \right)^l$, $l = 1, 2, \dots, m$.

Доказательство. Решение задачи (5) включает решение двух подзадач:

Задача 1. В связи с тем, что $f_1(z) = \ln(z)$ монотонно возрастающая и вогнутая функция [11] и $\prod_{i=1}^l x_i$ – знаменатель задачи минимизации имеем задачу максимизации знаменателя:

$$\begin{cases} \prod_{i=1}^l x_i \rightarrow \max_{x_i}, \\ \sum_{i=1}^l x_i = W, -x_i < 0, i = 1, 2, \dots, l. \end{cases} \quad (6)$$

Задача 2. Необходимо определить число l , решить задачу: $\prod_{i=1}^l x_i \rightarrow \max_l$.

Для нахождения аналитического решения задачи (6) при смешанных ограничениях необходимо:

1. Составить обобщенную функцию Лагранжа

$$L(\mathbf{x}, \lambda_0, \lambda) = \lambda_0 \prod_{i=1}^l x_i + \lambda_1 \left(\sum_{i=1}^l x_i - W \right) + \sum_{j=2}^{m+1} \lambda_j (-x_{j-1}).$$

2. Записать необходимые условия максимума:

$$a) \frac{\partial L(\mathbf{x}^*, \lambda_0^*, \lambda^*)}{\partial x_i} = \lambda_0^* \prod_{j=1, j \neq i}^l x_j^* + \lambda_1^* - \lambda_{i+1}^* = 0, i = 1, \dots, l,$$

$$\text{б) } \sum_{i=1}^l x_i^* - W = 0; -x_j^* \leq 0, j=2, \dots, l+1,$$

$$\text{в) } \lambda_j^* \leq 0 \text{ (для максимума), } j=2, \dots, l+1,$$

$$\text{г) } \lambda_j^* \cdot (-x_{j-1}^*) = 0, j=2, \dots, l+1.$$

3. Решить систему для двух случаев: 1) $\lambda_0^* = 0$; 2) $\lambda_0^* \neq 0$.

4. Для выделенных на шаге 3 точек проверить достаточные условия экстремума. Для этого решаем систему

$$\begin{cases} \lambda_0 \prod_{j=1, j \neq i}^l x_j + \lambda_1 - \lambda_{i+1} = 0, i=1, \dots, l, \\ \sum_{i=1}^l x_i = W, -x_i < 0, i=1, \dots, l, \\ \lambda_j \leq 0, \lambda_j \cdot (-x_{j-1}) = 0, j=2, \dots, l+1. \end{cases}$$

Целевая функция задачи (6) является знаменателем целевой функции задачи (5), следовательно, мы исключаем возможность обращения целевой функции задачи (6), убрав из решения возможности $x_i = 0$. Кроме того, очевидно, что максимум функции произведения неотрицательных чисел отличен от нуля.

В случае $\lambda_0 = 0$, мы имеем $\lambda_1 = \lambda_{i+1} = 0$, это противоречит необходимому условию экстремума первого порядка, значит $\lambda_0 \neq 0$, положим $\lambda_0^* = 1$.

Исходя из требования $x_i \neq 0, \forall i=1, \dots, l$, и необходимого условия максимума в пункте г) имеем, что $\lambda_j^* = 0, j=2, \dots, l+1$:

$$\begin{cases} \prod_{j=1, j \neq 1}^l x_j + \lambda_1 = 0, \\ \prod_{j=1, j \neq 2}^l x_j + \lambda_1 = 0, \\ \dots \\ \prod_{j=1, j \neq l}^l x_j + \lambda_1 = 0, \\ \sum_{i=1}^l x_i = W, -x_i < 0, i=1, \dots, l. \end{cases}$$

Отсюда следует, что $\prod_{j \neq 1} x_j = \prod_{j \neq 2} x_j = \dots = \prod_{j \neq l} x_j$ и

$$\left\{ \begin{array}{l} (x_1 - x_2) \prod_{j=1, j \neq 1, j \neq 2}^l x_j = 0, \\ (x_2 - x_3) \prod_{j=1, j \neq 2, j \neq 3}^l x_j = 0, \\ \dots \\ (x_l - x_{l-1}) \prod_{j=1, j \neq l, j \neq l-1}^l x_j = 0, \\ \sum_{i=1}^l x_i - W = 0, \quad -x_i < 0, i = 1, \dots, l. \end{array} \right.$$

Следовательно, $x_i^* = W / l$, $i = 1, \dots, l$.

Достаточное условие максимума второго порядка требует, чтобы $d^2 L(x^*, \lambda^*) < 0$ для всех ненулевых $dx \in R^m$ таких что $dg(x^*) = 0$, где $g(x) = \sum_{i=1}^l x_i - W$ – ограничение-равенство. Проверим выполнение этого условия.

$$\begin{aligned} dg(x^*) &= \sum_{i=1}^l dx_i = 0. \text{ Отсюда следует, } \forall dx_i \neq 0, dx_i = - \sum_{j=1, j \neq i}^l dx_j, i = 1, \dots, l. \\ d^2 L(x^*, \lambda^*) &= \sum_{i=1}^l \sum_{j=1, i \neq j}^l \left(\frac{W}{l} \right)^{l-2} dx_i dx_j = \sum_{i=1}^l \left(\left(\frac{W}{l} \right)^{l-2} dx_i \sum_{j=1, i \neq j}^l dx_j \right) = \\ &= \sum_{i=1}^l \left(\left(\frac{W}{l} \right)^{l-2} (-1) d^2 x_i \right) < 0. \end{aligned}$$

Достаточное условие максимума выполнено.

Однако задача (5), предлагая, по сути, равномерное распределение ресурса между некоторыми или всеми элементами системами, не позволяет явно выделить точки роста (точки воздействия на систему). Поэтому минимизация энтропии системы может быть рассмотрена с точки зрения приложения специальных управленческих мероприятий с целью снижения дисперсий, при условии, что изменение $|\mathbf{R}|$ будет пренебрежительно мало:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \ln[(2\pi e)^m (\sigma_{Y_1}^2 - x_1)(\sigma_{Y_2}^2 - x_2) \dots (\sigma_{Y_m}^2 - x_m) |\mathbf{R}|] \rightarrow \min_{x_i}, \\ \sum_{i=1}^m x_i \leq W, \quad 0 \leq x_i \leq \sigma_{Y_i}^2, i = 1, 2, \dots, m, \\ |\mathbf{R}| = const. \end{array} \right. \quad (7)$$

Теорема 3. Пусть $\mathbf{Y}=(Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ – гауссовский случайный вектор с корреляционной матрицей $\mathbf{R}$, $Y_i \sim N(a_i, \sigma_{Y_i}^2)$. Тогда решение задачи (7) существует, и любой локальный минимум является глобальным.

Доказательство.

Рассмотрим $f(x_1, \dots, x_m) = (\sigma_{Y_1}^2 - x_1)(\sigma_{Y_2}^2 - x_2) \dots (\sigma_{Y_m}^2 - x_m)$,

$$f: X \rightarrow \{R_+^m, 0\}, \quad X = \left\{ \mathbf{x} \in R^m : \sum_{i=1}^m x_i \leq W, 0 \leq x_i \leq \sigma_{Y_i}^2, i=1, 2, \dots, m \right\}.$$

Как показано выше, множество X – ограничено и замкнуто. Функция $f(\mathbf{x})$ – непрерывная. Отсюда следует, что для функции $f(\mathbf{x})$ на множестве X выполнены условия теоремы Вейерштрасса [11], т.е. функция $f(\mathbf{x})$ достигает своего наибольшего и наименьшего значений на X и решение существует.

Кроме того, по определению [12] функция $f(\mathbf{x})$ – выпуклая, если эпиграф $epi f$ есть выпуклое множество. Обозначим $epi(-g_k) = C$. Имеем

$$C = \{(\mathbf{x}, \mu) : \mathbf{x} \in X, \mu \in R, f(\mathbf{x}) \leq \mu\}, \quad C \in R^{m+1}.$$

Поскольку $\forall i=1, 2, \dots, m \quad \sigma_{Y_i}^2 \geq 0, x_i \geq 0, \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_i} \leq 0$, то функция не возрастает по всем направлениям. Следовательно, имеем

$$C = \{(\mathbf{x}, a) : \mathbf{x} \in X, a \in R, f(\mathbf{x}) \leq a\}, \text{ где } a = \sigma_{Y_1}^2 \sigma_{Y_2}^2 \dots \sigma_{Y_m}^2.$$

Проверим выпуклость множества C по определению [12]: $C \in R^{m+1}$ называется выпуклым, если $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in C, \forall \alpha \in (0, 1): (1-\alpha)\mathbf{x} + \alpha\mathbf{y} \in C$.

Рассмотрим $(1-\alpha)\mathbf{x} + \alpha\mathbf{y}$. Пусть $y_i > x_i$. Тогда:

$$\forall i \in \overline{1, m} \quad 0 \leq x_i = (1-\alpha)x_i + \alpha x_i < (1-\alpha)x_i + \alpha y_i < (1-\alpha)y_i + \alpha y_i \leq y_i = \sigma_{Y_i}^2,$$

$$\sum_{i=1}^k (1-\alpha)x_i + \alpha y_i < \sum_{i=1}^k (1-\alpha)y_i + \alpha y_i \leq \sum_{i=1}^k y_i = W, \quad k \leq m.$$

Случай $y_i < x_i$ аналогичен.

$$\text{Если } y_i = x_i, \text{ то } (1-\alpha)x_i + \alpha y_i = x_i, \quad \sum_{i=1}^l (1-\alpha)x_i + \alpha y_i \leq \sum_{i=1}^l x_i \leq W, \quad l \leq m.$$

$$i = m+1: (1-\alpha)x_i + \alpha y_i = (1-\alpha) \cdot a + \alpha \cdot a = a.$$

Следовательно, $(1-\alpha)\mathbf{x} + \alpha\mathbf{y} \in C$, и функция $f(\mathbf{x})$ – выпуклая на выпуклом множестве X , значит, любой ее локальный минимум является глобальным.

Рассмотрим задачи *увеличения и уменьшения энтропии* системы.

Энтропией системы можно управлять также посредством усиления или ослабления корреляционных связей между компонентами при условии, что при таком воздействии на систему изменение дисперсий элементов будет пренебрежительно мало. Например, в случае необходимости изменения энтропии в сторону ослабления задача примет вид

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \ln[(2\pi e)^m |\mathbf{\Sigma}^*|] \rightarrow \min_{r_{ij}}, \\ a \leq |\mathbf{R}^*| \leq b, \mathbf{R}^* \in D, \end{cases} \quad (8)$$

где D – множество положительно определенных корреляционных матриц.

Рассмотрим эту задачу подробнее. В силу того, что $f_1(z) = \ln(z)$ – монотонно возрастающая и вогнутая функция, для целевой функции (8) справедливо минимизировать ту ее часть, которая стоит под знаком логарифма: $|\mathbf{\Sigma}| = \sigma_{Y_1}^2 \sigma_{Y_2}^2 \dots \sigma_{Y_m}^2 |\mathbf{R}|$, а именно:

$$\begin{cases} |\mathbf{R}| \rightarrow \min_{r_{ij}}, \\ a \leq |\mathbf{R}| \leq b, \mathbf{R} \in D, 0 \leq a < b \leq 1. \end{cases} \quad (9)$$

Очевидно, что решение задачи (9) сведется к достижению $|\mathbf{R}|$ минимально допустимого значения a . Теоретически изменение уровня корреляционных связей r_{ij} на определенную единицу d_{ij} должно требовать привлечения некоторого количества ресурсов x_{ij} , поэтому задача снижения энтропии путем воздействия на корреляционные связи может быть следующей:

$$\begin{cases} \begin{vmatrix} 1 & r_{12} + d_{12}x_{12} & \dots & r_{1m} + d_{1m}x_{1m} \\ r_{21} + d_{21}x_{21} & 1 & \dots & r_{2m} + d_{2m}x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} + d_{m1}x_{m1} & r_{m2} + d_{m2}x_{m2} & \dots & 1 \end{vmatrix} \rightarrow \min_{x_{ij}}, \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1, j \neq i}^m x_{ij} \leq W, \\ x_{ij} \geq 0, i, j = 1, \dots, m, \\ a \leq |\mathbf{R}| \leq b, \mathbf{R} \in D, \end{cases} \quad (10)$$

где W – количество имеющегося ресурса.

Решение задачи (10) требует сложной работы по сбору и анализу статистической информации об изменении уровня корреляционных связей в зависимости от затрачиваемых ресурсов, что практически трудно реализуемо. Поэтому целесообразно рассматривать (9) как задачу выявления основных точек воздействия для осуществления управляющих действий. Как известно, градиент функции есть вектор, направление которого указывает направление наибыстрейшего возрастания функции, а модуль равен наибольшей скорости изменения функции в определенной точке [11]. Для выявления направления уменьшения функции следует рассматривать антиградиент

$$-\text{grad}(f) = -\left(\frac{\partial f}{\partial r_{12}}, \frac{\partial f}{\partial r_{13}}, \dots, \frac{\partial f}{\partial r_{m,m-1}}\right), f(r_{12}, r_{13}, \dots, r_{m,m-1}) = |\mathbf{R}|.$$

Лемма 1. Функция вида $f(r_{12}, r_{13}, \dots, r_{m, m-1}) = |\mathbf{R}|$, $f: D \rightarrow [0; 1]$, определенная на множестве $D = \{\mathbf{r} \in R^{m(m-1)} : r_{ij} \in [-1; 1], i = \overline{1, m}, j = \overline{i+1, m-1}\}$, является выпуклой.

Доказательство. По определению [12] функция f – выпуклая, если эпиграф $epi f$ есть выпуклое множество. Для $f(r_{12}, r_{13}, \dots, r_{m, m-1}) = |\mathbf{R}|$ $epi f = C$ есть множество: $\{(\mathbf{r}, \mu) : \mathbf{r} \in D, \mu \in R, f(\mathbf{r}) \leq \mu\} \in R^{m(m-1)+1}$.

Т.к. $f: R^{m(m-1)} \rightarrow [0; 1]$, то $C = \{(\mathbf{r}, 1) : \mathbf{r} \in D, 1 \in R, f(\mathbf{r}) \leq 1\}$, $C \in R^{m(m-1)+1}$.

Проверим выпуклость C по определению [12]: $C \in R^{m(m-1)+1}$ называется выпуклым, если $\forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in C, \forall \alpha \in (0; 1): (1-\alpha)\mathbf{x} + \alpha\mathbf{y} \in C$.

Рассмотрим $(1-\alpha)\mathbf{x} + \alpha\mathbf{y}$. Пусть $y_i > x_i$. Тогда $\forall i \in \overline{1, m(m-1)}:$

$$-1 \leq x_i = (1-\alpha)x_i + \alpha x_i < (1-\alpha)x_i + \alpha y_i < (1-\alpha)y_i + \alpha y_i \leq y_i = 1.$$

Случай $y_i < x_i$ аналогичен.

Если $y_i = x_i$, то $(1-\alpha)x_i + \alpha y_i = 1$.

$$i = m(m-1) + 1: (1-\alpha)x_i + \alpha y_i = (1-\alpha) \cdot 1 + \alpha \cdot 1 = 1.$$

Следовательно, $(1-\alpha)\mathbf{x} + \alpha\mathbf{y} \in C$ и $f(r_{12}, r_{13}, \dots, r_{m, m-1}) = |\mathbf{R}|$ – выпуклая функция.

Выводы.

1. Предложена энтропийная модель гауссовской стохастической системы. Она основана на представлении дифференциальной энтропии в виде суммы двух компонент – энтропии хаотичности и энтропии самоорганизации.

2. Для управления гауссовскими стохастическими системами на основе энтропийной модели предложено использовать концепцию «точек роста».

3. Сформулированы задачи управления гауссовскими стохастическими системами на основе энтропийной модели. Доказаны теоремы о решениях поставленных задач.

Работа поддержана грантом РФФИ № 14-18-00574.

Список литературы

1. Тырсин, А.Н. Энтропийно-вероятностное моделирование гауссовских стохастических систем / А.Н. Тырсин, И.С. Соколова // Математическое моделирование. 2012. – Т. 24, № 1. – С. 88–103.
2. Shannon, C.E. A Mathematical Theory of Communication // The Bell System Technical Journal. 1948. – Vol. 27, № 3. – P. 379–423, № 4. – P. 623–656.
3. Cover, T.M. Elements of Information Theory / T.M. Cover, J.A. Thomas. – N.Y.: Wiley, 1991. – 563 p.
4. Тырсин, А.Н. Исследование динамики многомерных стохастических систем на основе энтропийного моделирования / А.Н. Тырсин, О.В. Ворфоломеева // Информатика и ее применения. – 2013. – Т. 7, В. 4. – С. 3–10.
5. Пригожин, И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – М.: Мир, 2002. – 461 с.

6. Климонтович, Ю.Л. Введение в физику открытых систем / Ю.Л. Климонтович. – М.: Янус-К, 2002. – 284 с.
7. Вильсон, А.Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем / А.Дж. Вильсон. – М.: Наука, 1978. – 248 с.
8. Perroux, F. L'Economie du XXe siecle / F. Perroux. – Paris, Universitaires de France, 1961. Reprinted in 1991 by Presses universitaires de Grenoble. – 814 p.
9. Соколова, И.С. Исследование социально-экономических систем на основе энтропийно-вероятностной модели / И.С. Соколова, А.Н. Тырсин // Вестник Челябинского государственного университета. Экономика. – 2012. – № 24. – С. 43–47.
10. Соколова, И.С. Использование энтропийно-вероятностного моделирования в задачах мониторинга и управления сложными системами / И.С. Соколова, А.Н. Тырсин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 4. – С. 35–39.
11. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: в 3 т. Т.1. – 7-е изд. / Г.М. Фихтенгольц. – М.: Наука, 1969. – 608 с.
12. Рокафеллар, Р. Выпуклый анализ / Р. Рокафеллар. – М.: Мир, 1973. – 472 с.

ЛИНЕЙНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЧАСТНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПЕРВОГО ПОРЯДКА НАГРУЖЕННЫМИ СВОБОДНЫХ ЧЛЕН И С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ

Хидиров Х.С.

кандидат физико-математических наук,
Институт технологии и инновационного менеджмента, Таджикистан, г. Куляб

В работе исследовано линейное дифференциальное уравнение, первого порядка нагруженное свободным членом и с дополнительными условиями, и доказано существование его решения по начальным задачам с помощью линейных алгебраических уравнений.

Ключевые слова: уравнение, линейные, нагрузка, дополнительные условие, задача.

Рассмотрим линейное неоднородное уравнение первого порядка с двумя независимыми переменными вида

$$f(x, y) \frac{\partial w}{\partial x} + g(x, y) \frac{\partial w}{\partial y} = h(x, y) + \sum_{k=1}^n \alpha_k \theta_k^i(x, y), \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

где $f(x, y), g(x, y), h(x, y)$ – непрерывные функции, $\sum_{k=1}^n \alpha_k \theta_k^i(x, y)$ – нагрузка на свободных член. Дополнительные условие:

$$\int_a^b \int_c^d w(x, y) \varphi_i(x, y) dx dy = p_i, \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

где $w(x, y)$, общее решение уравнения (1), $\varphi_i(x, y), (i=1, 2, \dots, m)$ – известные функции.

Общее решение неоднородного уравнение (1) можно представит в виде суммы

$$w(x, y) = \tilde{w}(x, y) + w_0(x, y) \quad (3)$$

где $\tilde{w}(x, y)$ - любое частное решение этого уравнения, $w_0(x, y)$ – общее решение соответствующего однородного уравнения при

$$h(x, y) + \sum_{k=1}^n \alpha_k \theta_k^i(x, y) = 0$$

Сначала решаем уравнение (1) с методом на переход новой переменной.

Пусть известно частное решение $u(x, y)$ (главный интеграл) соответствующего однородного уравнения

$$f(x,y)\frac{\partial u}{\partial x}+g(x,y)\frac{\partial u}{\partial y}=0, \quad (u \neq const)$$

Переходя (1) от x, y к новым переменным $x, u = u(x, y)$, получим

$$\bar{f}(x,u)\frac{\partial w}{\partial x}=\bar{h}(x,u)+\sum_{k=1}^n\alpha_{\kappa}\bar{\theta}_k^i(x,u), (i=1,2,\dots,m) \quad (4)$$

где $\bar{f}(x,u) = f(x,y), \bar{h}(x,u) = h(x,y), \bar{\theta}(x,u) = \theta(x,y)$ - $\alpha_\kappa, (\kappa = 1, 2, \dots, m)$ коэффициенты исходного уравнения (1), записанные в переменных x, u .

Уравнение (4) можно рассматривать как обыкновенное дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными для $w = w(x)$ с параметрами u .

Его общее решения имеет вид.

$$w = \int \frac{\bar{h}(x, u)}{\bar{f}(x, u)} dx + \int \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \bar{\theta}_k^i(x, u)}{\bar{f}(x, u)} dx + \Phi(u), (i = 1, 2, \dots, n), \quad (5)$$

где Φ – произвольная функция, при вычислении интеграла u рассматривается как параметр. Для нахождения общего интеграла уравнение (1) необходимо в формуле (4) после интегрирования перейти к исходным переменным x, y . Поэтому частное решение соответствующего однородного уравнения известно то решение неоднородного уравнения (1) всегда может быть найдено в квадратурах. Пусть решения интеграла (5) имеет вид:

$$w(x, u) = K(x, u) + \sum_{k=1}^n \alpha_k \Gamma_k^i(x, u) + \Phi(u) \quad (6)$$

Переходя от x, u к переменным x, y получаем :

$$w(x, y) = N(x, y) + \sum_{k=1}^n \alpha_k H_k^i(x, y) + C \quad (7)$$

Подставляя (7) в дополнительные условия (2) получим линейная алгебраическая система (л.а.с.).

[illegible]

где $p_i = \int_a^b \int_c^d (N(x, y) \varphi(x, y) + C_i) dx dy$, $\sum_{k=1}^n a_{ij} \alpha_k = \int_a^b \int_c^d \varphi(x, y) \cdot \sum_{k=1}^n \alpha_k H_k^i(x, y) dx dy$,

нейная алгебраическая система.

[illegible]

Имеет три случая: 1) $m = n$, 2) $m > n$, 3) $m < n$,

Задача Коши:

1⁰. *Классическая задача Коши.* Требуется найти решение $w = w(x, y)$ уравнения (1) удовлетворяющее начальному условию

$w = \phi(y) \text{ при } x=0,$

где $\phi(y)$ – заданная функция.

$$\phi(y) = N(0, y) + \sum_{k=1}^n \alpha_k H_k^i(0, y) + C_i, (i = 1, 2, \dots, m),$$

$$C_i = \phi(y) - N(0, y) + \sum_{k=1}^n \alpha_k H_k^i(0, y), (i = 1, 2, \dots, m)$$

$$w(x, y) = N(x, y) + \sum_{k=1}^n \alpha_k H_k^i(x, y) + \phi(y) - N(0, y) + \sum_{k=1}^n \alpha_k H_k^i(0, y), (i = 1, 2, \dots, m)$$

2⁰. *Обобщенная задача Коши.* требуется найти решение $w = w(x, y)$ уравнения (1), удовлетворяющее начальным условием

$$x = h_1(\xi), y = h_2(\xi), w = h_3(\xi) \quad (10)$$

где $\xi, (\alpha \leq \xi \leq \beta)$ - параметр, $w = h_3(\xi)$ - заданная функция.

Геометрические интерпретации: требуется найти интегральную поверхность уравнения (1), проходящую через линию (9), заданную параметрически. Используем для решения уравнения (1), обобщенная задачи Коши.

$$C_i = h_3(\xi) - N(h_1(\xi), h_2(\xi)) + \sum_{k=1}^n \alpha_k H_k^i(h_1(\xi), h_2(\xi)), (i = 1, 2, \dots, m),$$

$$w(x, y) = N(x, y) + \sum_{k=1}^n \alpha_k H_k^i(x, y) + h_1(\xi) - N(h_1(\xi), h_2(\xi)) + \sum_{k=1}^n \alpha_k H_k^i(h_1(\xi), h_2(\xi)), (i = 1, 2, \dots, m)$$

Из следствие последнего выражение видно что задача Коши разрешима для уравнение (1) с нагруженными свободных член и с дополнительными условиями (2).

Теорема. Пусть дано уравнение с частным производным первого порядка (1) и с дополнительными условиями (2).

1) Если на системы линейных алгебраических уравнение (л.а.с.) (8) $m=n$ и $\Delta \neq 0$ то уравнение с частным производным первого порядка (1) имеет единственные решение.

2) Если при $m > n$ и $m < n$ (л.а.с.) имеет решение, то уравнение с частным производным первого порядка разрешима. Противном случае не имеет решение.

3) Если на система однородное уравнение (9) $\Delta = 0$, то имеет единственные решение

4) Если на система однородное уравнение (9) $\Delta \neq 0$ то уравнение с частным производным первого порядка (1) не имеет решение.

Список литературы

1. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики, Москва: «Наука», 1972.
2. Кошляков Н.С., Глинер Ю.И., Смирнов М.М. Основные дифференциальные уравнения математической физики, Москва: Физматгиз, 1962.
3. Араманович И.Г., Левин В.И. Уравнения математической физики. Москва: «Наука», 1969.

МНОГОЧАСТОТНЫЕ ТОРЫ В МОДЕЛИ ШИРОКАПЕРТУРНОГО ЛАЗЕРА С ОДНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ МОДОЙ ПРИ НУЛЕВОЙ ОТСТРОЙКЕ ЧАСТОТЫ

Шакиров А.Р.

студент,

Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва,
Россия, г. Самара

Кренц А.А.

доцент кафедры физики, кандидат физ.-мат. наук, доцент,

Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва,
Россия, г. Самара

Анчиков Д.А.

аспирант кафедры физики,

Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва,
Россия, г. Самара

Одним из интересных направлений теории нелинейных динамических систем является исследование сценариев эволюции поведения в сложных системах, таких как лазеры. Ранее не сообщалось о бифуркациях квазипериодических режимов в лазерах. В данной работе рассматривается распределенная модель широкоапертурного лазера на основе уравнений Максвелла-Блоха в одномерном приближении. С помощью численного моделирования показано, что при увеличении накачки в системе происходит серия бифуркаций периодического и квазипериодического динамических режимов, в результате которых возможно наблюдение аттракторов в виде трехчастотных торов.

Ключевые слова: широкоапертурный лазер, модель Максвелла-Блоха, квазипериодические режимы, бифуркация, многочастотный тор, трехчастотный тор.

Математическая модель

В качестве математической модели широкоапертурного лазера использовалась полная полуклассическая система уравнений Максвелла-Блоха. Она описывает динамику оптического поля во времени в поперечном сечении

выходного пучка с учётом отстройки частоты генерации от центра линии усиления для лазера, работающего на одной продольной моде плоскопараллельного резонатора и имеющего однородно уширенную линию.

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial t} = ia\Delta_{\perp} E + \sigma(P - E), \\ \frac{\partial P}{\partial t} = -(1 + i\delta)P + DE, \\ \frac{\partial D}{\partial t} = -\gamma \left[D - r + \frac{1}{2}(E^* P + EP^*) \right], \end{cases} \quad (1)$$

где E, P, D – безразмерные огибающие электрического поля, поляризации и инверсии населённости соответственно; $\gamma = \gamma_{\parallel} / \gamma_{\perp}$ и $\sigma = k / \gamma_{\perp}$, где $\gamma_{\perp}$, $\gamma_{\parallel}$ и k – скорости релаксации поляризации, инверсии населённости и коэффициент затухания электрического поля соответственно; $\delta = (\omega_{21} - \omega) / \gamma_{\perp}$ – отстройка частоты генерации ω от центральной частоты линии усиления ω_{21} линии усиления активной среды, обезразмеренная на ширину линии; $a = c^2 / (2\omega\gamma_{\perp}d^2)$ – дифракционный параметр, где d – ширина апертуры; r – накачка, нормированная на пороговое значение. Данная нелинейная система описывает динамику генерации лазера с учётом поперечного распределения электромагнитного поля в резонаторе.

Мы рассматривали процессы в области нулевой отстройки в одномерном приближении. Для численного моделирования системы (1) использовался псевдоспектральный Фурье-метод расщепления по физическим факторам. Для анализа получаемых режимов мы строили аттрактор в фазовом пространстве, сечения Пуанкаре, а также спектр колебаний интенсивности в произвольной локальной точке.

При значениях накачки немного выше порога генерации в системе реализуется однородное по пространству стационарное решение. Однако при достижении второго лазерного порога стационарное решение теряет устойчивость по отношению к малым возмущениям с некоторым ненулевым волновым числом. В таком случае система переходит в режим периодических колебаний (рисунок верхний ряд).

Приблизительно при значении накачки $r=168.9$ в системе происходит бифуркация, и аттрактор обретает форму трехмерного тора (рис. 1, второй ряд сверху).

При дальнейшем увеличении накачки в области значений $r=172.1$ на сечениях Пуанкаре наблюдаются изображения в виде двумерных проекций трехмерного тора. Это означает что, аттрактор представляет собой трехчастотный тор. Это подтверждается тем, что в спектре колебаний наблюдается появление третьей основной гармоники.

В области накачек $r=177.5$ происходит еще одна бифуркация, и в фазовом пространстве аттрактор обретает более сложную форму. На сечениях Пуанкаре наблюдаются запутанные кривые. Спектр колебаний при этом меняет структуру.

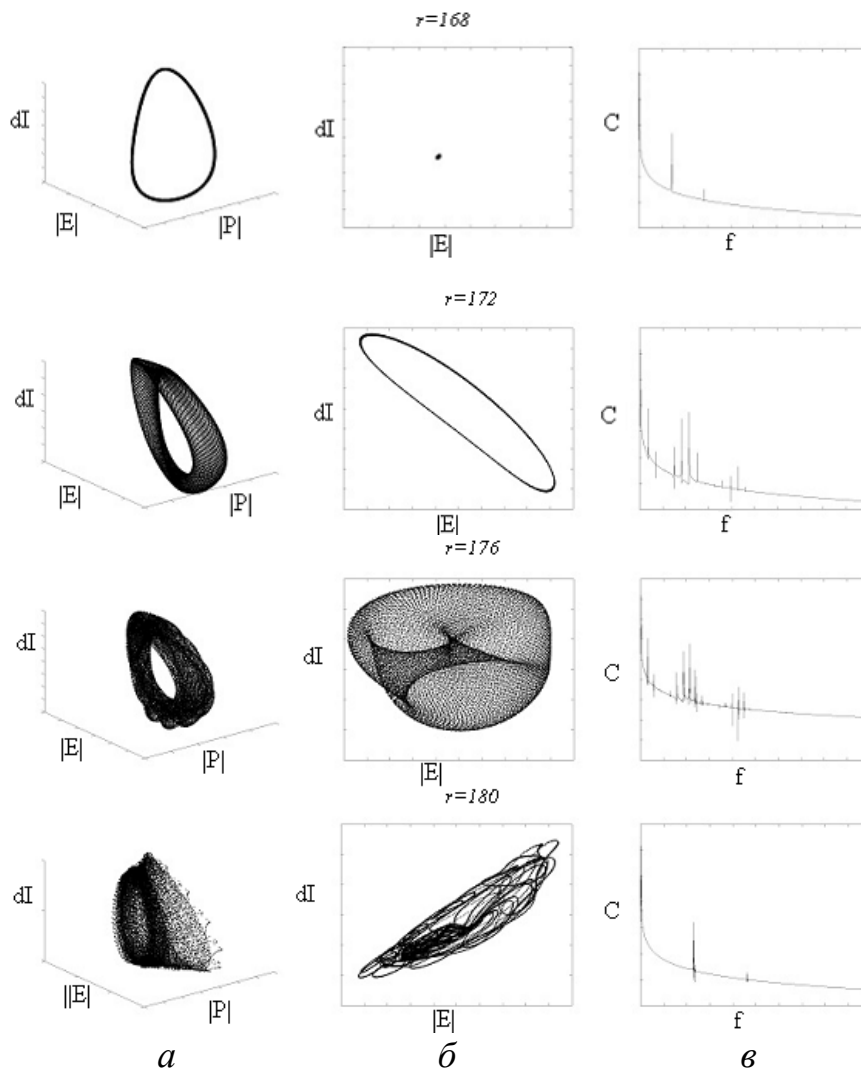


Рис. Последовательность бифуркаций квазипериодических решений при изменении параметра накачки r : а) фазовый объем, б) сечения Пуанкаре, в) спектр колебаний, где dI – производная интенсивности, C – спектр мощности, f – частота. Остальные параметры системы: $\sigma=1$, $\gamma=2.2$, $\delta=0$, $a=0.01$

Таким образом, в данной работе хотя и не полностью охвачена и раскрыта тема, тем не менее, показано, что в модели широкоапертурного лазера возможно наблюдение аттракторов в виде трехчастотных торов.

Работа частично поддержана Минобрнауки РФ в рамках Программы повышения конкурентоспособности СГАУ на 2013–2020 гг. и Государственного задания вузам и научным организациям в сфере научной деятельности, проект 1451, НИР №ГР 114091840046, грантом РФФИ 14-02-31419 мол_а.

Список литературы

1. Кузнецов, А.П., Станкевич, Н.В. Синхронизация генераторов квазипериодических колебаний // Нелинейная динамика. 2013. Т. 9. № 3. – С. 409–419.
2. Кузнецов, А.П., Мигунова, Н.А., Сатаев, И.Р., Седова, Ю.В., Тюрюкина, Л.В. Динамика связанных хаотических осцилляторов: от хаоса к квазипериодичности // Нелинейная динамика. 2014. Т. 10. № 4. – С. 387–405.
3. Кренц, А.А., Молевич, Н.Е. Каскад бифуркаций удвоения тора в лазере с отстройкой частоты // Квантовая электроника, 2009, т. 39, – С. 751–756.

4. Кузнецов, С.П. Динамический хаос – М.: Физматлит, 2006. – 355 с.
5. Анищенко, В.С. Сложные колебания в простых системах. Механизмы возникновения, структура и свойства динамического хаоса в радиофизических системах – М.: Изд. группа URSS, 2009. – С. 320.
6. Купцов, П.В. Вычисление показателей Ляпунова для распределенных систем: преимущества и недостатки различных численных методов // Известия вузов «Прикладная нелинейная динамика», т. 18, № 5, 2010. – С. 93–112.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОЛЕВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ СТЕКЛЯННЫХ МАТРИЦ МИКРОЛИНЗ

Шишканов О.Н.

аспирант кафедры оптоэлектроники,
Кубанский государственный университет, Россия, г. Краснодар

Бойченко А.П.

доцент кафедры оптоэлектроники, д-р. физ-мат. наук, доцент,
Кубанский государственный университет, Россия, г. Краснодар

Предлагается физико-математическая модель для электрополевой дефектоскопии на примере стеклянных матриц микролинз. Приводятся теоретические результаты моделирования в сопоставлении с подтверждающими их экспериментальными данными.

Ключевые слова: электрополевая дефектоскопия, стеклянная матрица микролинз, электрополевое изображение.

Контроль качества изготовления различных элементов интегральной оптики является одной из приоритетных задач оптоэлектроники и смежных с ней областей, что в первую очередь связано с совершенствованием телекоммуникационных систем оптической связи и средств записи информации. Как правило, такой контроль осуществляется оптическими методами. Однако, их возможности ограничены пропускной способностью (прозрачностью) оптического излучения контролируемым изделием и/или его компонент, что, например, имеет место при изготовлении стеклянных матриц микролинз (СММЛ) путем стимулированного ионного обмена [3]. Поэтому актуальной остается задача поиска альтернативных методов неразрушающего контроля (НК) изделий оптоэлектроники, независимых от оптических свойств объектов НК.

К их числу можно отнести электротопографический (ЭТГ) метод, основанный на формировании электрополевых изображений (ЭПИ) различных объектов как на галогенсеребряных (AgHal) фотоматериалах, так и на электролюминофорах [1, 2]. При этом первые обладают не только рекордно высокой чувствительностью к электрическому полю [4], но и одновременно являются хранителями зафиксированной на них информации. Настоящая статья посвящена физико-математическому моделированию и экспериментальной проверке его результатов путем привлечения электрополевой дефектоскопии

(ЭПД) материалов оптоэлектроники на примере СММЛ толщиной $h = 1,33 \cdot 10^{-3}$ м, изготовленной на стеклянной подложке по изложенной в [3] технологии. Микролинзы (МЛ) в матрице имеют форму полусферы радиусом $r = 7,5 \cdot 10^{-5}$ м и расположены на расстоянии $l = 5,5 \cdot 10^{-5}$ м друг от друга. Согласно [1, 2] при ЭПД изделие должно размещаться контролируемой поверхностью на AgHal-фотоматериале и плотно прижиматься к нему металлическими электродами различных размеров для создания неоднородного электрического поля. В наших экспериментах между верхним полусферическим электродом радиусом скругления $R = 5 \cdot 10^{-3}$ м и исследуемой СММЛ создавался воздушный зазор с минимальной толщиной $d_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ м, что обеспечивало свободное движение (сканирование) электрода над поверхностью контролируемого изделия без механических воздействий на него. Поскольку размеры МЛ и расстояние между ними много меньше R , то для упрощения задачи моделирования достаточно рассмотреть момент времени, в течение которого полусферический электрод является неподвижным. Тогда ширина воздушного зазора между поверхностью электрода и СММЛ будет описываться уравнением: $d_v(x) = d_0 + R - \sqrt{R^2 - x^2}$, где x – текущая координата. Регистрируемым средством ЭПИ СММЛ выбиралась рентгеновская фото пленка фирмы «Agfa», как обладающая в настоящее время рекордно высокой электрополевой чувствительностью [4]. Прикладываемое к электродам напряжение составляло $U = 3$ кВ. Схема реализации описываемой технологии ЭПД для СММЛ представлена на рис. 1, где 1 – электроды; 2 – фотоэмульсионные слои; 3 – диэлектрическая полимерная подложка фотоматериала; 4 – стеклянная подложка (СП); 5 – МЛ.

Толщина d_m МЛ (см. рис. 1) задается функцией $d_m(x)$, описываемой уравнением (1), где величина $d_m(x) = 0$ берется для удобства моделирования и означает отсутствие МЛ на данном отрезке координат. Приблизительная оценка диэлектрической проницаемости ϵ^* СММЛ дается уравнением (2), а распределения полей в СП – $E_s(x)$, МЛ – $E_m(x)$ и верхнем фотоэмульсионном слое $E_f(x)$ – уравнениями (3)–(5), где $\epsilon_s = 5$ и $\epsilon_m = 5,6$ – диэлектрические проницаемости СП и МЛ соответственно; $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ – поправочные коэффициенты, принятые в расчетах за единицу:

$$d_m(x) = \begin{cases} \sqrt{r^2 - (x - 2kr - kl)^2}, & (2k-1)r + kl < x < (2k+1)r + kl \\ 0, & (2k+1)r + kl \leq x \leq (2k+1)r + (k+1)l \end{cases}; \quad (1)$$

$$\epsilon^* \approx \epsilon_s \left(1 + \frac{\pi r^2}{(2r + l)^2} \left[\frac{3h\epsilon_m}{3h\epsilon_m + 2r(\epsilon_s - \epsilon_m)} - 1 \right] \right); \quad (2)$$

$$E_s(x) = \epsilon_f \epsilon_s^{-1} K(x) \alpha(x); \quad (3)$$

$$E_m(x) = \begin{cases} \varepsilon_f \varepsilon_m^{-1} K(x) \alpha(x), & 0 < d_m \leq r; \\ 0, & d_m = 0 \end{cases}; \quad (4)$$

$$E_f(x) = \begin{cases} \varepsilon_m \varepsilon_f^{-1} K(x) \alpha(x), & 0 < d_m \leq r; \\ \varepsilon_s \varepsilon_f^{-1} K(x) \beta(x), & d_m = 0 \end{cases}; \quad (5)$$

$$k=0, 1, 2...; \quad K(x) = U \frac{\varepsilon_p h [h - d_m(x)]^{-1}}{2\varepsilon_p \varepsilon^* d_f + \varepsilon_f \varepsilon^* d_p + \varepsilon_f \varepsilon_p h + \varepsilon_f \varepsilon_p \varepsilon^* d_v(x)}. \quad (6)$$

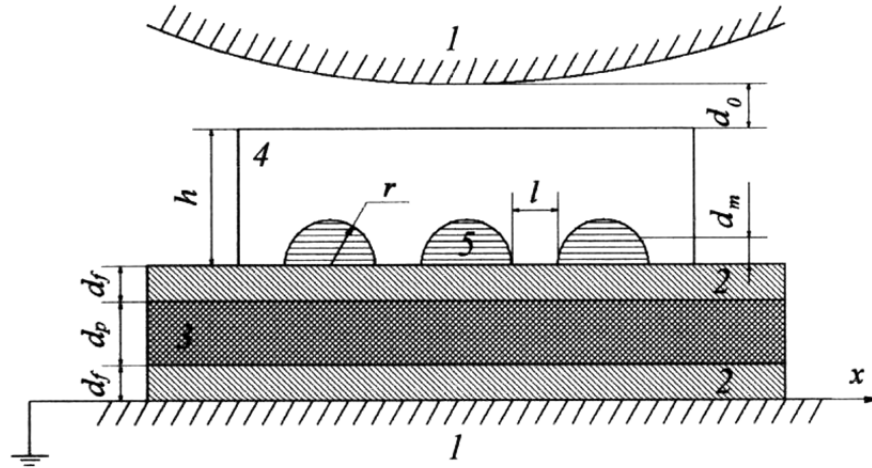


Рис. 1. Схема ЭПД СММЛ на AgHal-фотоматериале (описание в тексте)

Для проверки результатов моделирования были проведены экспериментальные исследования на описанной выше установке (см. рис. 1). Полученные на AgHal-фотоплёнке «Agfa» ЭПИ СММЛ (см. рис. 2а) обрабатывались в среде MathCad с помощью пакета для работы с изображениями. На рис. 2б представлены результаты моделирования, где 1 – теоретически полученная кривая распределения поля в фотоэмульсионном слое; 2 – результат его экспериментальной оценки по ЭПИ; 3 – функция $d_m(x)$, описывающая распределения МЛ в стеклянной матрице, которая для наглядности совмещена с графиком $E_f(x)$.

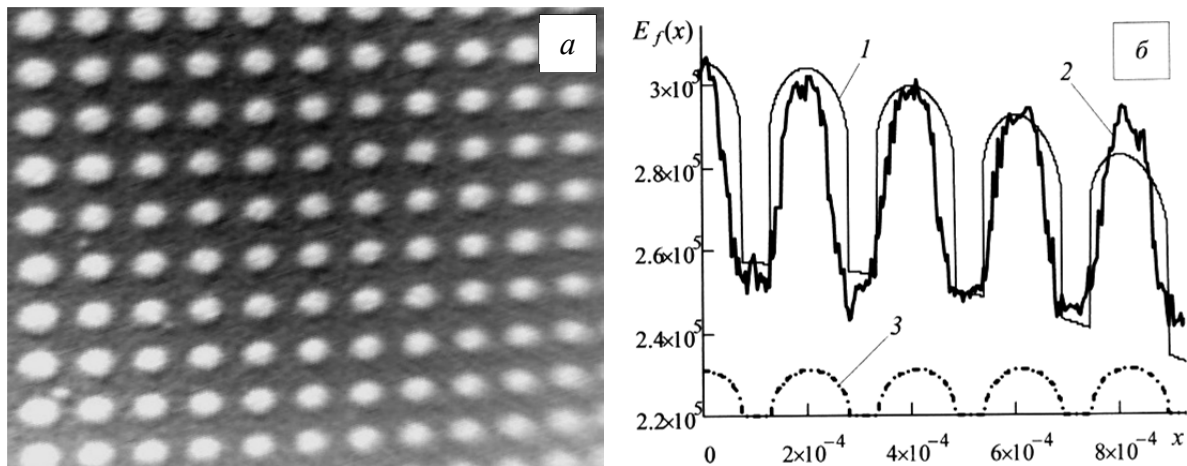


Рис. 2. Результаты исследований: а – ЭПИ СММЛ; б – сравнение теоретического (1) и экспериментального (2) распределения электрического поля в фотоэмульсионном слое

Из рис. 2б видно хорошее совпадение кривых 1 и 2 как по амплитуде напряженности, так и периодичности скачков изменения электрического поля, соответствующих каждой МЛ в СП. Однако, экспериментально установленная ширина пиков $E_f(x)$ у вершин при этом оказывается в $\sim 1,8$ раза меньше теоретически определенного значения данного параметра. Это очевидный результат, обусловленный не только «краевым эффектом» при поляризации диэлектриков в неоднородном электрическом поле, но и неоднородным распределением зерен металлического серебра ЭПИ, имеющих конечные размеры. Поэтому их совпадение с размерами исследуемого объекта или его элемента способно привести к «размазыванию» изображения, что и наблюдается в виде шумовых флуктуаций на границе раздела стекло–МЛ и на вершине последних, как имеющих наименьшие размеры (радиусы скругления) по сравнению с остальной их частью. Также отметим, что учет «краевого эффекта» (строгое отыскание поправочных коэффициентов в уравнениях (3)–(5)), позволит намного точнее смоделировать картину распределения $E_f(x)$ на любом отрезке данной функции при фиксированном значении электрополевой экспозиции [4].

Из результатов проведенной работы следует, что использованный математический подход является правомерным при моделировании ЭПД на примере СММЛ. Как теоретические оценки, так и подтверждающие их экспериментальные результаты не только демонстрируют возможность ЭТГ-технологии в НК изделий оптоэлектроники независимо от их оптических свойств, но и расширяют область использования ранее описанного макета прибора электрополевой фотографии – «электрополевого сканера» [5].

Список литературы

1. Кравцов, А.Е. Исследование качества электролюминесцентных панелей методом электротопографического контроля / А.Е. Кравцов, М.А. Резников, С.З. Низник и др. // Ученые записки ТартГУ. – 1976. – Вып. 379. – С. 122–131.
2. Кравцов, А.Е. Электротопографический эффект в фотоэмульсиях и его применение / А.Е. Кравцов, В.А. Пипа, М.А. Резников, М.В. Фок // Труды ФИАН им. П.Н. Лебедева. – 1981. – Т. 129. – С. 13–65.
3. Никитин, В.А. Электростимулированная миграция ионов в интегральной оптике / В.А. Никитин, Н.А. Яковенко. – Краснодар: КубГУ, 2003. – 154 с.
4. Шишканов, О.Н. Химико-фотографические исследования процессов электрополевой коалесценции атомов серебра в микрокристаллах его галогенидов / О.Н. Шишканов, А.П. Бойченко, Н.А. Яковенко // Экологический вестник научных центров ЧЭС. – 2015. – № 2. – С. 89–100.
5. Шишканов, О.Н. Испытания электрополевого сканера / О.Н. Шишканов, А.П. Бойченко // Перспективы развития науки и образования: Сб. науч. трудов по материалам Международной научно-практической конференции. – Ч. 12. – Тамбов, 2015. – С. 168–169.

СЕКЦИЯ «НАУКИ О ЗЕМЛЕ»

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ САРАТОВСКОГО ПРАВОБЕРЕЖЬЯ

Пичугина Н.В.

доцент кафедры физической географии и ландшафтной экологии,
канд. геогр. наук,
ФГОУ НИУ «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», Россия, г. Саратов

Макаров В.З.

заведующий кафедрой физической географии и ландшафтной экологии, декан географического факультета, доктор геогр. наук, профессор,
ФГОУ НИУ «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», Россия, г. Саратов

Данилов В.А.

доцент кафедры геоморфологии и геоэкологии, канд. геогр. наук,
ФГОУ НИУ «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», Россия, г. Саратов

Фёдоров А.В.

старший преподаватель кафедры геоморфологии и геоэкологии,
ФГОУ НИУ «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», Россия, г. Саратов

В настоящее время усиливается процесс вовлечения в сельскохозяйственный оборот старозалежных земель. В этих условиях важно: 1) учитывать природный потенциал почв и биоклиматический потенциал ландшафтов; 2) при проведении сельскохозяйственного районирования опираться на ландшафтную структуру территорий.

Ключевые слова: лесостепь, степь, сельскохозяйственный округ, Саратовская область.

Саратовская область находится на крайнем юго-востоке Европейской части России. В пределах области получили распространение лесостепные, степные и полупустынные ландшафты. Долина Волги делит территорию области на две части. Согласно источнику [1], 55,0% площади Саратовского Правобережья занимают степные ландшафты, среди которых представлены северные (41,1%) и типичные (13,9%) степи. Лесостепные комплексы охватывают 30,3% рассматриваемой территории, а на ландшафты речных долин приходится около 14,7% площади [1]. В структуре землепользования доминируют сельскохозяйственные земли, среди которых преобладают пахотные угодья и залежи. В настоящее время, когда активизируется процесс вовлечения 15–20-летних залежных земель в сельскохозяйственный оборот, необходимо учитывать исходный природно-ресурсный потенциал ландшафтов.

В соответствии с сельскохозяйственным районированием территории Саратовской области [2], в Саратовском Правобережье выделены 4 экономические сельскохозяйственные микрзоны:

– *Западная правобережная*: Аркадакский, Балашовский, Романовский, Ртищевский, Самойловский, Турковский районы;

– *Центральная правобережная*: Аткарский, Екатериновский, Калининский, Красноармейский, Лысогорский районы;

– *Северная правобережная*: Базарно-Карабулакский, Балтайский, Вольский, Воскресенский, Новобурасский, Петровский, Хвалынский районы;

– *Пригородная*: Саратовский, Татищевский районы [2].

На это районирование опираются и современные исследователи и практики. Вместе с тем, необходимо подчеркнуть, что в подобной «нарезке» сельскохозяйственных таксонов не всегда учитывается природный потенциал ландшафтов, который имеет большое значение при земледельческом освоении территории. Например, в Центральную микрозону входят Екатериновский и Красноармейский районы, но в первом районе представлены лесостепные и северо-степные ландшафты, а во втором районе – ландшафты типичной степи. Это, неизбежно, ведет к различиям в почвенно-растительном покрове и биоклиматическом потенциале районов.

Для оптимизации земледельческого природопользования необходимо сельскохозяйственное районирование проводить, опираясь на ландшафтную структуру территории. Согласно ландшафтному районированию [1, 4], в пределах Саратовского Правобережья представлены лесостепные, северо-степные и типично-степные ландшафты. Они распределены между следующими провинциями: Окско-Донская низменно-равнинная лесостепная, Приволжская возвышенно-равнинная лесостепная, Донская низменно-равнинная степная и Приволжская возвышенно-равнинная степная. На основе ландшафтного районирования Саратовского Правобережья [1] и Саратовской области [4] были выделены сельскохозяйственные округа и проведена группировка муниципальных районов (табл. 1).

Таблица 1

**Распределение муниципальных районов
Саратовского Правобережья (СП) по сельскохозяйственным округам**

Сельскохозяйственный округ (СХО), муниципальный район	Площадь, км ²	Пашня, залежь, %	Площадь природных геосистем*, %				
			ЛС	СС	ТС (сп)	ЮС (юп)	ДР
1	2	3	4	5	6	7	8
СХО СП 1	10273,9	63,8	62,6	15,6			21,8
Аркадакский	2237,0	65,4	41,6	35,4			23,0
Екатериновский	3039,4	–	47,8	29,2			23,0
Романовский	1285,5	69,3	44,3	11,1			42,4
Ртищевский	2303,7	47,8	86,2				13,8
Турковский	1408,3	72,8	93,2				6,8
СХО СП 2	9409,8	55,6	61,1	26,8	0,6		11,5
Базарно-Карабулакский	2287,8	61,5	55,1	41,2			3,7
Балтайский	1265,9	56,7	94,6				5,4
Вольский	3895,7	–	48,4	30,6	2,3		18,7
Хвалынский	1960,4	48,5	46,3	35,4			18,3

1	2	3	4	5	6	7	8
СХО СП 3	8770,0	70,2	0,3	86,9	0,9		11,9
Балашовский	2922,9	63,4	0,9	77,2			21,9
Калининский	3254,5	72,4		93,0	2,8		4,2
Самойловский	2592,6	74,7		90,5			9,5
СХО СП 4	11158,4	61,4	17,4	53,0	12,6		17,0
Аткарский	2679,8	68,5	19,4	55,3			25,3
Лысогорский	2340,5	56,8		52,4	20,5		27,1
Новобурасский	1740,6	58,2	25,4	50,7	14,5		9,4
Петровский	2328,7	71,9	42,1	41,3			16,6
Татищевский	2068,8	51,7		65,3	28,2		6,5
СХО СП 5	7336,3	50,4	5,5	9,5	51,8	12,9	20,3
Воскресенский	1506,6	–	16,7	13,1	48,5		21,7
Красноармейский	3532,5	–			40,9	38,6	20,5
Саратовский	2297,2	50,4		15,5	65,9		18,6
Всего	46948,4						

Примечание – *Природные геосистемы: ЛС – лесостепи с серыми лесными почвами и черноземами выщелоченными, черноземами типичными; СС – северной степи с черноземами обыкновенными; ТС (сп) – северной полосы типичной степи с черноземами южными; ТС (юп) – южной полосы типичной степи с темно-каштановыми почвами, ДР – долин рек.

В первый и второй сельскохозяйственные округа вошли муниципальные районы, в которых на долю лесостепных ландшафтов приходится 41,6–94,6% от их площади. В почвенном покрове первого округа преобладают черноземы выщелоченные, черноземы типичные, во втором округе – черноземы типичные, серые лесные почвы, черноземы неполноразвитые.

Третий сельскохозяйственный округ объединяет районы, где северо-степные ландшафты занимают 77,2–93,0% их площади. Среди почв доминируют черноземы обыкновенные. Четвертый СХО имеет переходный характер. На долю северо-степных ландшафтов здесь приходится 41,3–65,3% площади. На севере с ними соседствуют лесостепные комплексы, а на востоке – типично-степные. Наряду с черноземами обыкновенными встречаются черноземы типичные, черноземы южные и серые лесные почвы. В пятом СХО доминируют (48,5–79,5%) типично-степные ландшафты. Почвенный покров представляют на севере – черноземы южные, на юге Красноармейского района – темно-каштановые почвы.

С. И. Пряхина с соавторами [3] провели расчеты климатических и биоклиматических показателей по некоторым метеостанциям Саратовской области. На основе этих материалов составлена таблица 2, дающая представление о биоклиматическом потенциале выделенных сельскохозяйственных округов.

Значения климатических показателей по сельскохозяйственным округам Саратовского Правобережья (составлено по [3])

Сельскохозяйственный округ (СХО), метеостанция	Продолжительность вегетационного периода, дни	Сумма температур воздуха со значениями выше 10°C, °C	Годовая испаряемость, мм	Годовое количество осадков, мм	Коэффициент увлажнения	Биоклиматический потенциал (БКП)	Климатический индекс биологической продуктивности (Бк), баллы
СХО СП 1	150	2520	663	488	0,31	1,9	109
Ртищево	143	2460	642	500	0,33	2,0	112
Росташи	156	2580	683	476	0,28	1,9	106
СХО СП 2	144	2433	659	502	0,31	1,9	107
Карабулак	143	2394	673	505	0,32	2,0	108
Хвалынский	145	2473	645	498	0,30	1,9	107
СХО СП 3	152	2636	698	466	0,27	1,9	105
Балашов	156	2628	689	481	0,28	2,0	108
Калининск	148	2644	707	451	0,26	1,8	102
СХО СП 4	145	2506	741	456	0,28	1,8	104
Аткарск	148	2595	707	485	0,28	1,9	107
Окт. городок	145	2523	874	429	0,25	1,7	95
Петровск	143	2400	642	454	0,30	1,9	109
СХО СП 5	152	2703	905	448	0,23	1,7	96
Сплавнуха	150	2659	936	445	0,24	1,7	96
Саратов (Ю.В.)	154	2747	874	451	0,23	1,8	97

Согласно данным таблицы 5, биоклиматический потенциал постепенно снижается от 1,9–2,0 в лесостепи до 1,7–1,8 – в типичной степи, а климатический индекс биологической продуктивности – от 108–112 до 96–97, соответственно.

В целом необходимо отметить, что группировка муниципальных районов Саратовского Правобережья в сельскохозяйственные округа на основе ландшафтной структуры их территорий позволяет учесть природный потенциал ландшафтов и их компонентов (в том числе, почвенный и биоклиматический), и более рационально организовать сельскохозяйственное природопользование.

Список литературы

1. Макаров, В.З. Ландшафтное районирование Саратовского правобережья [Текст] /В.З. Макаров, Н.В. Пичугина //Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. – 2013. – Т. 13, вып. 2. – С. 13–16.
2. Научно обоснованные системы земледелия Саратовской области на 1981–1985 годы [Текст] /В.М. Бебякин, З.Н. Бобкова, В.Г. Бокарев [и др.]; ред. М.М. Попугаев; НИИСХ Юго-Востока; Производственное управление сельского хозяйства Саратовского облисполкома. – Саратов: Приволж. кн. изд-во, 1982. – 194 с.

3. Пряхина, С.И. Природные ресурсы Нижнего Поволжья и степень их использования зерновыми культурами [Текст] /С.И. Пряхина, Ю.А. Складов, А.И. Заварзин. – Саратов: «Аквариус», 2001. – 66 с.

4. Учебно-краеведческий атлас Саратовской области [Карты] /В.В. Аникин, Е.В. Акифьева, А.Н. Афанасьева [и др.]; гл. ред. А.Н. Чумаченко; отв. ред. В.З. Макаров. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2013. – 144 с.

ТУРИСТСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ НАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРКОВ РОССИИ

Полещук Л.О.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск

Шихова А.М.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск

В настоящее время в России создано 47 национальных парков. Распространены они по территории страны не равномерно. Большая их часть расположена в европейской части России. Каждый из них обладает огромным природным и культурно-историческим потенциалом для развития на его территории туризма.

Ключевые слова: национальные парки, Россия, туризм.

Туризм – одна из наиболее важных и высокодоходных отраслей народного хозяйства, являющаяся при этом для многих стран приоритетным источником доходов для государственного бюджета. Относительно новым видом отдыха и туризма является посещение национальных парков (НП). Благодаря динамичному развитию экономики, многие страны всё больше и больше вовлекают природное и культурно-историческое наследие парков в туризм через увеличение потока посетителей и улучшение инфраструктуры и рекреации на их территории [1]. Россия позиционирует себя как социальное государство, в связи с этим, связывает стратегию своего развития с неуклонным ростом качества жизни населения. Поэтому туризм и рекреация должны занимать важное место в жизни россиян. Для нашей страны экскурсии в НП является новым видом отдыха в свободное от работы время.

Туристский потенциал – это совокупность природных, историко-культурных объектов и явлений, а также предпосылок для организации туристской деятельности на определенной территории [2]. Основной целью данной статьи является выявление туристского потенциала национальных парков России.

Национальный парк – особая форма организации охраняемых природных территорий, где совмещаются задачи сохранения природных и историко-культурных объектов с организацией активного познавательного отдыха. В настоящее время на территории России расположено 47 НП, суммарная площадь которых составляет 10,6 млн. га. Они расположены преимущественно в европейской части России и на Урале.

Природный потенциал национальных парков включают в себя: леса, луга, воды, животный мир, а также такие эстетические ценности, как живописные ландшафты, природная тишина и чистый воздух. Культурно-исторический потенциал любого НП выражен в его историческом наследии. К культурному (историко-культурному) наследию следует относить общественно признанные материальные и духовные ценности, сохраняемые обществом для поддержания социальной и этнической идентичности и для передачи последующим поколениям [1].

НП «Куршская коса» – естественный природный парк, представляющий в миниатюре сразу несколько миров. Ученые называют ее «музеем природных зон», так как пейзажи здесь очень разнообразны: от березовых лесов до песчаных пустынь. И все это на узкой полосе земли (в самом широком месте коса достигает 3,8 километра, а в самом узком – лишь 400 метров). Заселение человеком этого полуострова началось еще в доисторическое время, когда коса была почти полностью покрыта лесом. В средние века эту местность населяло племя куршиай (куршяй), которому уже тогда пришлось вести борьбу с такими силами природы, как волны и ветер, разрушавшими дюны и берега. Основным занятием местного населения в прошлом было рыболовство. Об этом свидетельствует реликтовый исторический ландшафт: под слоем песка обнаружены рыбацкие поселения, погребенные дюнами еще в XVIII–XIX вв.

Первым, полностью официально созданным, национальным парком России, наряду с Лосиным островом, является Сочинский. По территории парка протекают около 40 рек и ручьев Черноморского бассейна. На реках и ручьях имеется большое количество водопадов и каньонов. Сама территория парка уникальна, поскольку нигде в России так близко не соседствуют субтропики и высокогорье. Именно поэтому горному Черноморью свойственен самый сложный в нашей страны спектр высотных зон – от горных широколиственных лесов подножий через горные буковые и хвойные леса к субальпийским ландшафтам и высокогорьям с обнаженными скалами и снегами. Рекреационными объектами парка являются первозданные уголки кавказской природы, архитектурные и историко-культурные памятники. К памятникам истории относится Смотровая башня Ахун. На возведение башни в романском стиле ушло меньше года. Ее соорудили в 1936 году по указу И.В. Сталина.

Крупнейшим по площади национальным парком нашей страны является «Югд ва» (в переводе с коми – «светлая вода»). Его природа уникальна – это единственный уголок Европы, где она сохранилась практически в не нарушенном состоянии. Парк был включен в Список Всемирного Наследия ЮНЕСКО в 1995 году. Он располагается на границе Европы и Азии, на западных склонах Северного и Приполярного Урала. «Югд ва» обладает большим количеством природных достопримечательностей. В их числе гольцовые и тундровые формации, геологические памятники, опорные разрезы и

местонахождения ископаемой флоры и фауны, особо ценные лесные насаждения, генетические резерваты, а также уникальные ландшафты. На территории парка также сохранилось большое количество объектов культурного наследия: следы хозяйственной деятельности различных эпох, «памятные» места, связанные с историческими событиями, места, связанные с верованиями коренного населения (природные объекты, упоминавшиеся в сказаниях, легендах) и т.д.

На территории НП «Алханай» располагается единственный в России природный культовый комплекс – горный массив Алханай, который входит в число пяти самых популярных и почитаемых святынь северного буддизма. Самая высокая вершина парка – гора Алханай – достигает высоты 1662 м над уровнем моря. Гора является палеовулканом юрского периода (107–176 млн. лет назад). Это единственное место в России с исторически сложившейся системой природных культовых памятников буддийской религии.

«Ануйский» НП – один из уникальных природоохранных комплексов, расположенный в вдоль реки Амур. Парк является частью экосети, которая объединяет местообитания амурского тигра. Территория парка почти не затронута деятельностью человека и отличается большим разнообразием экосистем, богатством природных и исторических объектов. Почти весь парк является территорией традиционного природопользования удэгейцев и нанайцев. В связи с этим, а также как район исследований выдающегося писателя, путешественника и ученого В.К. Арсеньева, территория имеет высокую культурную и историческую ценность.

Подводя итог, следует отметить, что туристский потенциал национальных парков России колоссален. В настоящее время сеть парков охватывает многие уникальные ландшафты и экосистемы. Территория национальных парков богата рекреационными ресурсами и является перспективной для развития туризма. Мировой опыт показал, что создание национальных парков – хороший и экономически рентабельный способ развития массового туризма с минимальным ущербом для природы.

Список литературы

1. Кулешова М.Е. Управление культурными ландшафтами и иными объектами историко-культурного наследия в национальных парках / М.Е.Кулешова. – М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2002. – 106 с.
2. Лёвкин Е.В. Развитие туризма как механизма повышения доходов и обеспечения занятости населения, проживающего в национальных парках России // Заповедники и национальные парки, 2000. – Вып. 31. – С. 27-33.
3. Святохо Н. В. Концептуальные основы исследования туристского потенциала региона // Экономика и управление. – 2007. – №2. – С.30-36.

ЗАВИСИМОСТЬ ОБЪЁМА КОНВЕРСИОННЫХ ОПЕРАЦИЙ С НАЛИЧНОЙ ИНОСТРАННОЙ ВАЛЮТОЙ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ОТ КУРСА ИНОСТРАННОЙ ВАЛЮТЫ В ТЕРРИТОРИАЛЬНОМ РАЗРЕЗЕ

Цуканов А.В.

аспирант кафедры экономической и социальной географии,
Курский государственный университет, Россия, г. Курск

В статье рассматривается влияние курса иностранной валюты на объём покупки и продажи иностранной валюты в Российской Федерации, рассматриваются изменения корреляции объёма конверсионных операций с наличной иностранной валюты и курса иностранной валюты в зависимости от территориального фактора.

Ключевые слова: конверсионные операции, иностранная валюта, наличная валюта, курс иностранной валюты.

События последнего времени увеличили волатильность курса национальной валюты и как следствие волатильность курсов иностранных валют, в частности курса доллара США, что сказалось на поведении физических лиц относительно покупки или продажи иностранной валюты, однако данная корреляция проявляет разную силу в зависимости от территории.

В таблице 1 представлена динамика среднего курса доллара США и объёма покупки иностранной валюты уполномоченными банками и их филиалами у физических лиц, а также коэффициент корреляции.

Таблица 1

Динамика объёма покупки наличной иностранной валюты уполномоченными банками и их филиалами у физических лиц в 2014 году (млн.долл.США)

2014 г.	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июн.	Июл.	Авг.		Окт.	Нбр.	Дек.	
Средний номинальный курс доллара США к рублю за период, руб.	33,46	35,22	36,21	35,66	34,93	34,41	34,64	36,11	37,87	40,76	45,86	55,41	Коэф. корреляции
РФ	1720	2355	2436	2826	2254	2312	2881	2421	2732	2267	2707	3586	0,728
ЦФО	925	1369	1258	1623	1203	1306	1640	1258	1369	1205	1323	1724	0,458
СЗФО	325	419	405	461	374	387	429	383	460	364	429	500	0,593
ЮФО	97	119	162	157	153	138	187	172	186	147	181	239	0,739
СКФО	17	20	26	28	22	22	27	28	28	22	29	42	0,831
ПФО	129	152	213	204	188	167	213	201	253	187	250	352	0,865
УФО	72	87	119	116	94	93	114	109	135	107	163	254	0,946
СФО	20	25	33	31	22	23	29	28	38	31	54	90	0,973
ДФО	66	77	99	97	95	80	115	111	118	94	126	150	0,793
КФО	0	0	0	0	0	0	4	9	11	10	13	14	0,771

Источник: [1], [2]

Исходя из данных представленных в таблице 1, делаем вывод, что курс доллара США довольно сильно влиял на продажу иностранной наличной валюты на всей территории России, так как коэффициент корреляции равен 0,728, данное значение коэффициента означает сильную прямую зависимость

между курсом доллара и объёмом проданной иностранной наличной валюты населением уполномоченным банкам. Однако, если рассмотреть данную зависимость в территориальном разрезе, то картина меняется. В Центральном федеральном округе корреляция данных показателей составляет 0,458, которую можно оценить, как слабая. Чуть больше данный коэффициент в Северо-Западном федеральном округе 0,593, это средняя прямая зависимость. Следовательно, в этих округах население менее остро реагирует на изменение курса иностранной валюты.

овольно высоки, и выше значения по всей России. Максимальное значение в Сибирском федеральном округе 0,973, что говорит о очень сильной прямой линейной зависимости курса доллара США и объёма продажи валюты населением. Также очень высокая прямая линейная зависимость наблюдается в Уральском федеральном округе, там коэффициент корреляции равен 0,946.

В таблице 2 приведена динамика среднего курса доллара США и объёма продажи иностранной валюты уполномоченными банками и их филиалами физическим лицам, а также корреляция данных показателей.

Из таблицы 2 видно, что коэффициент корреляции для данных по России весьма низкий 0,411, то есть зависимость между курсом валюты и объёмом покупки населением иностранной валюты в банках слабая, следовательно, в целом по России в 2014 году население покупало валюту вне зависимости от её курса.

В территориальном разрезе наибольшее значение коэффициента корреляции в Центральном федеральном округе 0,472, при этом данная зависимость также слабая.

Таблица 2

Динамика объёма продажи наличной иностранной валюты уполномоченными банками и их филиалами физическим лицам в 2014 году (млн.долл.США)

2014 г.	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июн.	Июл	Авг.		Окт.	Нбр.	Дек.	Коеф. Корреляции
Средний номинальный курс доллара США к рублю за период, руб.	33,46	35,22	36,21	35,66	34,93	34,41	34,64	36,11	37,87	40,76	45,86	55,41	
РФ	6228	5731	7295	4615	5395	5341	4973	5066	4917	8577	5160	7397	0,411
ЦФО	2889	2577	3620	2324	2762	2674	2437	2559	2482	4493	2678	3757	0,472
СЗФО	929	904	1049	687	791	767	703	686	606	1005	655	999	0,229
ЮФО	552	541	712	462	543	519	477	478	414	734	469	723	0,431
СКФО	196	128	203	115	161	135	99	97	129	256	108	157	0,063
ПФО	618	591	664	402	442	455	457	444	428	669	448	685	0,379
УФО	411	404	421	279	322	322	308	292	285	453	279	424	0,230
СФО	88	88	87	49	62	58	59	58	53	90	57	101	0,395
ДФО	288	273	352	233	266	313	255	252	259	499	309	366	0,437
КФО	0	0	0	0	0	0	34	67	80	138	55	35	0,331

Источник: [1], [3]

В остальных федеральных округах коэффициент корреляции имеет низкие значения, вплоть до 0,063 в Северо-Кавказском федеральном округе.

Из вышеизложенного следует, что в 2014 году присутствовала корреляция между курсом валюты и объемом продажи иностранной валюты населением, причём максимальна она была в Сибирском федеральном округе, и практически отсутствовала зависимость между курсом валюты и объемом покупки иностранной валюты населением.

Список литературы

1. Основные производные показатели динамики обменного курса рубля в январе – декабре 2014 года [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <http://www.cbr.ru>.
2. Сводные данные об объемах покупки наличной иностранной валюты уполномоченными банками и их филиалами у физических лиц в 2014 году [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <http://www.cbr.ru>.
3. Сводные данные об объемах продажи наличной иностранной валюты уполномоченными банками и их филиалами физическим лицам в 2014 году [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <http://www.cbr.ru>.

БЕКТАУ-АТА КАК ТУРИСТСКИЙ ОБЪЕКТ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Шихова А.М.

Национальный исследовательский
Томский государственный университет, Россия, г. Томск

Полещук Л.О.

Национальный исследовательский
Томский государственный университет, Россия, г. Томск

Бектау-Ата – горный оазис посреди степей Прибалхашья. Природный объект, обладающий огромным туристским потенциалом, остается неизвестным для потенциальных туристов в связи с исторически сложившейся социально-экономической задержкой в развитии прилегающих территорий. В настоящий момент туристские возможности региона наиболее распространены среди фототуристов.

Ключевые слова: Бектау-Ата, Казахстан, туризм.

Естественное природное образование – Бектау-Ата, расположенное в 70 км севернее города Балхаш, на юге Карагандинской области в Казахстане. Украшенная разнообразными скалами и ущельями горная цепь Бектау-Ата поднимается ввысь на высоту более 800 м от уровня степи и образует красивейшее место Северного Прибалхашья. Абсолютная высота на вершине немногим более 1200м, ее называют – маяк Прибалхашья.

Бектау-Ата – встреча двух непохожих друг на друга ландшафтов – Прибалхашской степи и гранитной горы. Это место называют и урочищем (территория имеет существенные микроклиматические отличия относительно прилегающей степи), и плутоном (вулкан, не успевший извергнуться), или просто горой. По историческим данным, название горы в переводе значит «гора святого старца Бека», который жил в пещере на вершине Бектау-Ата [1].

Единого мнения относительно генезиса гранитной скалы нет. По основной геологической гипотезе, Бектау-Ата – гранитная вулканическая лава, застывшая на поверхности и в трещинах земли. В палеозое, на границе карбона и перми, здесь рождался большой вулкан. Он растопил горные породы, но так и не взорвался. В этом месте осталась гигантская гранитная пробка, закрывшая жерло навеки.

Горный массив Бектау-Ата невелик по площади – примерно 6×6 км (4 000 га), но тысячелетние процессы выветривания создали здесь настоящие произведения искусства – причудливые скалы самых разнообразных форм. Они так и называются «Гриб», «Сундук», «Черепаша», «Трёхзубка». Со спутника Бектау-Ата напоминает приплюснутую полусферу. Десятки многокилометровых даек (трещин, в которых застыла вулканическая лава), пронизывающие горный массив на протяжении километров, дают представление о масштабах геологических процессов, имевших место миллионы лет назад. На одном из склонов горного массива, на юго-западном склоне горы Бектау-Ата, находится легендарная пещера с родником Аулие, обладающим, по мнению народа, целебной водой. Считается, что древние тюрки устраивали здесь жертвоприношения богине плодородия и семейного очага Умай. Вход в пещеру расположен на высоте 600 м. Пещера Аулие естественного происхождения, в нее можно войти в полный рост и продвинуться внутрь примерно на 15 м, далее пещера заполнена водой. Ее общая протяженность порядка 50 м. Аулие считается самой глубокой пещерой Казахстана.

В урочище Бектау-Ата произрастает около 300 видов луговых и степных растений, значительная часть из них лекарственные (шиповник, таволга, боярышник). 45 видов растений относится к категории редких (астрагал Кесслера), 8 занесены в Красную книгу (копеечник бектауатавский). Также есть арча, или казахский можжевельник, растущий буквально на голых скалах. Из представителей фауны обнаружен редкий зверёк – пятипалый карликовый тушканчик. В горах живут архары. В низовьях и в степи встречаются сайгаки, джейраны и другие копытные, за которыми гоняются волки. Лесные участки привлекают множество птиц. Это горлицы, иволги, варакушки, славки, овсянки, каменки.

Территория горного массива практически не облагорожена для принятия туристов. В его пределах расположена одна база отдыха «Сары-Арка», проживание в которой составляет порядка 2500 тг (~ 700 руб.) с человека в сутки, а также действующий пионерский лагерь, но он туристов не принимает. Именно поэтому, отдых в Бектау-Ата предполагает палаточные лагеря.

Основной вид туризма данного района – фототуризм (относительно новое направление в туризме; путешествие, позволяющее фотографам и фотолюбителям открывать для себя новые уголки в компании единомышленников). Фототуристы не требовательны к условиям проживания, важнейший критерий для них – вдохновение и пейзажи.

Фотографы очень любят приезжать на Бектау-Ата летом – пейзаж здесь необычный, много интересных ракурсов, простор для творческой фантазии. Очень хороша гора Бектау-Ата в утренние и закатные часы – можно передать

красоту этого фантастического места. На протяжении дня свет и тени меняют картинку много раз, и иногда кажется, что Бектау-Ата живая, реальная, настоящая, а не каменная. А когда на небе появляются облака, от красоты и величия природы захватывает дух [2].

Масштаб туристских возможностей местности составляет диспропорцию с реальной туристской картиной Бектау-Ата. Незначительный поток туристов объясняется недоинформированием населения, существенным недофинансированием территории, отсутствием рекламы и необходимой инфраструктуры, что в свою очередь связано с социально-экономическим отставанием региона в целом. Таким образом, Бектау-Ата является интереснейшим, но малоизвестным туристским объектом Республики, для увеличения потока туристов, которому необходима популяризация.

Список литературы

1. Каримов Е. Горы Бектау-Ата [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.kolesa.kz
2. Урочище Бектау-Ата. Путешествия туризм фотографии. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.weandworld.com

**ПРИМЕНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ
ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ DEEP LEARNING**

Алексеев Ю.В.

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ,
Россия, г. Шахты

На основе обзора современных решений в области Deep Learning в статье изложены принципы работы сверточных нейронных сетей для задачи распознавания образов. Принимая во внимание тот факт, что нейронные сети требуют существенных вычислительных ресурсов для обучения и работы, была описана возможность использования гетерогенной распределенной вычислительной системы для реализации нейронных сетей с использованием имеющихся ресурсов пользователей программной платформы.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть, распознавание образов, обучение нейронных сетей, гибридные системы, распределенные вычисления.

Введение

Задача распознавания образов представляет собой определение исходных данных к некоторому классу при выделении существенных признаков в этих данных. Задача распознавания – одна из основных в большинстве интеллектуальных систем и имеет важное практическое значение.

Многие задачи распознавания легко решаются людьми в повседневной жизни на подсознательном уровне. Попытки построить искусственные системы, которые могли бы также легко решать подобные задачи, не столь убедительны. Главная проблема состоит в том, что невозможно верно определить признаки, по которым нужно проводить распознавание. Искусственные системы распознавания, решающие задачи с помощью выделения правильных признаков, получили значительное распространение и широко используются во многих областях, например: диагностика в медицине и технике, распознавание речи, машинное зрение, символьное распознавание, охранные системы и т.д.

Среди большого количества алгоритмов распознавания можно выделить широкий класс методов, заслуживающий отдельного рассмотрения – нейросетевые методы. В их основе лежат нейронные сети – вычислительные модели, принцип функционирования которых сходен с сетями биологических нейронов головного мозга. Искусственные нейросети демонстрируют многие свойства биологических структур, такие как: обучение на основе предыдущего опыта, извлечение существенных свойств из поступающей информации, обобщение имеющихся прецедентов на новые случаи.

Сверточная нейронная сеть – специальная архитектура искусственных нейронных сетей, нацеленная на эффективное распознавание образов, лиц и речи, которая входит в состав технологии глубокого обучения (Deep Learning).

Для достижения высокой эффективности важно не только правильно обучить сеть, но и верно выбрать инструмент для проектирования. В данной работе описана разработка проекта по созданию программной платформы для распределенного обучения и дальнейшей работы нейронной сети для задач распознавания образов.

Принцип работы сверточных нейронных сетей

Сверточные нейронные сети специализированы для распознавания двумерных поверхностей, обладают высокой степенью инвариантности к различным поворотам, искажениям, смещениям и масштабу. Пример такой сети представлен на рисунке 1.

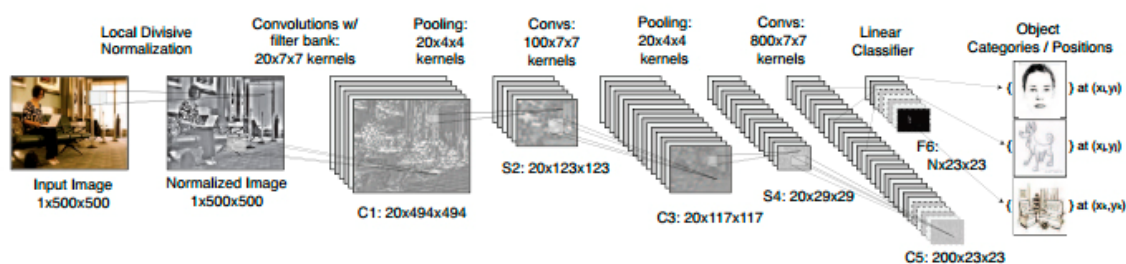


Рис. 1. Архитектура сверточной сети для распознавания объектов

Сверточные нейронные сети работают не с целым изображением, уменьшая его размер, выделяются наиболее важные признаки изображения. Сверточная нейронная сеть строится путем чередования: субдискретизирующего слоя, слоя свертки и полносвязного выходного слоя. Можно описать три главные идеи сверточной нейронной сети:

- 1) Идея о локальных полях восприятия, т.е. на вход нейрона подаются определенные слои изображения, а не оно в целом. Это позволило сохранить топологию изображения при существенном сокращении объема вычислений.
- 2) Идея о разделяемых весах, т.е. для большого количества связей требуется малое количество весовых коэффициентов. Это позволяет быстрее и точнее обучить сеть, чем классическую сеть прямого распространения.
- 3) Идея о пространственной субдискретизации, т.е. уменьшение размерности изображения. Благодаря этому достигается инвариантность к искажениям входящего изображения.

На каждом сверточном слое фрагмент входного изображения умножается на матрицу весов, после происходит операция суммирования этих значений. Полученное число представляет собой один пиксель изображения, который называют картой признаков. На каждом слое создается несколько карт признаков. Все слои в сверточной нейронной сети имеют похожий алгоритм реализации, различия связаны с распределением коэффициентов весов и входов.

Вначале входное изображение представляется в виде областей, из каждой такой области строятся карты признаков. Используя один набор коэффициентов, на выходе получается значение, которое соответствует элементу выходной карты. Так алгоритм, выполняясь несколько раз для элемента, формирует карту признаков, затем коэффициенты изменяются и данный шаг

повторяется для другой карты признаков. На субдискретизирующем слое выходы представлены несколькими значениями, которые меньше числа входов примерно в 2 раза. Эти слои выполняют уменьшение размера входной карты признаков. Полносвязный слой, таким слоем обычно является выход, представляет собой обычный многослойный перцептрон.

Современные исследования

Довольно многие компании и отдельные разработчики проявили интерес к технологии Deep Learning. Сейчас это одна из самых популярных тем в области искусственного интеллекта.

Активно ведутся исследования в данной области компанией Google. Была создана нейросеть, которая обучается при помощи Deep Learning, она показала высокие результаты и уже способна работать с высокоуровневыми представлениями. В Facebook Deep Learning используется при создании решений для распознавания лиц и предметов на изображениях и видеофайлах, находящихся в сети.

Разработки по применению сверточных нейросетей в области компьютерного зрения и для поиска похожих изображений ведутся компанией Яндекс. Так как многие методы распознавания и поиска работают на основе сравнения дескрипторов, был предложен подход формирования этих дескрипторов в ходе обучения нейронной сети на тех данных, которые будут использованы для задачи визуального поиска. Нейронные дескрипторы извлекаются путем вычисления активации всех нейронов во всех слоях для входного изображения. Затем на одном из последних слоев выбираются эти активации, строится вектор и нормализуется [1].

В процессе работы было выявлено, что существуют отличия в построении сети для классификации и поиска. Нейронная сеть для классификации должна быть инвариантна к внутриклассовой изменчивости, а для поиска – к геометрическим преобразованиям. Адаптируя сеть к изменениям ракурса и масштаба, компания Яндекс добилась высоких результатов в распознавании, которые превосходят результаты при использовании нейродескрипторов до адаптации [1]. Результаты показаны на рисунке 2.

Дескриптор	Размерность	Oxford	Oxford105K	Holidays
Нейродескрипторы				
Слой 5	9216	0.389	-	0.670
Слой 6	4096	0.435	0.392	0.729
Слой 7	4096	0.430	-	0.716
Нейродескрипторы с адаптацией				
Слой 5	9216	0.387	-	0.654
Слой 6	4096	0.545	0.512	0.775
Слой 7	4096	0.538	-	0.744

Рис. 2. Результаты применения нейродескрипторов до и после адаптации на коллекциях Holidays и Oxford

Реализация сверточных нейронных сетей

Нейронные сети активно развиваются и их размеры быстро растут, что требует больших вычислительных ресурсов. Инструменты для реализации нейронных сетей развиваются не такими быстрыми темпами. В настоящее

время есть несколько вариантов реализации нейронных сетей. Основными из них являются: кластерные системы, CPU, GPU, GRID-технологии, нейрокомпьютеры.

Применение нейрокомпьютеров, реализованных на нейропроцессорах, является наиболее эффективной реализацией. Они обладают высоким быстродействием, а нейросистемы отказоустойчивы. Несмотря на достоинства, эти устройства дорогостоящи и не широко распространены на рынке.

Многие исследования направлены на изучение возможности применения GPU для ускорения обучения нейронных сетей. GPU широко применяются для реализации нейронной сети, так как стоимость вычислений на видеокартах довольно невысокая. Использование графических процессоров является огромным шагом за последнее время в области нейронных сетей, что делает обучение и реализацию небольших нейронных сетей практичным. Известное ограничение подхода GPU заключается в том, что ускорение обучения сети невелико, когда вся матрица не вписывается в рамки GPU памяти (обычно менее 6 гигабайт) [2, с. 1]. При этом у матрицы нет доступа к данным из оперативной памяти или жёсткого диска во время расчётов. Чтобы эффективно использовать GPU, часто уменьшают размер данных или параметров. Такой подход хорошо работает для небольших задач (например, акустическое моделирование для распознавания речи), но было бы неверно применить его для задач с большим количеством примеров и размеров (например, изображения с высоким разрешением) [2, с. 1].

Еще один вариант реализации нейронных сетей – это применение CPU. Важным отличием между вычислениями на CPU и GPU является выполнение операций с вещественными числами. Так ошибка округления этих чисел в процессе обучения сети может существенно повлиять на результат. Сети, обучающиеся на CPU, допускают меньшее количество ошибок. Но в то же время, длительность обучения и распознавания нейронной сети на GPU меньше по сравнению с оптимизированными алгоритмами, выполняющими вычисления только на CPU.

При увеличении сложности задач распознавания образов и необходимости во всё больших вычислительных мощностях альтернативным вариантом реализации нейронных сетей может служить GRID-технология. Большую часть времени ПК загружены на малую долю своей мощности, тем самым остаются свободные ресурсы. При их рациональном использовании можно выполнять существенные объёмы вычислений. GRID-системы дают возможность объединить свободные вычислительные мощности в единую распределённую систему. Идея распараллелить вычисления основана на том, что в большинстве случаев одна сложная задача может быть разделена на более мелкие подзадачи, которые могут одновременно решаться на нескольких вычислительных узлах. Использование свободных ресурсов компьютеров позволяет снизить стоимость вычислений на единицу производительности.

Структура пакета

Было принято решение по созданию программного пакета для реализации нейронных сетей с использованием предоставляемых свободных мощно-

стей ПК. Одна из главных задач – повышение производительности обучения нейронных сетей. Изучив технологии распределенной реализации нейронных сетей, были выдвинуты основные требования для программной платформы: высокая скорость обработки данных; многопоточность; объектно-ориентированный дизайн; модульность программного пакета; мультиплатформенность; высокая стабильность.

Архитектура разработанной системы, предназначенной для реализации нейронных сетей, представлена на рисунке 3.

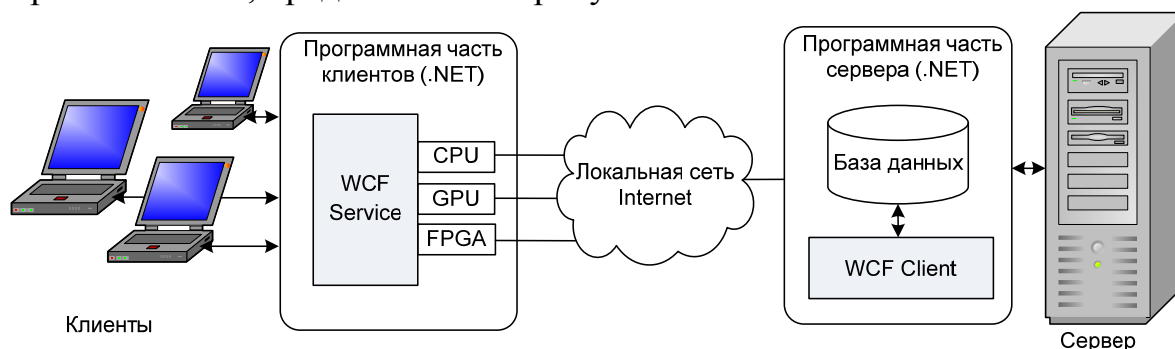


Рис. 3. Архитектура гетерогенной системы для распределенных вычислений

Решаемая вычислительная задача состоит из клиентской и серверной части. Предоставляемые клиентами ресурсы, на которые ложится основная нагрузка при вычислении, представлены в качестве WCF-сервиса [3 с. 23]. Вычислительными блоками могут быть CPU, GPU или FPGA.

Достоинствами описанной в данной статье системы по сравнению с существующими аналогами: объединение в единую систему вычислительных узлов различной архитектуры (CPU, GPU и FPGA); простота развертывания системы; возможность коммуникации на основе различных протоколов, в том числе и с шифрованием; возможность динамического добавления и отключения как клиентов; разработка вычислительных задач на современных языках программирования, таких как C#, VB.NET, IronPython и др[5].

Вывод

На сегодняшний день потребность в вычислительных мощностях растет, в том числе и для работы с нейронными сетями, которые становятся более сложными по своей структуре. Проект, предложенный в данной статье, по созданию программной платформы, позволяющей осуществлять распределенное обучение, является перспективным направлением. Доступность использования ЭВМ, пользователи которых готовы предоставить свободные ресурсы, и простота использования данной платформы позволяет сделать её доступной широкому кругу пользователей. Изучив подходы построения и параллельного обучения нейронных сетей, были сформулированы основные требования к разрабатываемой платформе: производительность, функциональность, надежность.

На данном этапе разработана гетерогенная система для распределенных вычислений, позволяющая создавать кластеры на основе ПК, задействовав их неиспользуемые ресурсы.

В дальнейшем предполагается реализация на базе разработанной системы для распределенных вычислений программного пакета для реализации сверточных нейронных сетей.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 14-07-00816).

Список литературы

1. Лемпицкий В., Бабенко А. Поиск похожих изображений при помощи нейросетей [Электронный ресурс] // YetanotherConference 2014. – 2014. Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/459> (дата обращения 5.09.2015).
2. Jeffrey Dean, Greg S. Corrado, RajatMonga, Kai Chen, Matthieu Devin, Quoc V. Le, Mark Z. Mao, Marc'AurelioRanzato, Andrew Senior, Paul Tucker, Ke Yang, Andrew Y. Ng Large Scale Distributed Deep Networks, – NIPS, 2012. – 11 p.
3. Cibraro P. Professional WCF 4: Windows Communication Foundation with .NET 4. – Microsoft Press, 2010. – 390 p.
4. Stephens R. Fundamentals of Microsoft .NET Programming. – Microsoft Press, 2011. – 266 p.
5. Ляшов М.В., Берёза А.Н., Алексеенко Ю.В. Гибридная реконфигурируемая система для высокопроизводительных вычислений // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6; Режим доступа: www.science-education.ru/120-15589 (дата обращения: 7.09.2015).

ПРИНЦИПЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ОБУЧЕНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ ПРИ ПРАКТИЧЕСКОМ ИЗУЧЕНИИ ГИДРАВЛИКИ

Артемьева Т.В.

доцент кафедры гидравлики,
Московского автомобильно-дорожного государственного технического
университета (МАДИ), Россия, г. Москва

Румянцева А.Н.

профессор кафедры гидравлики, к.т.н., доцент,
Московского автомобильно-дорожного государственного технического
университета (МАДИ), Россия, г. Москва

В статье рассматриваются примеры метода обучения и тестирования с использованием компьютера по дисциплинам гидравлического цикла.

Ключевые слова: гидравлика, обучение, тестирование, примеры.

Для большинства дисциплин, читаемых на кафедре гидравлики МАДИ, особенно по программам прикладного бакалавриата, время, отведенное на практические занятия, существенно сокращено. Поэтому возникла необходимость разработать метод, позволяющий студентам понимать и лучше усваивать трудные темы дисциплин гидравлического цикла.

Суть метода заключается в том, что для ряда тем разработано несколько примеров, в которых поэтапно разбирается та или иная практическая зада-

ча. Этот материал оформлен как в бумажном виде, так и в электронном виде. С этими примерами студент может работать в компьютерном классе самостоятельно или под руководством преподавателя по расписанию занятий или во внеурочное время.

В качестве иллюстрации вышеизложенного приведем пример по одной из основных тем гидродинамики: «Построение энергетических характеристик потока без детального вычисления всех величин, определяющих положение напорной и пьезометрической линий для идеальной жидкости при истечении в атмосферу».

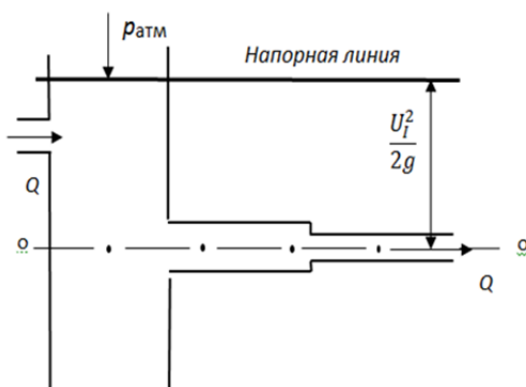
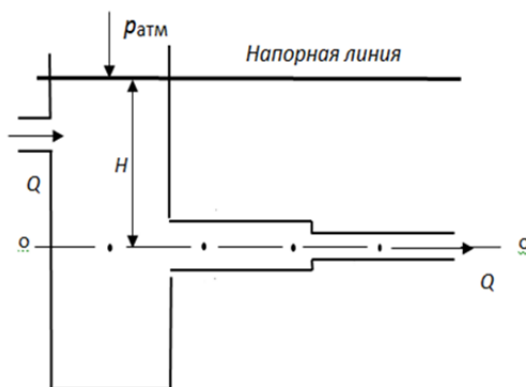
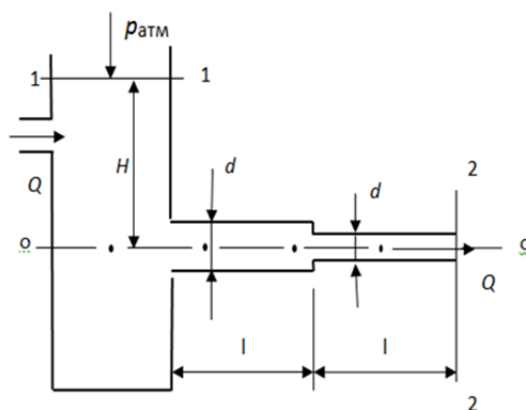
1. Выбираем расчетные сечения 1-1 и 2-2, так как в этих сечениях известны давления. Скорость в сечении 1-1 может быть принята равной нулю.

2. Выбираем плоскость сравнения 0-0, так как z в расчетном сечении 2-2 равно нулю.

3. Из выбранных расчетных сечений находим сечение с известным гидродинамическим напором. Это сечение 1-1, для которого $H_{d1} = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} = H$, так как $z_1 = H$, $p_{изб} = 0$; скоростным напором $\frac{U_1^2}{2g}$ пренебрегаем, поскольку $U_1 = \frac{Q}{S_1} \rightarrow 0$ (площадь S_1 – велика, расход постоянный).

4. Учитывая, что $H_d = const$, проводим на расстоянии H вверх от плоскости сравнения горизонтальную линию, которая и будет напорной линией.

5. Начинаем строить пьезометрическую линию для сечения 2-2, в котором известен пьезометрический напор H_{p2} : $H_{p2} = z_2 + \frac{p_2^{изб}}{\rho g} = 0$, так как $z_2 = 0$; $p_2^{изб} = 0$. Следовательно, точка, соответствующая сечению 2-2, совпадает с центром тяжести этого сечения. Получаем на рисунке масштаб скоростных напоров.

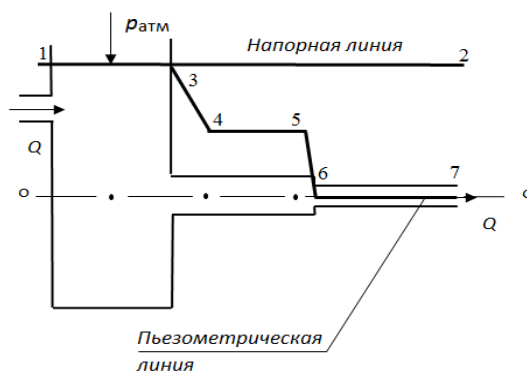
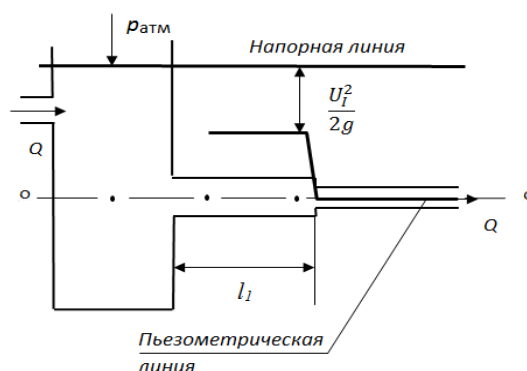
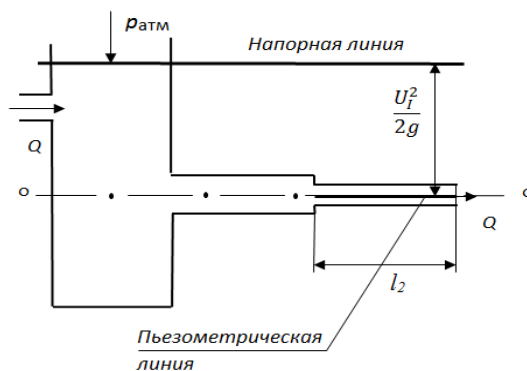


6. Строим пьезометрическую линию на участке l_2 . Скоростной напор $\frac{U_2^2}{2g}$ не меняется по длине участка, так как диаметр трубы постоянный: $U_2 = \frac{Q}{s_2} = \frac{4Q}{\pi d_2^2}$.

7. Строим пьезометрическую линию на участке l_1 , откладывая вниз от напорной линии скоростной напор $\frac{U_1^2}{2g} < \frac{U_2^2}{2g}$. Так как $d_1 > d_2$; $U_1 < U_2$. Скоростной напор $\frac{U_1^2}{2g}$ постоянный на участке l_1 . Пьезометрическая линия параллельна напорной.

8. Строим пьезометрическую линию для сечения I-I. В этом сечении пьезометрическая линия сольется с напорной, так как расстояние между ними – скоростной напор – пренебрежимо мало.

9. Получили напорную линию 1-3-2 и пьезометрическую 1-3-4-5-6-7.

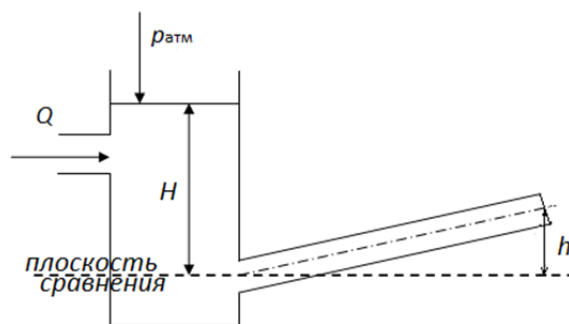


Метод компьютерного тестирования внедрен в учебный процесс для организации ритмичной работы студентов в течение семестра. Тестирование теоретических знаний проводится после выполнения и оформления лабораторных работ. Для каждой лабораторной работы разработаны электронные контрольные карточки, в каждой из которых по три или пять вопросов. К каждому вопросу предлагаются три ответа, один из которых верный. Контрольная карточка составлена таким образом, чтобы студент в среднем затрачивал на ответ не более 15 минут. Тестирование проводится одновременно для всей учебной группы, что позволяет выделить аудиторное время для дополнительных консультаций.

В качестве примера приведем контрольную карточку по теме «Уравнение Бернулли для идеальной (невязкой) жидкости».

Контрольная карточка № 1

1. Как изменится по течению гидродинамический напор в наклонной трубе постоянного поперечного сечения?



Ответы:

- a) Увеличивается
- b) Уменьшается
- c) Не меняется

2. Как изменяется кинетическая энергия вдоль потока? (см. рис.)

Ответы:

- a) Увеличивается
- b) Уменьшается
- c) Не меняется

3. Может ли энергия положения перейти в энергию давления?

Ответы:

- a) Да, может
- b) Нет, не может

4. Как изменится вдоль потока потенциальная энергия $z + \frac{p}{\rho g}$ (см. рис)?

Ответы:

- a) Увеличивается
- b) Уменьшается
- c) Не меняется

5. Из какого вида в какой происходит переход энергии вдоль потока? (см. рис.)

Ответы:

- a) Энергия из потенциальной переходит в кинетическую
- b) Энергия давления переходит в энергию положения, кинетическая энергия не меняется
- c) Энергия кинетическая переходит в потенциальную

Методы компьютерного обучения и тестирования позволяют студентам лучше усвоить теоретический материал для дальнейшего практического использования, сократить время обучения и контроля знаний студентов.

Список литературы

1. Гидравлика и гидропневмопривод: учебник для студентов высш. образования / [Т. В. Артемьева, Т. М. Лысенко, А. Н. Румянцева, С. П. Стесин]; под ред. С. П. Стесина. -5-е изд., перераб. – М.: Издательский центр «Академия», 2014. -352с.- (Сер.Бакалавриат)

2. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы в примерах решения задач: учебное пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / [Т. В. Артемьева, Т. М. Лысенко, А. Н. Румянцева и др.]; под ред. С. П. Стесина-М.: Издательский центр «Академия», 2014. -352с.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РУБЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПТИЦЫ ПОВЫШЕННОЙ ПИЩЕВОЙ ЦЕННОСТИ

Большакова Л.С.

доцент кафедры Технологии, организации и гигиены питания,
канд. биол. наук, доцент,
Орловский государственный институт экономики и торговли, Россия, г. Орел

Ладнова О.Л.

доцент кафедры Технологии, организации и гигиены питания,
канд. тех. наук, доцент,
Орловский государственный институт экономики и торговли, Россия, г. Орел

Меркулова Е.Г.

доцент кафедры Технологии, организации и гигиены питания,
канд. биол. наук, доцент,
Орловский государственный институт экономики и торговли, Россия, г. Орел

В работе представлены результаты исследования качества рубленых изделий из мяса птицы повышенной пищевой и биологической ценности. Изучена возможность замены хлеба на творог с целью оптимизации биологической ценности, а также внесения в котлетную массу молочного йодированного белка «Биойод» и высушенных слоевищ ламинарии с целью обогащения готовых изделий йодом.

Ключевые слова: рубленая масса из мяса птицы, творог, молочный йодированный белок «Биойод», высушенные слоевища ламинарии, функционально-технологические свойства, пищевая ценность.

Питание – один из важнейших факторов, обеспечивающих здоровье человека. От качества питания в целом и отдельных его компонентов в частности напрямую зависит состояние здоровья человека. Мясо птицы и творог относятся к продуктам, обладающим высокой пищевой и биологической ценностью. Мясо курицы по содержанию незаменимых аминокислот, холестерина, а также комплекса липотропных веществ аналогично говядине, оно является самым доступным источником белка в рационе человека. Творог отличается большим содержанием метионина (около 0,5 г/100 г), препятствует отложению жира в печени и способствует выведению холестерина, также содержит кальций. Ламинария имеет богатый минеральный состав, содержит йод в виде иодидов и иодорганических соединений [2].

Одним из перспективных источников йода является функциональная добавка «Биойод», которую получают путем ферментативного йодирования аминокислотных остатков сывороточных белков коровьего молока. Благода-

ря тому, что в составе «Биойода» йод ковалентно связан с белками, добавка обладает устойчивостью к свету и нагреванию и высокой стабильностью при длительном хранении [1].

Цель работы – разработка рубленых изделий из мяса птицы повышенной пищевой и биологической ценности.

За основу была взята рецептура котлет и биточков рубленых из мяса птицы № 461 [3]. Опытные образцы готовили с добавлением творога с заменой 100% хлеба (образец 1) и 50% хлеба (образец 2). При приготовлении образцов 3 и 4 50% хлеба заменяли творогом и дополнительно вводили «Биойод» (образец 3) и измельченные высушенные слоевища ламинарии (образец 4) из расчета 75 мкг йода на 100 г готового изделия.

Важными технологическими свойствами изделий из рубленой массы являются массовая доля влаги, водосвязывающая (ВСС), водоудерживающая (ВУС) и жиросвязывающая (ЖУС) способности, которые определяли по стандартным методикам. Анализ полученных данных показал, что значения массовой доли влаги, ВУС и ВСС опытных образцов не отличались от значений контрольного образца, при этом ЖУС у образцов с полной заменой хлеба творогом снижалась на 24% и с 50% заменой хлеба творогом – на 13,5%.

Показатели структурно-механических свойств рубленой массы (пластичность, предельное напряжение сдвига и адгезионную способность) изучали на приборе «Структурометр-1» по методикам, прилагаемым к прибору. Результаты влияния творога на структурно-механические свойства рубленой котлетной массы из мяса птицы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Влияние творога на структурно-механические свойства рубленой массы из мяса птицы

Опытные образцы	Пластичность Па	Предельное напряжение сдвига мм	Адгезионная способность, мм
Контроль	12,8	867	760
Образец 1	11,3	791	791
Образец 2	12,0	820	770

Анализ полученных данных показал, что полная замена хлеба в рубленой котлетной массе из мяса птицы приводит к образованию более плотной структуры, при этом значения образцов с частичной заменой находятся на одном уровне со значениями контрольного образца.

Сформованные полуфабрикаты подвергали тепловой обработке в пароконвектомате. Органолептическая оценка готовых изделий показала, что образцы с частичной заменой хлеба (2, 3, 4) имели более пластичную консистенцию, чем образец 1. Все образцы с творогом отличались более светлым цветом по сравнению с контролем. В образце 4 на срезе наблюдались включения ламинарии. Добавление творога способствовало приданию готовым изделиям приятного молочного вкуса. Добавление «Биойода» не оказывало влияния на органолептические показатели готовых изделий.

В таблице 2 приведены результаты определения пищевой ценности исследуемых образцов.

Пищевая ценность рубленых изделий из мяса птицы

Наименование	Содержание пищевых веществ в 100г				
	контроль	образец 1	образец 2	образец 3	образец 4
Белки, г	14,85	17,82	16,82	16,21	16,34
Жиры, г	13,89	17,55	14,55	14,23	14,60
Углеводы, г	30,08	8,81	18,81	18,2	19,0
Кальций, мг	134,9	310,8	170,8	168,2	171,0
Йод, мкг	5,7	7,1	6,2	72,0	41,0
Энергетическая ценность, ккал	211,1	230,2	241,0	239,3	241,8

Содержание белка, жира, углеводов определяли по стандартным методикам. Содержание кальция – на флуориметрическом спектрометре с индукционно связанной плазмой марки «iCap 6300» по методике, прилагаемой к прибору, содержание йода – вольтамперометрическим методом на приборе TA-Lab.

Анализ полученных данных показал, что количество белка и жира в образцах с творогом увеличилось в среднем на 15% и 14 % соответственно по сравнению с контролем. Отмечено снижение содержания углеводов на 73% для образца 1 и 38% для образцов 2,3 и 4. Содержание кальция в образцах с творогом были выше значений контрольного образца. Отмечено значительное увеличение содержания йода в готовых изделиях при добавлении «Биойода» и высушенных слоевищ ламинарии.

Таким образом, полученные в результате исследований данные подтверждают целесообразность частичной замены хлеба на творог в изделиях из рубленой котлетной массы из мяса птицы. Это приводит к улучшению структурно-механических свойств, не оказывает влияние на технологические свойства фарша. Кроме того, введение новых рецептурных компонентов повышает количество белка, кальция, йода, уменьшает количество углеводов.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

1. Большакова, Л.С. Оценка эффективности использования молочного йодированного белка для улучшения обеспеченности йодом девушек [Текст] / Л.С. Большакова, А.Б. Лисицын, И.М. Чернуха и др. // Вопросы питания.- 2014. – Т. 83, № 3. – С. 69-73.
2. Корякина, С.Я. Изучение технологических свойств продуктов, получаемых из морских водорослей [Текст] / С.Я. Корякина, О.Л. Ладнова, Е.Н. Холодова // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов 2013. – № 5 (22). – С.25-30
3. Сборник рецептов блюд и кулинарных изделий для предприятий общественного питания [Текст] / под ред. Ф.Л. Марчука. – М.: Изд-во «Хлебпродинформ», 1996. – 615 с.

О ПРАКТИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРТИЗЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Версилов С.О.

эксперт, д-р технических наук, профессор,
Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-консультационный
центр «Мысль» Новочеркасского государственного технического университета,
Россия, г. Новочеркасск

Короткий А.А.

генеральный директор, д-р технических наук, профессор,
Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-консультационный
центр «Мысль» Новочеркасского государственного технического университета,
Россия, г. Новочеркасск

Панфилов А.В.

директор по сертификационной деятельности, канд. социолог. наук,
Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-консультационный
центр «Мысль» Новочеркасского государственного технического университета,
Россия, г. Новочеркасск

Недлин Л.М.

инженер, эксперт,
Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-технический центр»,
Россия, г. Кропоткин

В статье рассмотрены вопросы применения нормативов, определяющих безопасные условия или безопасную стратегию производства в горнорудной промышленности при проведении экспертизы промышленной безопасности.

Ключевые слова: дробильно-сортировочные комплексы, экспертиза, нормативы, комплексное обследование.

Горное производство было и остается одним из самых опасных производств. Многие его процессы связаны с риском возникновения аварий или несчастных случаев. Для повышения безопасности труда работающих людей, деятельность горных предприятий начиная от стадии подготовки к выпуску продукции (проектирование) до консервации отдельных подразделений и ликвидации всего предприятия регламентируется различными нормативными документами, которые учитывают предыдущий опыт работы отечественных и зарубежных рудников, карьеров, шахт, научные разработки в области промышленной безопасности и т.д. Начиная с 1997 года с выходом Федерального закона о промышленной безопасности опасных производственных объектов, проводится экспертиза промышленных объектов горных производств,

представляющих наибольшую потенциальную опасность возникновения аварии или несчастного случая.

Однако опыт работы горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий показывает, что в большинстве случаев для применения нормативов, определяющих безопасные условия или безопасную стратегию производства, возникает необходимость проведения дополнительных исследований или определенного вида работ, позволяющих увязать нормативы с конкретными условиями деятельности предприятия. Например, при определении области применения системы разработки с закладкой выработанного пространства на Урупском руднике (Карачаево-Черкесия), столкнулись с проблемой использования в расчетах нормативных коэффициентов, определяющих отношение глубины ведения горных работ к выемочной мощности. Теоретически, при коэффициенте 50, можно было бы при выемочной мощности 3 м, отказаться от дорогостоящих вариантов разработки с закладкой выработанного пространства начиная с глубины 150 м ($3 \text{ м} \times 50 = 150 \text{ м}$). Однако, на практике мощность рудного тела в пределах одной выемочной единицы изменялась от 2-х до 6 метров. Поэтому возникла необходимость в проведении дополнительных исследований, определяющих устойчивость очистных камер и выдачи отдельных рекомендаций по применению вышеуказанного коэффициента в условиях эксплуатации Урупского месторождения.

Аналогичные ситуации могут возникать при экспертной оценке работы других горно-рудных предприятий. Например, в течение длительного периода времени нами проводилась экспертиза промышленной безопасности дробильно-сортировочных заводах и фабриках, условия работы оборудования, на которых имеют свои особенности (условия эксплуатации дробилки, в отличие от экскаватора или бурового станка во многом зависят от технического состояния других устройств технологической линии по переработке минерального сырья, и даже от физико-механических свойств данного сырья).

Для снижения аварийности и повышения безопасности работы дробильно-сортировочных заводов и фабрик нами была разработана программа комплексного обследования предприятий. В программе учтены все требования положения о проведении экспертизы промышленной безопасности в горнорудной промышленности в отношении производств и объектов при дроблении, сортировке, обогащении полезных ископаемых, которые необходимо учесть в проектной документации.

Программа была одобрена сотрудниками Ниже-Волжского округа и Северо-Кавказского управления Госгортехнадзора России. Проведение по вышеуказанной программе экспертизы промышленной безопасности дробильно-сортировочных комплексов Краснодарского края и Волгоградской области позволило выявить «слабые» места в общем комплексе ДСК и разработать дополнительные мероприятия, обеспечивающие повышение безопасности и эффективности труда горнорабочих.

Однако, на сегодняшний день, дробильно-сортировочные комплексы по переработке рудного сырья и сырья нерудных строительных материалов,

на основании ведомственных писем Ростехнадзора, исключаются из реестра опасных производственных объектов.

Согласно позиции разработчиков вышеуказанных документов, содержащийся в п.п. 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 «Требований к ведению государственного реестра опасных производственных объектов в части присвоения наименований опасным производственным объектам для целей регистрации в государственном реестре опасных производственных объектов» (утверждены приказом Ростехнадзора от 07.04.2011 № 168, в редакции приказов от 16.11.2011 № 641 и от 17.10.2012 № 586) перечень объектов, включающий площадку (участок, цех) дробильно-сортировочную, идентифицируемую как опасный производственный объект по признаку ведения работ по обогащению, противоречит п. 5 приложения 1 и п. 8 приложения 2 Федерального закона "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" от 21.07.1997 № 116-ФЗ. При этом, процессы дробления и сортировки не являются обогащением исходно добытого минерального сырья, а служат лишь вспомогательными (подготовительными) операциями последующего технологического цикла собственно обогатительного процесса, итогом которого является концентрация и выделение одного или нескольких полезных компонентов. При переработке путем дробления и сортировки песчано-гравийных смесей, песчаников, известняков и других общераспространенных полезных ископаемых (письмо №07-00-05/1048 от 24.09.2014 «О разъяснении положений нормативных документов»), не происходит процесса изменения химического и минерального состава исходного материала, поэтому объекты переработки данных видов минерального сырья (дробильно-сортировочные фабрики, мобильные дробильно-сортировочные комплексы) не могут идентифицироваться и рассматриваться как опасные производственные объекты.

Не вдаваясь в полемику о терминологии обогащения, на основании опыта эксплуатации дробильно-сортировочных комплексов, можно констатировать, что наибольшее количество несчастных случаев происходит **именно на стадиях дробления и сортировки**. При этом технологии, «собственно обогатительного процесса», могут быть значительно проще и следовательно, безопаснее, чем технологии «вспомогательных (подготовительных) операций, т.е. технологии переработки твердых полезных ископаемых. Например, суть технологии некоторых обогатительных фабрик по обогащению кварцевых песков сводится только к классификации и грохочению. А, допустим, технология дробильно-сортировочных комплексов по переработке песчаников включает в себя несколько стадий дробления, грохочения, иногда классификация и достаточно сложные схемы транспортировки сырья в процессе его переработки.

Анализ тяжелых несчастных случаев показывает, что основными источниками опасности служат движущие части механизмов заблокированного в определенной последовательности дробильно-сортировочного оборудования, наличие многочисленных лестниц, монтажных проемов, прямых, зумпфов, колодцев, канав, расположенных в зданиях и сооружениях.

Очевидно, что для уменьшения количества несчастных случаев необходима серьезная экспертиза требований промышленной безопасности работы ДСК как на стадии проектирования, так и в случаях внесения изменений в конструкцию технических устройств и металлоконструкций их обвязки.

Особенно показательным с позиции необходимости неукоснительного соблюдения требований правил промышленной безопасности является несчастный случай со смертельным исходом на дробильно-сортировочном комплексе Богатовского карьера (дробильно-сортировочном комплексе ООО «ДСК»).

ООО «ДСК» ведёт переработку известняков Богатовского месторождения. Технологически процесс переработки включает в себя дробление известняка посредством щековых (СМ-16) и конусных (КИД-600, КИД-1200) дробилок, и его рассев по фракциям на инерционных грохотах ГИЛ-52. Транспортирование материала между агрегатами дробления и сортировки и в склады готовой продукции производится ленточными конвейерами. Процесс переработки начинается от приемного бункера отделения первичного дробления, откуда материала пластинчатым питателем подается в щековую дробилку СМ-16.

Ленточный конвейер КЛ-1 осуществляет доставку дробленого продукта дробилки СМ-16 и мелкой фракции из-под бункеров щековой дробилки и питателя ТК-15. Общая длина конвейера составляет 62 метра.

Часть конвейера с натяжной головкой находится в подземной части конвейерной галереи (рисунок). Часть конвейера с приводной головкой – в поверхностной части конвейерной галереи. Подземная часть галереи, где установлена натяжная головка конвейера КЛ-1, имеет расширение в виде небольшого помещения прямоугольной формы с размерами в плане 6100×6750мм, предназначенного для обслуживания натяжной головки конвейера. На расстоянии 7800 мм от помещения для обслуживания натяжной головки, в галерее, с обеих сторон от конвейера (со стороны основного и монтажного проходов) установлены калитки, исключаяющие свободный доступ персонала к натяжной головке. Непосредственный вход с поверхности в помещение для обслуживания натяжной головки конвейера также имеет ограждение с калиткой.

Автоматизация ДСК предусмотрена с учетом электрических схем управления агрегатами СМ-16, КСД 1200, КСД 600 и ГИЛ 52, в которых выполнены цепи управления и установлены магнитные пускатели этих агрегатов.

Управление агрегатами осуществляется с комплектно поставляемого поста управления ЗЦУ, установленного в помещении поста управления. Электроаппаратура агрегатов находится в шкафах, установленных рядом с агрегатами.

В ручном режиме управление механизмами осуществляется от кнопочных постов установленных вблизи привода механизма.

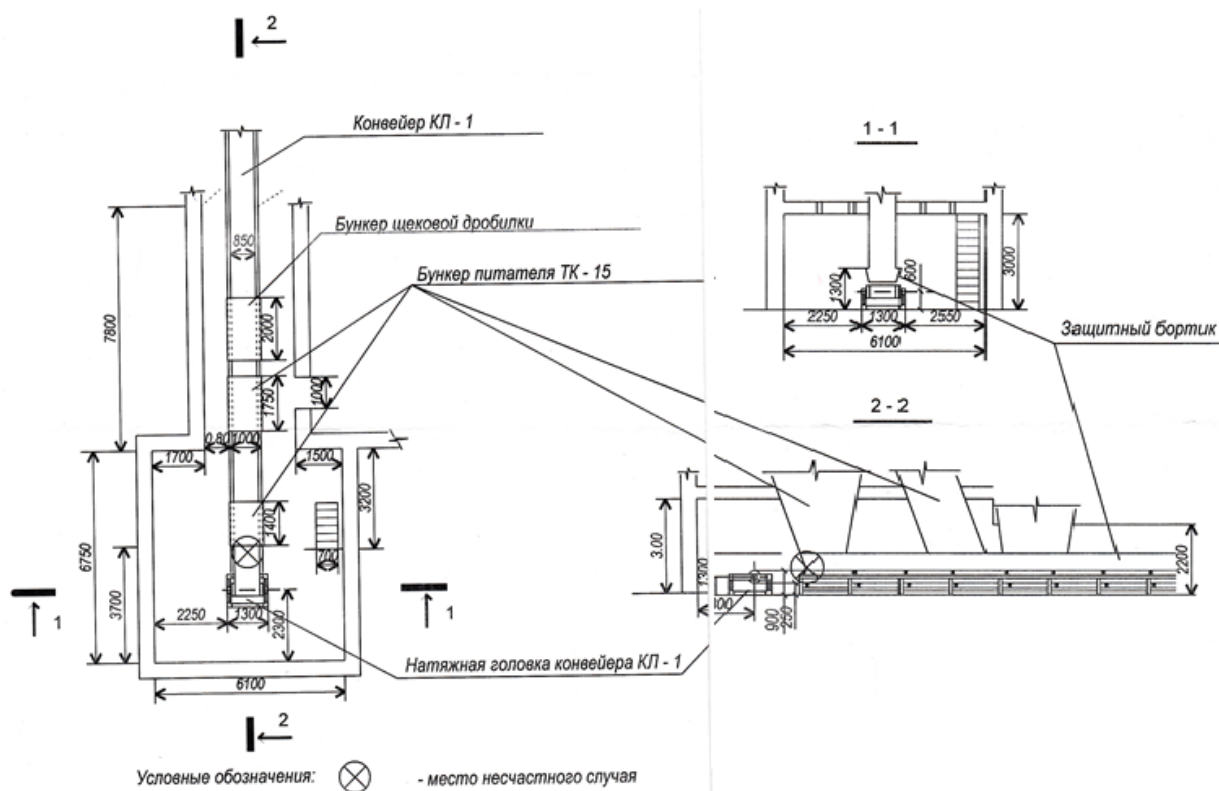


Рис. Фрагмент размещения оборудования технологического оборудования ООО «ДСК» в месте произошедшего несчастного случая со смертельным исходом

Рабочая остановка конвейеров осуществляется от кнопки «СТОП» на пультах агрегатов. При этом конвейер останавливается, а остальные механизмы агрегатов дорабатывают находящийся на них материал.

Экстренная остановка всех механизмов по блокировке осуществляется от кнопок «СТОП» на пультах управления агрегатами.

Как видно из рисунке, натяжная головка конвейера КЛ-1, находится в подземной части галереи, вход в которую оборудован калиткой со стороны лестничного отделения здания цеха первичного дробления, на которую установлен концевой выключатель (далее по тексту ВК), включенный в схему пуска двигателя КЛ-1 и калиткой со стороны входа в подземную часть галереи, на которую также установлен ВК, включенный в схему пуска двигателя КЛ-1. При открытии калитки, ВК срабатывает, разрывая электросхему, тем самым отключая конвейер КЛ-1 и блокируется механически, исключая повторное включение КЛ-1 до принудительного снятия механической блокировки калитки, как дистанционно, с поста управления ЗЩУ, так и от кнопочных постов установленных вблизи привода механизма. Вход на площадку, где расположен головной барабан, так же огражден двумя калитками и установленными на них ВК, включенных в схему пуска КЛ-1 последовательно, что исключает свободный доступ к барабану конвейера, без отключения ленточного конвейера КЛ-1.

Таким образом, существующие системы пуска и блокировки двигателя ленточного конвейера КЛ-1 исключали работу двигателя при открытой калитке ограждения помещения для обслуживания натяжной головки

конвейера, и, принципиально технически, существующие системы пуска и блокировки двигателя ленточного конвейера КЛ-1, были выполнены согласно п. 58 и п.60 [1, с. 187]. Однако, при сознательном нарушении персоналом ДСК требований правил безопасности, существующая конструкция систем пуска и блокировки не позволила **полностью исключить** доступ к движущимся частям конвейера, так как по сути, калитка входа в помещение для обслуживания натяжной головки конвейера не является непосредственным ограждением натяжной головки и части става конвейера около натяжной головки и до выхода из подземной галереи. Таким образом, существующие системы пуска и блокировки двигателя ленточного конвейера КЛ-1 оказались выполнены не в полном соответствии с требованиями п. 58 и п.60 [1, с. 187], что в конечном итоге и привело к смертельной травме работника предприятия.

На основании вышеизложенного очевидно, что фактически, дробильно-сортировочные комплексы являются достаточно технически сложными и опасными промышленными объектами, требующими серьезного подхода в вопросах безопасности.

Список литературы

1. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 декабря 2013 г. № 599, опубл.: бюл. нормативных актов федеральных органов исполнительной власти, № 38. – 187 с.

ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА – ИНДУКТОРНО-КОНДЕНСАТОРНЫЙ МОДУЛЬ

Горбунов А.С.

инженер кафедры электромеханики,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования Уфимский государственный авиа-
ционный технический университет, Россия, г. Уфа

В статье производится исследование ряда электротехнологических установок с индукционным нагревом с использованием согласующих высокочастотных трансформаторов с магнитопроводами из аморфных или нанокристаллических сплавов. Приведена компьютерная имитационная модель установки. Показана осциллограмма мгновенного значения тока нагрузки одного из преобразователей.

Ключевые слова: индукционный нагрев, имитационная модель, источник питания, выпрямитель, трансформатор, индуктор, компенсирующий конденсатор.

Компьютерное имитационное моделирование в пакете *Matlab* в настоящее время является одним из наиболее целесообразных способов исследования действующих и новых разрабатываемых индукционных установок

(ИУ). Для случая моделирования электромагнитных процессов в системе источник питания повышенной частоты – индукторно-конденсаторный модуль эффективно применять библиотеки *Simulink* и *SimPowerSystems* из пакета *Matlab* [4].

В [1] автором был разработан ряд источников питания для ИУ на базе транзисторных инверторов с последовательной компенсацией и новыми согласующими высокочастотными трансформаторами с магнитопроводами из аморфных или нанокристаллических сплавов. Схема одного из созданных источников, на основе симметричного мостового инвертора показана на рис. 1.

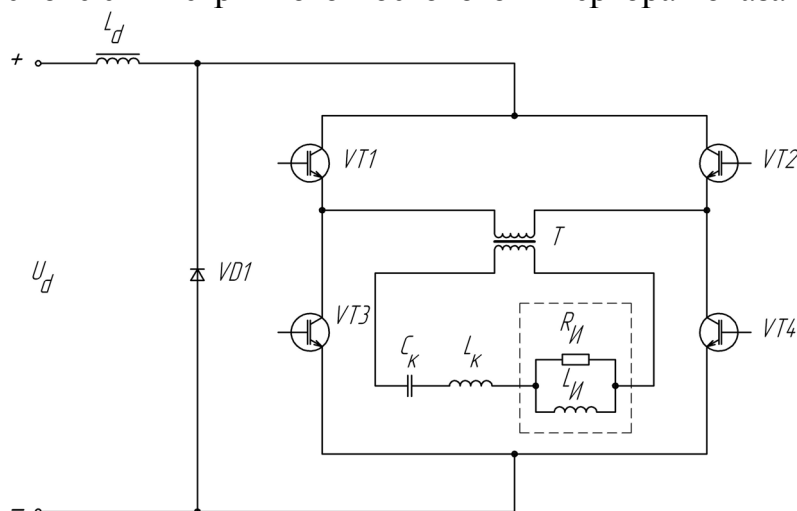


Рис. 1. Симметричный мостовой инвертор с последовательной компенсацией и предлагаемым согласующим трансформатором

В пакете *Matlab*, с использованием блоков библиотек *Simulink* и *SimPowerSystems* были разработаны и защищены свидетельством о государственной регистрации программ для ЭВМ оригинальные компьютерные имитационные модели созданных источников питания для ИУ [3]. Одна из моделей, предназначенная для исследования разработанного источника (рис. 1) показана на рис. 2.

Кроме того, был создан ряд других оригинальных имитационных моделей источника питания с параллельной компенсацией, также защищенных свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ, например, [2]. Основные ее отличия от рассмотренной ранее состоят в том, что инвертор собран по несимметричной одноячейковой схеме, выпрямитель моделируется в виде блока *Thyristor Converter* с системой управления. Также в данной модели представлена трехфазная электрическая сеть в виде блока *3-Phase Source*. Индуктор и компенсирующий конденсатор соединены параллельно.

В приведенной на рис. 2 модели выпрямитель представлен в виде блока источника постоянного напряжения *DC Voltage Source*. Предлагаемый согласующий высокочастотный трансформатор с магнитопроводом из аморфных или нанокристаллических сплавов моделируется блоком *Saturable Transformer*. При этом в нем учтены реальные характеристики намагничивания новых

магнитных материалов. *IGBT*-транзисторы и диод соответственно показаны блоками *VT5–VT8* и *VD5*. Индуктор моделируется в виде параллельно соединенных блоков резистора R_{n2} и индуктивности L_{n2} . Компенсирующий конденсатор моделируется блоком C_{n2} . Данная модель позволяет с помощью блоков измерителей тока *Current Measurement* и напряжения *Voltage Measurement*, блоков измерителей действующих значений *RMS* и блоков осциллографов *Scope* определять значения мгновенных и интегральных величин.

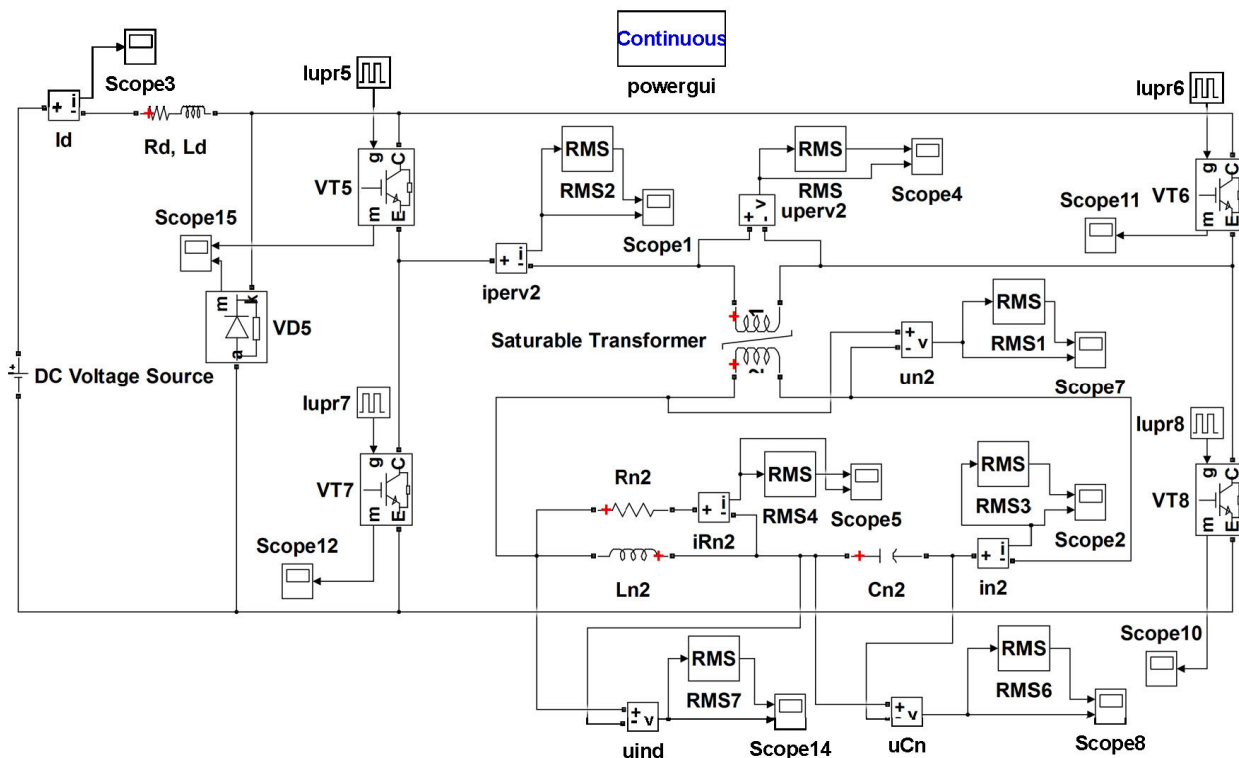


Рис. 2. Имитационная модель симметричного мостового инвертора с последовательной компенсацией и предлагаемым согласующим трансформатором

Кроме того, был создан ряд других оригинальных имитационных моделей источника питания с параллельной компенсацией, также защищенных свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ, например, [2]. Основные ее отличия от рассмотренной ранее состоят в том, что инвертор собран по несимметричной одноячейковой схеме, выпрямитель моделируется в виде блока *Thyristor Converter* с системой управления. Также в данной модели представлена трехфазная электрическая сеть в виде блока *3-Phase Source*. Индуктор и компенсирующий конденсатор соединены параллельно.

В приведенной на рис. 2 модели выпрямитель представлен в виде блока источника постоянного напряжения *DC Voltage Source*. Предлагаемый согласующий высокочастотный трансформатор с магнитопроводом из аморфных или нанокристаллических сплавов моделируется блоком *Saturable Transformer*. При этом в нем учтены реальные характеристики намагничивания новых магнитных материалов. *IGBT*-транзисторы и диод соответственно показаны блоками *VT5–VT8* и *VD5*. Индуктор моделируется в виде параллельно соеди-

ненных блоков резистора R_{n2} и индуктивности L_{n2} . Компенсирующий конденсатор моделируется блоком C_{n2} . Данная модель позволяет с помощью блоков измерителей тока *Current Measurement* и напряжения *Voltage Measurement*, блоков измерителей действующих значений *RMS* и блоков осциллографов *Scope* определять значения мгновенных и интегральных величин.

На рис. 3 показан один из результатов моделирования разработанного источника питания, представленного на рис. 1, в виде осциллограммы мгновенного значения тока нагрузки.

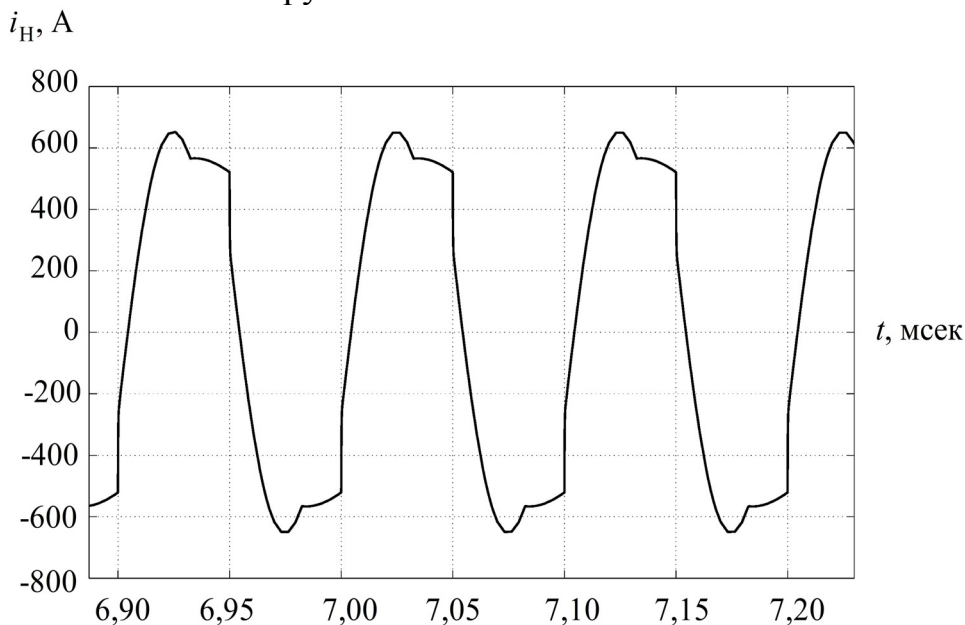


Рис. 3. Осциллограмма тока нагрузки симметричного мостового инвертора с последовательной компенсацией и предлагаемым согласующим трансформатором

Исследование в пакете *Matlab* можно производить как на основе разработанных математических моделей, путем использования блоков, производящих различные математические операции, так и на основе готовых блоков, моделирующих электрические машины, аппараты, полупроводниковую преобразовательную технику и т.д. как по отдельности, так и с возможностью их совместной работы с другими электротехническими устройствами [4].

Таким образом, с помощью компьютерного моделирования в пакете *Matlab* могут быть произведен анализ электромагнитных процессов и определение основных параметров ИУ, что позволяет научному или инженерно-техническому персоналу исследовать ИУ с высокой точностью и при учете многих действующих факторов, при уменьшенных трудовых и временных затратах, по сравнению с использованием аналитических методов, связанных с решением системы нелинейных дифференциальных уравнений, причем некоторые из которых крайне трудно решить аналитически.

Список литературы

1. Патент РФ 131538, МПК H02M7/44. Инвертор (варианты) / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов, Д.В. Гусаков; заявл. 18.02.2013; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23. – 2 с.
2. Рогинская, Л.Э. Программа для исследования однофазного несимметричного инвертора с повышенным выходным напряжением / Л.Э. Рогинская, Р.Р. Исмаилов,

А.С. Горбунов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. № 2011611332, от 10.02.2011.

3. Рогинская, Л.Э. Программа для моделирования полупроводниковых преобразователей частоты с взаимоиндуктивными модулями / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов, Д.В. Гусаков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2013618410, от 09.09.2013.

4. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

ПОВРЕЖДЕНИЕ БОКОВЫХ ЭКРАНОВ КОТЛА ТПП-210 В НИЖНЕЙ РАДИАЦИОННОЙ ЧАСТИ (НРЧ)

Кружилин Н.В.

эксперт объектов котлонадзора,

Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-консультационный центр «Мысль» Новочеркасского государственного технического университета,
Россия, г. Новочеркасск

Короткий А.А.

генеральный директор, д-р технических наук, профессор,

Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-консультационный центр «Мысль» Новочеркасского государственного технического университета,
Россия, г. Новочеркасск

Панфилова Э.А.

ст. преподаватель кафедры транспортных систем и логистики, канд. филос. наук,
Донской государственный технический университет,
Россия, г. Ростов-на-Дону

Панфилов А.В.

директор по сертификационной деятельности, канд. социолог. наук,

Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-консультационный центр «Мысль» Новочеркасского государственного технического университета,
Россия, г. Новочеркасск

Определены возможные причины повреждения металла труб экранов (НРЧ) котла ТПП-210 Новочеркасской ГРЭС. Предложен вариант изменения конструкции компоновки горелок, обеспечивающий возможность надежного охлаждения металла на разных нагрузках.

Ключевые слова: нижняя радиационная часть, температурный режим, сталь, вихревые горелки, прямоточные горелки, компоновка.

Опыт сжигания антрацитового штыба (АШ) на Новочеркасской ГРЭС показал, что в последнее время качество АШ ухудшилось, что в свою очередь привело к сложностям при его сжигании – снижению устойчивости горения. Одним из способов решения этой проблемы – это сжигание АШ сов-

местно с небольшим количеством более реакционного топлива – мазута или газа (или с «подсветкой» факела). Однако, с ухудшением качества АШ, доля газомазутного топлива на подсветку факела увеличилась. При сжигании различных видов сернистых топлив – уголь, мазут, газ в топках паровых котлов наблюдается высокотемпературная сероводородная (сульфидная) коррозия, которой поражаются трубы экранов в зоне активного горения [3, с. 264]. Причиной этого является взаимодействие металла труб экранов с сероводородом H_2S , который образуется в зоне активного горения топочной камеры при сжигании сернистого топлива с недостатком воздуха. Обязательным условием появления сероводорода в факеле является наличие восстановительной газовой среды, которая характеризуется высокой концентрацией продуктов неполного сгорания ($CO > 2\%$) и недостатком воздуха на горение. Это возможно либо при работе горелок с $\alpha_{гор} < 1$, либо при неравномерном распределении топлива и воздуха по горелкам, либо при затянутом смесеобразовании в факеле. Поэтому при компоновке горелок и организации аэродинамики топки следует стремиться к тому, чтобы в пристенных областях топки и в зоне активного горения топочные газы содержали избыточный воздух.

Решение этих проблем на Новочеркасской ГРЭС проходило в несколько этапов. Котлы ТПП-110, ТПП-210 и ТПП-210А предназначены для сжигания твёрдого топлива типа АШ, оборудованы полуоткрытой топкой с пережимом и жидким шлакоудалением [1, с. 69]. Топка оборудована ошипованными экранами, покрытыми футеровкой. Ниже пережима – в зоне активного горения было установлено по двенадцать вихревых горелок в два яруса мощностью по 35 МВт каждая. В пылеугольных котлах с встречным расположением вихревых горелок на фронтальной и задней стенах высокотемпературная коррозия наиболее интенсивно развивается на боковых экранах, а при наличии пережима (полуоткрытые топки) – и под пережимом, на его скатах [2, с. 269]. Коррозия наблюдается как на гладкотрубных, так и на ошипованных экранах. В последнем случае сероводород диффундирует через слой футеровки. Шипы укорачиваются, футеровка разрушается, и на этих участках интенсифицируется коррозия. При этом максимальная скорость коррозии боковых экранов нижней радиационной части (НРЧ) достигала 2,5 мм/год. Температура в ядре факела достигала 1650 °С. Концентрация оксидов азота (NO_x) в дымовых газах в сечении за конвективным пароперегревателем высокого давления (КПП в.д.) составила около 750-850 мг/м³. К.П.Д. котельного агрегата брутто ($\eta_{ка}^{бр}$) – на уровне 87,8%.

В дальнейшем, на котлах ТПП-210А было установлено по шесть вихревых горелок в один ярус, мощностью по 70 МВт каждая. Максимальная скорость коррозии боковых экранов нижней радиационной части (НРЧ) достигала 5,0 мм/год. При этом температура в ядре факела достигала до 1750 °С, что повысило устойчивость горения, улучшило условия выхода жидкого шлака, снизило потери с механическим недожогом. Однако концентрация оксидов азота (NO_x) в дымовых газах в сечении за КПП в.д. увеличилась до 950 мг/м³. $\eta_{ка}^{бр} = 87,8\%$.

Ряд котлов типа ТПП-210 ст. № 3"А", 4 "Б", по предложению ЦКТИ, были реконструированы с установкой шести плоскофакельных горелок ударного типа, мощностью также по 70 МВт каждая в один ярус. Эти горелки обладают существенным недостатком – довольно низкой температурой в ядре факела – 1570°C , что является основной причиной снижения устойчивости горения и требует усиленной подсветки факела мазутом. Однако, пониженная температура факела и подвод сбросного воздуха от пылесистем в верхнюю часть горелки способствуют снижению скорости сероводородной коррозии боковых экранов, что позволило снизить её в 2-2,5 раза. Концентрация оксидов азота (NO_x) в дымовых газах в сечении за КПП уменьшилась в среднем до 600 мг/м^3 , $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}} = 87,8\%$.

Таким образом, было предложено использовать достоинства как вихревых горелок, установив их по центру топки для сохранения устойчивости горения, так и плоскофакельных, с установкой их у боковых стен топки для создания окислительной среды, при которой сероводород отсутствует, и защиты их от коррозии. Такая комбинированная схема компоновки горелок была реализована на котле ст. № 4"Б" Новочеркасской ГРЭС. Средние плоскофакельные горелки на фронтальной и задней стенах топки были демонтированы, и заменены на вихревые такой же мощности. Крайние (у боковых экранов) горелки оставлены на котле прежними (плоскофакельными), также по 70 МВт.

Для изучения аэродинамики комбинированной схемы компоновки горелок была выполнена изотермическая модель нижней части топки котла ТПП-210 в масштабе 1:15. При изотермических продувках оси всех горелок располагались в одной, горизонтальной плоскости, расходы по горелкам выполнялись одинаковыми. Результаты продувок представлены на рисунке.

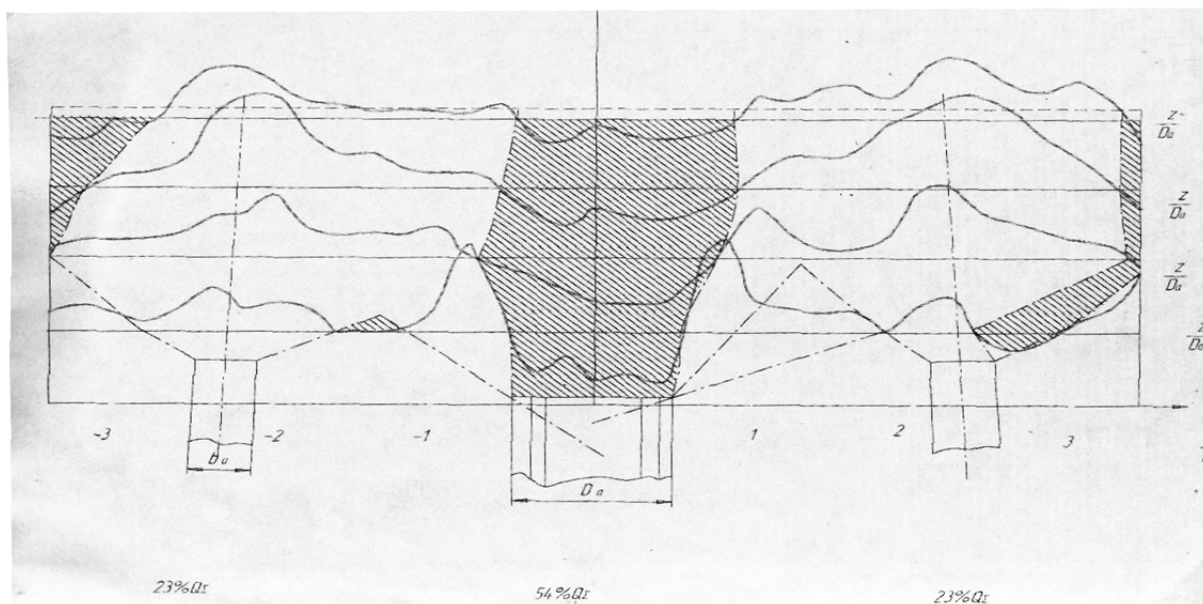


Рис. Поля аксиальных скоростей работы совмещённой компоновки горелок на изотермическом стенде

Области зон обратных токов заштрихованы. Крутка вихревой горелки – по часовой стрелке, при виде изнутри топки на горелку.

В результате проведённых изотермических продувок (см. рисунок) установлено, что структура аэродинамики центральной вихревой горелки сохраняется. Присутствует зона обратных токов, что способствует хорошему воспламенению и выгоранию топлива.

Часть внешней зоны факела вихревой горелки пересекается с факелом прямоточных горелок, что способствует более равномерному распределению топлива, а так же созданию благоприятных условий для создания окислительной среды в пристенных областях топки, на что указывают заштрихованные области в пристенных областях.

Список литературы

1. Исследование аэродинамики топки котла ТПП-210 с вихревыми и плоскофакельными горелками на изотермической модели / Н.В. Усиков, В.П. Каминский, А.Н. Безгрешнов, Н.В. Кружилин, Г.И. Калмыков, Л.Н. Синяпкин // Повышение надёжности и экономичности работы оборудования ТЭС: Сб. науч. Тр. / Новочерк. гос. техн. Ун-т. Новочеркасск; НГТУ, 1993. – С 69-78.
2. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов / Под ред. Э.Х. Вербовецкого и Н.Г. Жмерика. – Санкт-Петербург. 1996. – 269 с.
3. Основы практической теории горения / Под ред. В.В. Померанцева. – Л., 1973. – 264 с.

К ЧЕМУ ПРИВОДЯТ ОТСТУПЛЕНИЯ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ТОВАРНО-ТРАНСПОРТНЫХ ДОКУМЕНТОВ НА ГРУЗ, ПЕРЕВОЗИМЫЙ АВТОТРАНСПОРТОМ



Куксин В.В.

эксперт отдела экспертных работ и проектирования,
Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-
консультационный центр «Мысль» Новочеркасского
государственного технического университета,
Россия, г. Новочеркасск

Красюкова С.Н.

инженер, эксперт,
Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-технический центр»,
Россия, г. Кропоткин

Ватулин А.А.

инженер, эксперт,
Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-технический центр»,
Россия, г. Кропоткин

Недлин Л.М.

инженер, эксперт,
Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-технический центр»,
Россия, г. Кропоткин

В статье затрагивается тема ненадлежащего оформления сопроводительных документов на перевозимый в автотранспортных средствах груз и вытекающие из этого по-

следствия. Автор приводит сведения об инциденте с транспортным средством, принадлежащим Индивидуальному предпринимателю Максименко М.В., произошедшим в г. Пролетарске Ростовской области в марте 2015 г.

Ключевые слова: груз, опасный груз, опасное вещество, автотранспортное средство, перевозка грузов, класс опасности, аммиачная селитра, минеральные удобрения.

18.02.2015 г. автотранспортное средство КАМАЗ (далее автотранспортное средство) принадлежащее Индивидуальному предпринимателю Максименко М.В. (далее ИП Максименко М.В.) было загружено грузом – селитрой аммиачной серосодержащей. Водитель транспортного средства Зайков П.К. получил сопроводительные документы на перевозимый груз – аммиачную селитру серосодержащую, не проверил правильность их заполнения и выехал к грузополучателю.

Вещество (груз) – аммиачная селитра – это кристаллический белый порошок, широко применяемый во многих областях промышленности (рис. 1). Аммиачная селитра: применяется в качестве наиболее распространенного и эффективного азотного удобрения, используется в промышленных целях и в пиротехнике для изготовления взрывчатых веществ. Формула аммиачной селитры NH_4NO_3 также имеет названия азотнокислый аммоний, нитрат аммония и аммонийная соль азотной кислоты. Основное действующее вещество – азот. Данный состав успешно используется в сельском хозяйстве и частными фермерами в виде удобрения для растений, как стимулятор роста, благодаря уникальной формуле и составу подходит для всех видов почв и практически для всех сельскохозяйственных культур. Азот играет незаменимую роль в жизнедеятельности всех без исключения растений, ведь он входит в состав хлорофилла – проводника солнечной энергии и столь необходимого белка для активного роста. Удобрение выпускается в виде белых гранул, благодаря высокой гигроскопичности отлично растворяется в воде. Однако при длительном хранении гранулы могут расплываться, терять форму кристаллов, затем происходит слеживание вещества и из сыпучего оно превращается в плотную, монолитную массу.



Рис. 1

Перевозка аммиачной селитры требует специальных навыков транспортировки сыпучих грузов, учитывая особенности его химического состава и реакции на влажность и перепады температур. Аммиачная селитра перевозится насыпью или в биг-бегах – универсальных мягких контейнерах для перевозки и временного хранения гранулированных, порошкообразных материалов. Для перевозки аммиачной селитры используют подвижной железнодорожный состав или автотранспортные средства (рис. 2).



Рис. 2. Автотранспортные средства для перевозки аммиачной селитры

Следуя по маршруту к грузополучателю в 13 час. 45 мин. этого же дня, по адресу: пер. Шевкоплясова д. 137, г. Пролетарск, Ростовской области транспортное средство было остановлено сотрудниками отдела ОГИБДД МВД России по Пролетарскому району (далее сотрудниками отдела ОГИБДД). В результате проверки документов было установлено, что в накладной написано неполное наименование груза, характеризующее его свойства.

Таким образом, сотрудники отдела ОГИБДД предположили, что перевозится груз – селитра аммиачная, в чистом виде (аммония нитрат с не более 0,2 % горючих веществ, включая любое органическое вещество, рассчитанное по углероду, исключая примеси любого другого вещества) (рис. 3). Это вещество является опасным, относится к классу опасности 5.1 и ему присвоен номер ООН (организации объединенных наций) – 1942 [2, с. 442; 3, с. 27].



Рис. 3. Аммиачная селитра – опасное вещество, класс опасности 5.1

Не установив окончательно, к какому классу опасности относится перевозимое вещество, на инженера механика Максименко В.И. ИП Максименко М.В., выпустившего на линию транспортное средство без надлежаще оформленных документов на груз, сотрудниками отдела ОГИБДД был составлен протокол об административном правонарушении с назначением наказания в виде штрафа в размере 15 000 руб.

Однако 18.02.2015 г. водитель транспортного средства ИП Максименко М.В. Зайков П.К. перевозил груз – селитру аммиачную серосодержащую марки 6S. Это вещество относится к удобрениям (на основе нитрата аммония, однородные азотно-фосфатные, азотно-калийные или азотно-фосфатно-калийные смеси, содержащие не более 70 % нитрата аммония и не более 0,4 % общего количества горючего / органического материала, рассчитываемого по углероду или не более 45 % нитрата аммония и неограниченное количество горючего вещества) (рис. 4). Оно является не опасным, не попадает по действия [2], относится к 9 классу опасности (прочим веществам) и ему присвоен номер ООН – 2071 [2, с. 458; 3, с. 27].



Рис. 4. Аммиачная селитра в форме удобрений, класс опасности 9

Соответственно руководство ИП Максименко М.В. посчитало такое наказание слишком суровым и не справедливым и приступило к его обжалованию в судебном порядке, обратившись в Пролетарский районный суд Ростовской области. И лишь предоставив суду объемный перечень документов: выводы проведенных испытаний по определению физико-химических свойств селитры аммиачной серосодержащей ОАО «КуйбышевАзот»; сертификат качества селитры аммиачной серосодержащей с гранулированным сульфатом ТУ 2181-036-00205311-08; паспорт безопасности химической продукции на селитру аммиачную серосодержащую; сведения из европейского соглашения о международной дорожной перевозке опасных грузов (ДОПОГ) и др. удалось доказать невиновность инженера-механика Максименко В.И. ИП Максименко М.В. и отменить постановление о наложении административного правонарушения в виде штрафа в размере 15 000 руб.

Этот случай показывает, что ненадлежащее оформление транспортно-накладных документов на перевозимый груз, а именно указания полного наименования перевозимого вещества, его характеристики и физико-химических свойств приводит к ситуации, когда не опасный груз в результате неверно заполненных документов принимается за опасный в соответствии с требованиями [1-3].

Такой случай может произойти на любом предприятии, занимающемся перевозкой грузов автотранспортом.

Поэтому, чтобы избежать подобных случаев (инцидента с перевозкой груза, административного наказания, спорных вопросов при перевозке грузов и т.д.) лицам, ответственным за оформление документов на груз и водителям, необходимо сверять и правильно заполнять сопроводительные документы на перевозимый груз; неукоснительно выполнять требования Федерального законодательства РФ, нормативных технических документов и др., регламентирующих правила перевозки опасных грузов автомобильным транспортом [1-3].

Список литературы

1. ГОСТ 19433-88 Грузы опасные. Классификация и маркировка. – Введ. 1990–01–01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996 – 11 с.
2. Европейское соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов (ДОПОГ/ADR) (заключено в г. Женеве 30.09.1957) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.consultant.ru>.
3. Правила перевозки опасных грузов автомобильным транспортом: утв. приказом Минтранса РФ от 08.08.1995 г. № 73 ред. Приказов 11.06.1999 № 37, 14.10.1999 № 77 // Российские вести. – 1996. – № 15. – 27 с.

НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ НЕСВОЕВРЕМЕННОМ ВЫПОЛНЕНИИ ТРЕБОВАНИЙ НОРМАТИВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ К ТЕКУЩЕМУ СОДЕРЖАНИЮ СООРУЖЕНИЙ



Куксин В.В.

эксперт отдела экспертных работ и проектирования,
Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-
консультационный центр «Мысль» Новочеркасского
государственного технического университета,
Россия, г. Новочеркасск

Красюкова С.Н.

инженер, эксперт,
Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-технический центр»,
Россия, г. Кропоткин

Ватутин А.А.

инженер, эксперт,
Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-технический центр»,
Россия, г. Кропоткин

Недлин Л.М.

инженер, эксперт,
Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-технический центр»,
Россия, г. Кропоткин

Статья посвящена нарушениям требований по содержанию сливо-наливных сооружений и технических устройств эксплуатирующими организациями. Автором проанализированы сведения о результатах визуального осмотра и экспертизы промышленной безопасности железнодорожной сливной эстакады, принадлежащей ОАО «Гидрометаллургический завод» (Ставропольский край, г. Лермонтов) проведенных в марте 2012 г.

Ключевые слова: железнодорожный путь, железнодорожная эстакада, опасные вещества, операции по сливу-наливу, промышленная безопасность.

ОАО «Гидрометаллургический завод» (далее ОАО «ГМЗ») располагается в регионе Кавказских Минеральных Вод у подножия горы Бештау. Ис-

тория предприятия берет свое начало в 1954 году. Основными видами деятельности являются: производство фосфорных удобрений и другой продукции неорганической химии; переработка сырья и др.

На железнодорожной сливной эстакаде завода (рис. 1) осуществляется транспортирование и слив-налив опасных веществ: жидкого аммиака, серной кислоты. Доставка опасных вещества на территорию ОАО «ГМЗ» осуществляется с предприятий-поставщиков по собственному железнодорожному пути необщего пользования. Опасные вещества транспортируются в железнодорожных вагонах-цистернах. Сливо-наливные сооружения и технические устройства являются собственностью ОАО «ГМЗ». Операции по сливу-наливу производятся силами и средствами самого завода.



Рис. 1. Железнодорожная сливная эстакада ОАО «ГМЗ» (общий вид)

В результате проведенного визуального осмотра и экспертизы железнодорожной сливной эстакады проверено выполнение требований [1-7] и установлено:

1. Односторонняя сливная железнодорожная эстакада ОАО «ГМЗ» построена в 1986 г., силами завода по разработанным чертежам самого завода; проектная документация была утеряна в 90-е годы при реорганизациях завода; имеет длину 90 метров, ширину 5 метров и расположена на пути № 3; изготовлена из металлических и железобетонных конструкций.

2. Для налива вагонов-цистерн смонтированы наливные стояки, в количестве 8 единиц.

3. В соответствии с требованиями [1, с.10], для перехода производственного персонала с обслуживающей площадки эстакады на цистерну, на эстакаде имеются откидные переходные мостики, рабочие настилы которых выполнены из просечно-вытяжного стального листа. В целях исключения искрообразования при контакте с котлом железнодорожной цистерны, опорная часть переходного мостика армирована резиновой втулкой. Настил эстакады

и переходные мостики оборудованы перилами высотой 1 м и сплошным бортиком высотой 150 мм.

4. Связь между сливщиком, оператором и машинистом на сливной железнодорожной эстакаде осуществляется посредством радиации, что соответствует требованию [1, с.6,7].

5. В соответствии с требованиями [1, с.9; 2], на сливной железнодорожной эстакаде выполнено защитное заземление. Имеется Протокол измерения сопротивления растеканию заземляющих устройств.

6. Для обеспечения противопожарной безопасности на сливной железнодорожной эстакаде в соответствии с требованиями [1, с.8; 3], железнодорожная сливная эстакада обеспечена первичными средствами пожаротушения. На эстакаде оборудовано 2 пожарных щита, оснащенных огнетушителями, ящиками с песком и противопожарным инвентарем. На территории предприятия имеется: 1 пожарный гидрант, 4-е пожарных крана.

7. На сливной железнодорожной эстакаде, в соответствии с требованием [1, с.9], установлены молниеотводы.

8. При сливе опасных веществ из железнодорожной цистерны на эстакаде приняты меры защиты от статического электричества, в соответствии с требованиями [1, с.9]. Железнодорожная цистерна соединяется заземляющим тросом с контуром заземления эстакады.

9. Для безопасного транспортирования опасных веществ железнодорожным транспортом, соблюдения технологического процесса выгрузки опасных веществ из железнодорожных цистерн и обеспечения безопасности производства сливных работ на ОАО «ГМЗ» разработана вся необходимая документация, приказами по заводу назначены ответственные лица; ведутся журналы учета аварий и инцидентов.

10. В соответствии с [7, с.10], для обеспечения готовности к действиям по локализации и ликвидации последствий аварий на подъездных железнодорожных путях и сливной железнодорожной эстакаде, на заводе разработана документация, которой предусмотрены меры по локализации и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций техногенного характера, с проработкой различных сценариев возможных аварий и инцидентов, а также вариантов локализации и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, как собственными силами, так и с привлечением подразделений аварийно-спасательных формирований ГО и ЧС.

11. Имеются положительные Заключение экспертиз промышленной безопасности на ряд опасных объектов завода (склада аммиака, площадки цеха по производству минеральных удобрений), зарегистрированные и утвержденные Средне-Кавказским управлением Ростехнадзора по Ставропольскому краю.

12. Разработана Декларация промышленной безопасности цеха по производству минеральных удобрений, и проведена ее экспертиза. Имеется положительное Заключение экспертизы декларации, утвержденное Управлением Ростехнадзора (г. Москва);

13. Заключен Договор на профессиональное обслуживание опасных производственных объектов завода специализированными организациями, изданы приказы о создании на предприятии нештатных аварийно-спасательных формирований.

14. В соответствии с требованиями [7, с.10, 11; 5], и на основании [6] на заводе разработана, утверждена и согласована в установленном порядке документация о производственном контроле за соблюдением требований промышленной безопасности при эксплуатации опасных производственных объектов; приказами по заводу назначены ответственные лица.

15. В соответствии с [2, с. 4-6], руководители и специалисты ОАО «ГМЗ» прошли аттестацию в территориальной аттестационной комиссии Средне-Кавказского управления Ростехнадзора.

Персонал, непосредственно занятый работами с опасными веществами, прошел ежегодный экзамен, в аттестационной комиссии завода.

16. На ОАО «ГМЗ» имеются необходимые законодательные, нормативные и технические документы, регламентирующие деятельность организации при эксплуатации опасных производственных объектов и требования промышленной безопасности при транспортировании опасных веществ железнодорожным транспортом, содержании и эксплуатации подъездных железнодорожных путей, сливной железнодорожной эстакады.

В результате проведенного визуального осмотра и экспертизы железнодорожной сливной эстакады (рис. 1) были выявлены нарушения требований [1]:

1. Ширина лестниц для подъема на эстакаду, угол их наклона и поверхность ступеней не соответствует требованиям [1, с.5].

2. Территория, занятая эстакадой не имеет твердое водонепроницаемое покрытие, усиленное в зоне железнодорожных путей на фронтах выгрузки опасных веществ [1, с.5].

3. В районе эстакады отсутствуют пожарные проезды, имеющие твердое асфальтобетонное покрытие [1, с.10]

4. Эстакада, сданная в эксплуатацию в 1986г. за время эксплуатации (25 лет) физически и технически изнашивается. При обследовании установлено, что её техническое состояние не позволяет проводить безопасно сливно-наливные работы из железнодорожных цистерн [1].

5. Эстакада и лестницы для подъёма рабочего персонала (сливщиков) на эстакаду на всём своём протяжении имеют просадки на правую и левую стороны; прогибы влево, вправо, вниз от проектной оси; ограждающие поверхности, перила, переходные мостики требуют реконструкции, ремонта [1].

6. Все элементы эстакады требуют реконструкции ремонта и приведение их технических нормативов к требованиям действующей нормативной технической документации [1] и т.п.

Дополнительно обнаружено, что на эстакаде уложены рельсы лёгкого типа Р-43, которые были поэтапно выведены из эксплуатации на путях МПС и подъездных путях организаций требованиями, нормативных технических документов еще до 2000 г. В действующей нормативной технической доку-

ментации по строительству, ремонту и обслуживанию железнодорожных путей, например [8] рельсами лёгкого типа предусматриваются рельсы Р-50.

По результатам проведенного визуального осмотра и экспертизы были сделаны выводы, что техническая оснащенность и состояние зданий и сооружений: железнодорожной сливо-наливной эстакады и железнодорожного пути на эстакаде не соответствуют требованиям Федерального законодательства, нормативных и технических документов в области промышленной безопасности при эксплуатации опасных производственных объектов. Дальнейшая эксплуатация железнодорожной сливо-наливной эстакады и железнодорожного пути на эстакаде возможна после устранения нарушений, выявленных в ходе визуального осмотра и экспертизы.

Даны рекомендации на: разработку проекта по строительству и реконструкции новой эстакады, проведение экспертизы проекта, выполнение строительных и ремонтных работ в соответствии с проектом, замену рельс на эстакаде на рельсы более высокого класса (старогодные рельсы типа Р-65 или новые рельсы типа Р-50) и т.д.

А при невыполнении этих рекомендаций по устранению нарушений возникает большая вероятность следующей ситуации.

Из сведений Ростехнадзора (Информация о групповых несчастных случаях и случаях со смертельным исходом за 8 месяцев 2007 г.):

ОАО «Дагнефтепродукт», г. Махачкала (Управление Ростехнадзора по Республике Дагестан). 23.07.2007 г. Несчастный случай в ОАО «Дагнефтепродукт» на железнодорожной сливоналивной эстакаде светлых нефтепродуктов длиной 360 м.

На эстакаде установлены откидные мостики для перехода персонала с площадки эстакады на вагоны-цистерны при проведении сливо-наливных операций. Откидные мостики укомплектованы передвижными рамами, лебедками с тросами для подъема мостика, нижними фиксаторами для закрепления и фиксации рам откидных мостиков в направляющих в рабочем положении. Фиксаторы – устройства на стальных цепях с фиксирующими элементами. Вертикальные элементы рам откидных мостиков укомплектованы серьгами для фиксации кронштейна.

Бригада сливщиков-разливщиков производила налив вагонов-цистерн дизельным топливом, предварительно выполнив подготовительные работы: переходные мостики опущены на вагоны-цистерны, наливные рукава подведены к горловине цистерны. Бригада следила за процессом налива.

Неисправностей и неполадок в работе не отмечено. Сливщик-разливщик, направляясь в очередной раз проверить наполнение цистерны, переходил с площадки эстакады на откидной мостик. В этот момент мостик съехал с вагона-цистерны в сторону площадки эстакады и упал вниз. Сливщик покатился с мостика вниз головой, не успев схватиться за поручень откидного мостика. При падении он ударился головой о бетонную отмостку и получил травму, от которой скончался 23 июля 2007 г.

Комиссия установила, что откидной мостик, с которого упал рабочий, был опущен на вагон-цистерну, при этом нижний элемент рамы, незакреп-

ленный фиксатором, частично вышел из направляющих. Неоднократное хождение персонала по мостику способствовало дальнейшему подъему нижнего элемента рамы на 15–20 мм, что и послужило причиной выхода, не закрепленного фиксатором нижнего элемента рамы за пределы направляющих и смещению рамы вместе с откидным мостиком от вагона-цистерны в сторону площадки эстакады с последующим срывом мостика.

Причина несчастного случая – неправильная установка рамы откидного мостика в направляющей без закрепления его специальным фиксатором в нижней части на неподвижном элементе конструкции эстакады, а также неудовлетворительное техническое состояние направляющей рамы.

Организационные причины несчастного случая: недостаточный контроль за техническим состоянием и безопасной эксплуатацией технических устройств железнодорожной эстакады со стороны специалистов ОАО «Дагнефтепродукт».

Аналогичный случай мог бы произойти и на железнодорожной сливной эстакаде ОАО «ГМЗ», в результате которого при сочетании некоторых факторов (ненадлежащее качество несущих конструкций эстакады, несоблюдение техники безопасности и охраны труда, неисправность технических устройств и др.) последствия были бы намного масштабнее и трагичнее. А именно, в результате обрушения ограждений эстакады или ее отдельных элементов при выполнении обслуживающим персоналом сливо-наливных работ были бы повреждены помимо эстакады, верхнее строение железнодорожного пути и вагоны, находящиеся под выгрузкой.

Таким образом, был бы причинен значительный материальный ущерб владельцу подъездного железнодорожного пути и эстакады и владельцу подвижного состава. А также это обрушение могло бы привести к травматизму обслуживающего персонала, человеческим жертвам, а при нахождении на эстакаде вагонов с опасными грузами и более серьезным последствиям: к аварии, с разгерметизацией вагонов, выходом опасного вещества и причинением вреда окружающей среде и уже более значительному ущербу подвижного состава и железнодорожного пути.

Обобщая вышесказанное, следует отметить: случай, произошедший на ОАО «Дагнефтепродукт» (г. Махачкала) и описанный в статье сценарий аварии в очередной раз показывают, что своевременный ремонт сооружений и технических устройств и выполнение требований нормативных технических документов к текущему содержанию сооружений, в том числе и на опасных производственных объектах является одним из неотъемлемых условий избежать инциденты, травматизм, человеческие жертвы и аварии.

Список литературы

4. ВУП СНЭ-87 Вневедомственные указания по проектированию железнодорожных сливо-наливных эстакад легковоспламеняющихся и горючих жидкостей и сжиженных углеводородных газов. – Л.: НПО Леннефтехим, 1987. – С. 5-10.
5. Положение об организации работы по подготовке и аттестации специалистов организации, поднадзорных Федеральной службе по экологическому, технологическому и

атомному надзору: утв. приказом Ростехнадзора от 29.01.07. № 37, опубл. 16.04.2007, бюл. нормативных актов федеральных органов исполнительной власти № 16, С. 4–6.

6. ППБ-79 Правила пожарной безопасности при эксплуатации нефтеперерабатывающих предприятий. – М.: Министерство нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР, 1979. – 25 с.

7. Правила организации и осуществления производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности на опасном производственном объекте// Собрание законодательства РФ. – 1999. – № 11. – 98 с.

8. ПУЭ-86 Правила устройства электроустановок: утв. Минэнерго СССР от 01.01.1985 № 204. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2002. – 42 с.

9. РД 04-355-00 Методические рекомендации по организации и осуществлению производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности на опасных производственных объектах: утв. Приказом Госгортехнадзора России от 26.04.2000 № 49 // Безопасность труда в промышленности. – 2000. – № 7. – 22 с.

10. Федеральный закон от 21.07.1997г. № 116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектах» // Российская газета. – 1997. – № 145. – С. 10, 11.

11. ЦП-774 Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути: утв. МПС РФ 01.07.2000. – М.: Транспорт, 2000 г. – 225 с.

ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРАВИЛА ВЕДЕНИЯ РАБОТ НА ОБЪЕКТАХ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ГАЗОПОТРЕБЛЕНИЯ

Кульков Е.П.

эксперт,

Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-консультационный центр «Мысль» Новочеркасского государственного технического университета,
Россия, г. Новочеркасск

Красюкова С.Н.

инженер, эксперт,

Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-технический центр»,
Россия, г. Кропоткин

Ватутин А.А.

инженер, эксперт,

Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-технический центр»,
Россия, г. Кропоткин

Недлин Л.М.

инженер, эксперт,

Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-технический центр»,
Россия, г. Кропоткин

В статье рассматриваются вопросы обеспечения промышленной безопасности на объектах газораспределения и газопотребления в части касающейся наличия необходимого комплекта нормативной документации. Отдельно внимание уделено правилам ведения

работ на опасном производственном объекте и оформлению данных правил в форме отдельного документа.

Ключевые слова: промышленная безопасность, объекты газораспределения и газопотребления, правила ведения работ на опасном производственном объекте.

«Правила безопасности систем газораспределения и газопотребления» (ПБ 12-609-03), содержали достаточно много обязательных требований, которые не вошли в Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности сетей газораспределения и газопотребления», что создает определенные трудности при эксплуатации объектов газораспределения и газопотребления, работающих на природном газе. Обязательный характер носят требования «Технического регламента о безопасности сетей газораспределения и газопотребления», действие которого распространяется на сеть газораспределения и сеть газопотребления, а также на связанные с ними процессы проектирования (включая инженерные изыскания), строительства, реконструкции, монтажа, эксплуатации (включая техническое обслуживание, текущий ремонт), капитального ремонта, консервации и ликвидации [1].

Разработка «Правил ведения работ на опасном производственном объекте», как отдельного документа для объектов газораспределения и газопотребления, позволяет обеспечить в полном объеме исполнение требований ч.1 и ч.2 ст.9 Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» №116-ФЗ от 21.07.1997 г. Организация эксплуатирующая опасный производственный объект, обязана иметь на опасном производственном объекте нормативные правовые акты, устанавливающие требования промышленной безопасности, а также правила ведения работ на опасном производственном объекте [2]. Работники опасного производственного объекта обязаны соблюдать положения нормативных правовых актов, устанавливающих требования промышленной безопасности, а также правила ведения работ на опасном производственном объекте [2].

Нормативные правовые акты в области промышленной безопасности, зачастую устанавливают лишь общие требования к объекту. Именно правила ведения работ на опасном производственном объекте помогут учесть его специфику и в полной мере раскрыть требования по обеспечения промышленной безопасности объектов газораспределения и газопотребления.

При разработке «Правил ведения работ на опасном производственном объекте» следует руководствоваться ГОСТ Р 55471-2013; ГОСТ Р 55472-2013; ГОСТ Р 55473-2013; ГОСТ Р 55474-2013; ГОСТ Р 54960-2012; ГОСТ Р 54961-2012; ГОСТ Р 54983-2012 в которых приведены рекомендуемые виды, объёмы и сроки обслуживания газопроводов, газового и газоиспользующего оборудования, использование которых обеспечит условия безопасной эксплуатации сетей газораспределения и газопотребления работающих на природном газе.

«Правила ведения работ на опасном производственном объекте» утверждаются руководителем эксплуатирующей организации и должны содержать следующую информацию:

1. Цель и задачи внедрения «Правил ведения работ на опасном производственном объекте».

2. Общие требования.

2.1 (Наименование предприятия) при эксплуатации, сетей газораспределения и газопотребления намерено обеспечить выполнение комплекса мероприятий, включая мониторинг, техническое обслуживание и ремонт сетей газораспределения и газопотребления, обеспечивающих содержание сетей газораспределения и газопотребления в исправном и безопасном состоянии; выполнение работ по техническому обслуживанию, ремонту и аварийно-диспетчерскому обеспечению сетей газораспределения и газопотребления.

В случае отсутствия газовой службы в составе организации, эксплуатирующей сети газораспределения и газопотребления, предприятием должен быть заключен договор на оказание услуг по техническому обслуживанию и ремонту сети газораспределения и сети газопотребления с организацией, имеющей опыт проведения указанных работ.

2.2 Руководитель организации обеспечивает выполнение работ по «Правилам ведения работ на опасном производственном объекте» посредством: организации системы эксплуатации объектов газораспределения (газопотребления); организации производственного контроля; предоставления необходимых ресурсов, включая трудовые ресурсы (требуемой квалификации), финансовые, материальные, информационные и другие.

2.3 Ответственный за безопасную эксплуатацию опасных производственных объектов газораспределения (газопотребления) назначен приказом (№, дата) по организации (как правило технический руководитель).

3. Организация технического обслуживания и ремонта опасного производственного объекта.

Учитываются обязательные требования действующих нормативных документов, недостающие нормы приняты на основе рекомендуемых ГОСТ Р 54960-2012 «Системы газораспределительные. Пункты газорегуляторные блочные. Пункты редуцирования газа шкафные. Общие технические требования»; ГОСТ Р 54961-2012 «Системы газораспределительные. Сети газопотребления. Общие требования к эксплуатации. Эксплуатационная документация»; ГОСТ Р 54983-2012 «Системы газораспределительные. Сети газораспределения природного газа. Общие требования к эксплуатации. Эксплуатационная документация».

3.1. Сведения, характеризующие опасный производственный объект.

3.2. Виды работ, выполняемые при эксплуатации опасных производственных объектов (перечислить виды работ, выполняемые при эксплуатации с учетом рекомендаций, изложенных в ГОСТ Р 54960-2012; ГОСТ Р 54961-2012; ГОСТ Р 54983-2012).

3.3. Объем выполняемой работы (перечислить объем работ выполняемый при обходе трассы, приборном обследовании, осмотре, проверке пара-

метров, техническом обслуживании, с учетом рекомендаций, изложенных в ГОСТ Р 54960-2012, ГОСТ Р 54961-2012, ГОСТ Р 54983-2012).

3.4. Периодичность выполняемой работы (определяется периодичность выполнения каждой работы, с учетом рекомендаций, изложенных в ГОСТ Р 54960-2012, ГОСТ Р 54961-2012, ГОСТ Р 54983-2012).

3.5. Результаты работ по техническому обслуживанию отражаются в специальных журналах (ГОСТ Р 54960-2012, ГОСТ Р 54961-2012, ГОСТ Р 54983-2012).

4. Порядок контроля за выполнением Правил ведения работ на опасном производственном объекте.

5. Ответственность лица виновного в нарушении Правил ведения работ на опасном производственном объекте.

Список литературы

1. Постановление Правительства РФ от 29.10.2010 № 870 (ред. от 23.06.2011) «Об утверждении технического регламента о безопасности сетей газораспределения и газопотребления» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.pravo.gov.ru>.

2. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 13.07.2015) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» с изменениями, внесенными Федеральным законом от 13.07.2015 № 233-ФЗ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.pravo.gov.ru>.

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРТИЗЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГАЗОПРОВОДОВ И ГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Кульков Е.П.

эксперт,

Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-консультационный центр «Мысль» Новочеркасского государственного технического университета,
Россия, г. Новочеркасск

Красюкова С.Н.

инженер, эксперт,

Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-технический центр»,
Россия, г. Кропоткин

Ватутин А.А.

инженер, эксперт,

Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-технический центр»,
Россия, г. Кропоткин

Недлин Л.М.

инженер, эксперт,

Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-технический центр»,
Россия, г. Кропоткин

В статье рассматривается процесс проведения экспертизы промышленной безопасности газопроводов и газового оборудования. «Пошагово» выделены все основные составляющие этого процесса.

Ключевые слова: проведение экспертизы промышленной безопасности газопроводов и газового оборудования.

Экспертиза промышленной безопасности – определение соответствия объектов экспертизы промышленной безопасности, указанных в пункте 1 статьи 13 Федерального закона от 21.07.1997 № 116-ФЗ, предъявляемым к ним требованиям промышленной безопасности [2].

Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» устанавливают порядок проведения экспертизы промышленной безопасности требования к оформлению заключения экспертизы и требования к экспертам в области промышленной безопасности [1]. Основанием проведения экспертизы являются положения нормативных правовых актов Российской Федерации в области промышленной безопасности, устанавливающих требования по проведению экспертизы и к объекту экспертизы [1].

«Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» устанавливают общие требования к экспертам, порядку проведения экспертизы промышленной безопасности и оформлению заключения экспертизы. Отдельно рассмотрим особенности процесса проведения экспертизы промышленной безопасности газопроводов и газового оборудования. Он включает в себя следующее неотъемлемые составляющие:

- приказом руководителя организации, проводящей экспертизу, определяется эксперт или группа экспертов, участвующих в проведении экспертизы [1];

- подготовительные работы, проводимые экспертной организацией, включают изучение технической и эксплуатационной документации газопроводов и газового оборудования (технических устройств) и составление индивидуальных программ проведения экспертизы;

- перечень, необходимой для проведения экспертизы, технической и эксплуатационной документации составляется экспертной организацией с учетом набора требований предъявляемых к конкретному объекту экспертизы;

- анализ технической документации включает изучение схем газопроводов, марки основного и сварочного материалов, основных размеров элементов газопровода, газового оборудования (технических устройств), объем и результаты проведенного ранее контроля сварных соединений неразрушающими методами;

- результаты анализа технической документации используются для разработки индивидуальной программы экспертизы;

- в основе индивидуальной программы должны быть использованы требования нормативно правовых актов в области промышленной безопасности, актуальные на момент проведения экспертизы;

- в индивидуальной программе указываются конкретные сварные соединения, подлежащие контролю неразрушающими методами, определяются элементы, участки, зоны газопровода, газового оборудования (технических устройств), подлежащие контролю, установлены объемы и методы неразру-

шающего контроля, измерения твердости металла, а при необходимости объемы лабораторных исследований структуры и свойств металла с указанием мест отбора проб;

- визуальный и измерительный контроль включает в себя визуальный осмотр наружной и внутренней поверхности (в доступных местах) элементов газопроводов и газового оборудования (технических устройств), а также измерительный контроль проводящийся с целью обнаружения и определения размеров дефектов (поверхностные трещины, коррозионные повреждения вследствие воздействия блуждающих токов, подземной и атмосферной коррозии, газовой коррозии, эрозионный износ, механические повреждения, вмятины, сплющивания и другие изменения геометрии), образовавшихся в процессе эксплуатации, при ремонте, аварии, при изготовлении или монтаже;

- при осмотре газопроводов и газового оборудования (технических устройств) выполняется частичная или полная его разборка для осмотра внутренней поверхности элементов;

- выявленные в ходе осмотра трещины, вмятины и другие дефекты отмечаются на схеме;

- неразрушающий контроль сварных соединений с целью выявления внутренних дефектов (трещин, непроваров, пор, шлаковых включений и др.) в сварных соединениях газопроводов следует проводить радиографическим или ультразвуковым методом в соответствии с требованиями действующих нормативно-технических документов на данные методы;

- неразрушающий контроль поверхности элементов газопроводов и газового оборудования с целью выявления и определения размеров и ориентации поверхностных и подповерхностных трещин следует проводить методами магнитопорошковой дефектоскопии или проникающими веществами в соответствии с требованиями действующих нормативно-технических документов на эти методы контроля;

- неразрушающий контроль толщины стенки газопровода следует выполнять ультразвуковыми приборами, в соответствии с инструкцией по эксплуатации приборов;

- измерения твердости неразрушающими методами следует проводить при помощи переносных приборов (твердомеров) в соответствии с требованиями нормативно-технических документов и инструкции по эксплуатации приборов;

- определение химического состава, механических свойств и структуры металла методами неразрушающего контроля или лабораторными исследованиями следует выполнять для установления их соответствия действующим нормативным документам и выявления изменений, возникших в результате нарушения нормальных условий работы;

- исследования химического состава, механических свойств и структуры основного металла или сварного соединения на вырезках образцов из элементов газопровода следует проводить в случае неудовлетворительных результатах измерения твердости металла переносным твердомером;

- испытания на прочность и герметичность являются завершающей операцией экспертизы, эти испытания следует проводить при положительных результатах экспертизы или после устранения выявленных дефектов;

- анализ результатов экспертизы и проведение расчетов на прочность и определение срока дальнейшей безопасной эксплуатации, используя полученные по результатам контроля данные по геометрическим размерам, форме, свойствам металла элементов газопровода, газового оборудования (технических устройств) следует сравнивать с проектными данными, а выявленные отклонения размеров и форм, а также дефекты (коррозионные язвы, деформации, дефекты сварки и т.д.) сопоставить с нормативной документацией.

Список литературы

1. Приказ Ростехнадзора от 03.07.2015 № 266 «О внесении изменений в федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» (Зарегистрировано в Минюсте России 06.08.2015 № 38384) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pravo.gov.ru>.

2. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 13.07.2015) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» с изменениями, внесенными Федеральным законом от 13.07.2015 № 233-ФЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pravo.gov.ru>.

СОГЛАСОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНВЕРТОРА И НАГРУЗКИ НА БАЗЕ ИНДУКТРНО-КОНДЕНСАТОРНОГО МОДУЛЯ

Рогинская Л.Э.

профессор кафедры электромеханики, д-р техн. наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования Уфимский государственный
авиационный технический университет, Россия, г. Уфа

Горбунов А.С.

инженер кафедры электромеханики,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования Уфимский государственный
авиационный технический университет, Россия, г. Уфа

В статье рассмотрены особенности параметров источников питания индукционных установок и индукторов. Проанализированы основные способы согласования параметров источника питания и нагрузки, а также компенсации реактивной мощности в этих устройствах. Приведен способ согласования с улучшением технико-экономических показателей установки с помощью согласующих фазопреобразующих трансформаторов высокочастотных трансформаторов с новыми магнитопроводами.

Ключевые слова: индукционный нагрев, источник питания, компенсация реактивной мощности, согласование с нагрузкой, фазопреобразующий трансформатор, выпрямитель, индуктор, компенсирующий конденсатор, согласующий трансформатор.

В настоящее время в связи с развитием электротехнологии имеется тенденция расширения применения различных электротехнологических про-

цессов вместо ранее применяемых процессов, что связано с повышенными энергетическими показателями электротехнологических процессов и возможностью энергосбережения [4].

Выпускаемые полупроводниковые преобразователи частоты для установок индукционного нагрева представляют собой ряд определенных типов, каждый из которых способен обеспечить некоторые заданные величины выходных параметров, таких как выходная частота, выходное напряжение, выходной ток. В свою очередь выпускаемые индукторы проектируются на работу при заданных параметрах электрической энергии, с обеспечением требуемого режима нагрева определенных заготовок. Поэтому очень часто возникают ситуации, когда выходные параметры источника питания и параметры индуктора, такие как напряжение, ток, частота, не совпадают. В связи с этим возникает проблема согласования параметров источника питания с параметрами индуктора.

В практике индукционного нагрева используется несколько способов такого согласования [5]. Одним из них является применение сетевого трансформатора промышленной частоты. Данный способ имеет место при большой мощности электротехнологического комплекса, который обычно питается от отдельного силового трансформатора. В этом случае возможно применение нового согласующего фазопреобразующего трансформатора [3], позволяющего преобразовать входное трехфазное напряжение в многофазное, например, девятифазное. При подключении такого трансформатора, преобразующего трехфазное напряжение в девятифазное, к девятифазному выпрямителю источника питания индукционных установок коэффициент пульсаций [1] выпрямленного напряжения, как показали исследования [3], составит

$$K_{\Pi} = \frac{U_m(1)}{U_d} = \frac{10,23}{1647} = 0,0062, \quad (1)$$

где $U_m(1) = 10,23$ В – амплитуда первой гармоники пульсаций выпрямленного напряжения; $U_d = 1647$ В – среднее значение выпрямленного напряжения.

Данное значение K_{Π} намного меньше, чем в обычно применяемых трехфазных выпрямителях, равное 0,057 [1]. Первые высшие гармоники в кривой потребляемого таким фазопреобразующим трансформатором тока будут иметь номера [6]

$$K = m \cdot l \pm 1, \quad (2)$$

где m – пульсность выпрямителя; l – ряд целых чисел (1, 2, 3 и т.д.).

Для девятифазного (восемнадцатипульсного) выпрямителя первыми высшими гармониками в кривой потребляемого тока 17-я и 19-я [3]. Таким образом использование фазопреобразующих трансформаторов позволяет значительно улучшить качество потребляемой электрической энергии за счет более лучшего гармонического состава потребляемого тока и меньших пульсаций выпрямленного напряжения.

Как известно [5], индуктор обладает низким значением коэффициента мощности. При непосредственном соединении индуктора с источником бу-

дет происходить потребление значительной реактивной мощности. При компенсации реактивной мощности индуктора путем подключения компенсирующего конденсатора или батареи конденсаторов с образованием индукторно-конденсаторного модуля может быть изменена величина выходного тока источника питания и напряжения индуктора.

Известен способ согласования путем применения высокочастотных согласующих трансформаторов, подключаемых между источником питания и нагрузочным индукторно-конденсаторным модулем [5]. Данный способ позволяет обеспечить согласование без сложных и дорогостоящих индукторов и большого количества компенсирующих конденсаторов. Применение новых согласующих высокочастотных трансформаторов с магнитопроводами из аморфных или нанокристаллических сплавов позволит значительно повысить технико-экономические показатели индукционных установок по сравнению с ранее применяемыми трансформаторами [2]. Как показали исследования, рабочая индукция в предлагаемых трансформаторах достигает 1 Тл [4], потери, нагрев и массогабаритные показатели намного ниже, чем в известных согласующих трансформаторах на базе ферритов и электротехнической стали [2]. КПД трансформаторов с магнитопроводами из аморфных или нанокристаллических сплавов достигает очень высоких величин и, например, для трансформатора мощностью $P_1=10$ кВт составляет [2]

$$\eta = \frac{P_1 - p_M - p_{\text{об}}}{P_1} \cdot 100 = \frac{10000 - 35,14 - 11,07}{10000} \cdot 100 = 99,5 \%, \quad (3)$$

где $p_M=35,14$ Вт – потери в магнитопроводе; $p_{\text{об}}=11,07$ Вт – потери в обмотках.

Предлагаемые трансформаторы могут быть выполнены с переменным коэффициентом трансформации для возможности регулирования их выходного напряжения с целью рационального согласования с нагрузкой.

Поэтому способ согласования выходных параметров источника питания с параметрами индуктора путем применения новых согласующих фазопреобразующих трансформаторов и высокочастотных трансформаторов с магнитопроводами из аморфных или нанокристаллических сплавов с переменным коэффициентом трансформации является одним из наиболее перспективных и позволяет значительно улучшить технико-экономические показатели электротехнологических установок с индукционным нагревом.

Список литературы

1. Зиновьев, Г.С. Силовая электроника: учеб. пособие для бакалавров [Текст] / Г.С. Зиновьев. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2015. – 667 с.
2. Рогинская, Л.Э. Выбор параметров согласующих высокочастотных трансформаторов с магнитопроводом из аморфной электротехнической стали [Текст] / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы. Межвузовский научный сборник. – 2010. – С. 42–47.
3. Рогинская, Л.Э. Улучшение электромагнитной совместимости преобразовательных устройств с сетью и нагрузкой с помощью многофазных трансформаторов [Текст] / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов, З.И. Ялалова // Электротехнические и информационные комплексы и системы, УГУЭС. – № 3. – Т. 10. – 2014. – С. 21–30.

4. Стародубцев, Ю.Н. [Текст] Теория и расчет трансформаторов малой мощности / Ю.Н. Стародубцев. – М.: ИП РадиоСофт, 2005. – 320 с.
5. Тиристорные преобразователи частоты [Текст] / А.К. Белкин [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 263 с.
6. Ялалова, З.И. Определение электромагнитной совместимости фазопреобразующих трансформаторов преобразовательных установок [Текст] / З.И. Ялалова, Л.Э. Рогинская, Ю.В. Рахманова // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2013. – №2. – С. 16–20.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ПОДВЕШИВАНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Сизиков В.П.

доцент кафедры высшей математики, канд. техн. наук, доцент,
Омский государственный университет путей сообщения, Россия, г. Омск

С привлечением системной методологии в ранге ДИС-технологии осуществлён системный анализ проблематики подвешивания тяговых двигателей. На примере модели в ранге триады из элементов: ось колёсной пары, ось вала якоря двигателя, поводок подвески двигателя, выявлена пара основных вариантов организации поводка, включая особенности его рабочего материала.

Ключевые слова: двигатель, ДИС-технология, колёсная пара, поводок подвески, рабочий материал, режим, ресурс.

1. Введение. Данная работа является продолжением [1–6] апробаций ДИС-технологии, которой присущи одновременно качества системной методологии, языка программирования на уровне оболочки экспертных систем и аппарата имитационного моделирования. ДИС-технология позволяет быстро получать на качественном уровне то, что обычно требует долгих исследований, проведения затратных и экологически вредных экспериментов. В данной работе это демонстрируется на примере анализа проблематики подвешивания тягового электродвигателя (ТЭД) в электровозе с использованием сведений из [7].

Среди проблем, с которыми сталкиваются специалисты, применяющие аппарат традиционной физики, в том числе, механики, имеется, как минимум, две ключевых. Во-первых, формулы физики, тем более механики приходится применять в предположении уже завершённой и достаточно детальной качественной проработки, когда модель по существу уже готова к практической реализации, и надо лишь согласовать или оптимизировать в ней значения серии параметров. Но всегда ли осуществляемая перед этим качественная проработка эффективна, чтобы подготовленная ею модель была надёжной, в том числе, допускающей коррекцию на уровне замены в ней элементов? Во-вторых, как ни велико многообразие готовых формул физики, почти все конкретные задачи требуют сложного, часто недостаточно проработанного, синтеза этих формул. Нередко это бывает невозможно осуществить без дополнительных гипотез, а то и физических экспериментов. Приходится выстраивать многоэтапные, растянутые на долгие времена, выводы формул, которые

рискует потерять актуальность, как только появится возможность для замены в системе хотя бы одного элемента.

Обращаясь к проблематике подвешивания ТЭД, следует отметить, что разработка надёжной и устойчивой, в частности, к износу системы непосредственным образом не учитывает важнейший фактор износа материала – температуру. Для этого просто нет подходящих формул.

ДИС-технология позволяет преодолеть отмеченные трудности. В ней разработан математический аппарат, который, во-первых, богат для описания разнообразных физических явлений, во-вторых, ориентирован на язык алгоритмов и имитационные эксперименты, в-третьих, результаты его применения не исключают, а дополняют работы, выполненные в русле традиционной для отрасли методологии.

2. Модель процесса-системы с подвешенным двигателем. Опорно-осевое подвешивание ТЭД электровоза 2ЭС6 с основными габаритными размерами включает элементы [7]: ТЭД; поводок подвески ТЭД; вал якоря ТЭД; колёсная пара; рама тележки; головки поводка с сайлентблоками; кронштейн для крепления ТЭД к поводку. Подвеска должна обеспечивать снижение динамических воздействий на колёсно-моторный блок при трогании с места и прохождении колёсной парой неровностей пути.

Связь ТЭД с рамой тележки – маятниковая. Подвешивание ТЭД к раме тележки осуществлено через поводок, имеющий на концах две головки с резиновыми или полиуретановыми сайлентблоками. Клинообразные концы осей шарниров (сайлентблоков) устанавливаются в приваренном к раме тележки и в закреплённом шестью болтами на остовах ТЭД кронштейнах, в которых они крепятся каждый двумя болтами, зафиксированными стопорными шайбами. В качестве страховки от падения ТЭД на рельсовый путь при обрыве поводка служат специальные приливы на остовах ТЭД и среднем бруске рамы тележки [7].

Для оценки эксплуатационной надёжности элементов подвешивания ТЭД выполним анализ напряжённого состояния материала поводка в процессе циклического нагружения при движении по стыковому рельсовому пути. Однако обратимся при этом не к традиционной механике, а к ДИС-технологии. При этом надо выявить характерную для такой эксплуатации процесс-систему. Так, согласно описанным данным, происходит перераспределение нагрузки по циклу: ось колёсной пары → ось вала якоря ТЭД → поводок подвески ТЭД → ось колёсной пары. Это и даёт модель процесса-системы в ранге процесса информационного функционирования (ПИФ) триады как круговорота ресурса по циклу $v_0 \rightarrow v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_0$ с соответствующими вершинами v_0, v_1, v_2 [1; 3–4; 6].

Для запуска ПИФ триады надо задать начальное распределение активов r_i и пассивов q_i по вершинам v_i и определиться с тем, как меняются от компонента к компоненту ПИФ уровни трансформации λ_i пассива в актив в вершинах v_i и относительные проводимости $f_c(v_j, v_i), f_d(v_i, v_j)$ каждой имеющейся в триаде контролирующей и ведущей связи, проводящей ресурс от v_i к v_j ($i, j=0, 1, 2$). И для здравого анализа считаем, что общий объём ресурса в триаде равен 1 – условной единице. Кроме того, режим, на который выходит ПИФ

триады, лишь в исключительных случаях зависит от начального распределения активов r_i и пассивов q_i , т.е. их можно задать практически любыми, дающими в сумме 1.

Далее, ввиду взаимодействия, проводимости связей определяются текущим образом из соотношений: $f_d(v_i, v_j) = a_{ij}(r_j + q_j)$, $f_c(v_j, v_i) = b_{ij}(r_j + q_j)$, где $0 \leq a_{ij} \leq 1$, $0 \leq b_{ij} \leq 1$ – постоянные взаимодействия, определяемые по формулам $a_{ij} = (a_i a_j)^{0,5}$, $b_{ij} = (b_i b_j)^{0,5}$, где, в свою очередь, $0 \leq a_i \leq 1$, $0 \leq b_i \leq 1$ – постоянные мотиваций взаимодействия в каждой вершине v_i ($i, j = 0, 1, 2$). Для выявления автономных качеств системы все a_i , b_i и $0 \leq \lambda_i \leq 1$ считаются неизменными в конкретном ПИФ.

Итак, в общем случае имеем 9 свободных параметров λ_i , a_i , b_i ($i = 0, 1, 2$), и важно определиться, как от их значений зависит режим ПИФ триады.

Попытаемся выяснить, какие режимы ПИФ вполне благоприятны в задаче с подвеской ТЭД. Прежде всего, должны быть сведены к минимуму нагрузки в поводке подвески ТЭД v_2 . Нагрузка как силовой показатель выражается величиной вакуумной ёмкости как одного из типов движения [1–6] в ДИС-технологии. Эта величина в свою очередь диктуется значением параметра λ_2 , т.е. должно быть $\lambda_2 \approx 0$. Кроме того, с учётом инерционности, должно быть $\lambda_0 > \lambda_1 > 0$. Далее, в поводке v_2 нежелательно выделение тепла. Уместно потребовать, чтобы показатель теплового движения в v_2 был как можно меньше и хотя бы сопоставим при этом с теми, что окажутся в v_0 и v_1 . Показания остальных типов движения не столь важны, так как будут укладываться в чередующиеся повороты поводка подвески, отражаясь в кручении, напряжения которого уже учтены в показаниях вакуумной ёмкости.

Итак, приступим к экспериментам.

3. Мониторинг режимов процесса-системы с подвешенным двигателем. Для начала примем $\lambda_0 = 0,6$, $\lambda_1 = 0,3$, $\lambda_2 = 0,01$, $a_i = b_i = 1$ ($i = 0, 1, 2$). Соответствующая программа выдаёт график режима ПИФ: на верхнем рисунке 1 в верхней полосе ряды 1 и 2 отражают изменения, соответственно, актива и пассива в вершине v_0 , в средней полосе – в вершине v_1 , в нижней полосе – в вершине v_2 . Для каждой вершины последовательно добавляются показатели 8 типов движения в ней: на каждом нижнем рисунке 1 в верхней полосе ряды 1 и 2 отражают, соответственно, равномерное прямолинейное движение и вакуумную ёмкость, во второй полосе – механическое и вращательное (поворот) движения, в третьей полосе – импульсы напряжения и тепловое движение, в четвёртой полосе – вращательное (вокруг оси) движение и теплоёмкость.

Согласно данным движения, в вершине v_2 , отвечающей за поводок подвески ТЭД, вакуумная ёмкость практически $= 0$, а вот показания теплового движения в ней существенно больше, чем в v_0 и v_1 : соответственно, $3 \cdot 10^{-4}$, 10^{-5} , $4,3 \cdot 10^{-5}$ от условной единицы. Так что поводок на порядок горячее и оси якоря ТЭД, и оси колёсной пары. Но особо существенно то, что на некоторых этапах величина тепла в v_2 превосходит показатель теплоёмкости, а это грозит перегревом и сгоранием материала поводка.

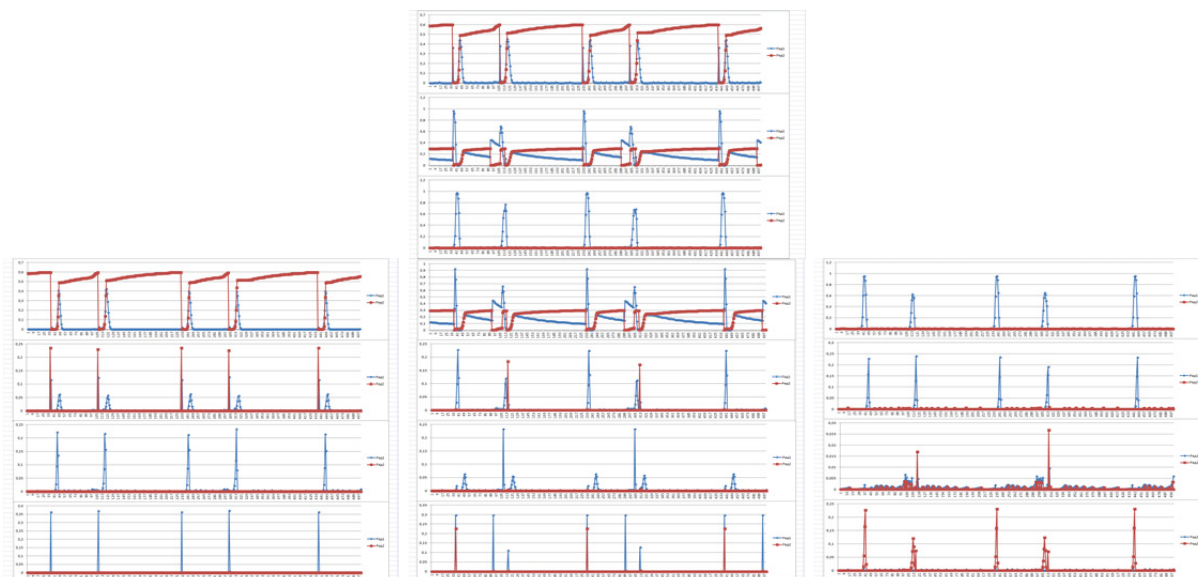


Рис. 1. Исходный режим с подвешенным двигателем и типы движения при нём

Явно улучшить ситуацию за счёт перемен параметров λ_i ($i=0,1,2$), конечно, в допустимых для практики диапазонах безнадёжно, так как это мало изменит в вершине v_2 среднюю величину поступающего в неё пассива как сумму силовых и тепловых проявлений. Чтобы последняя величина убавилась, надо уменьшать значения параметров a_i , b_i ($i=0,1,2$). Но уменьшение их всех вместе ведёт просто к замедлению ПИФ, что на практике соответствует замедлению движения электровоза, и то, что новые показатели движения меньше исходных, вовсе не значит улучшения надёжности поводка подвески ТЭД. Так что обязательно надо хотя бы одно из значений параметров a_i , b_i ($i=0,1,2$) оставлять $=1$, а также при их перемене следует заботиться, чтобы характерная величина «периода» у ПИФ была не больше, чем в исходном варианте на рисунке 1.

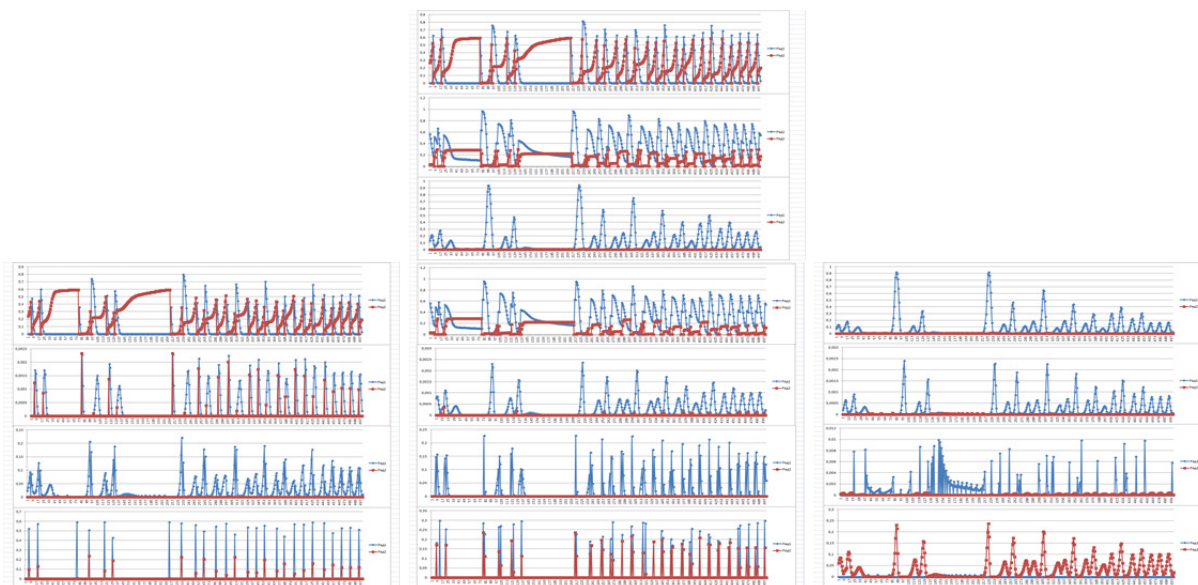


Рис. 2. Режим при высокой вязкости материалов и типы движения при нём

Так как в идеале при $a_i=0$ тепловое движение в вершине v_i должно быть $=0$, то начнём с уменьшения параметров a_i ($i=0,1,2$). Но оказывается, что убывание теплового движения в вершине v_i происходит на порядки медленнее значения a_i . На рисунке 2 приведён вариант, в котором $\lambda_0=0,6$, $\lambda_1=0,3$, $\lambda_2=0,01$, все $a_i=0,01$ и все $b_i=1$. При этом средние значения показателей тепла в вершинах v_0 , v_1 , v_2 составляют, соответственно, $6,8 \cdot 10^{-6}$, $2,5 \cdot 10^{-6}$, $6,3 \cdot 10^{-5}$ от условной единицы, т.е. показатель у поводка убыл менее чем в 5 раз, оставив поводок на порядок горячее осей якоря ТЭД и колёсной пары. Тем не менее, эта ситуация много лучше исходной, так как теперь величина тепла в v_2 заведомо меньше показателя теплоёмкости, т.е. нет угроз для перегрева материала поводка.

У нового результата есть преимущество и в том, что явно сократилась величина характерного «периода» ПИФ, участились встряски поводка, и, значит, повысилась оценка его надёжности. Но объявился и недостаток в том, что уже при значениях $a_i=0,01 \ll b_i=1$ материал вершины v_i должен предстать почти как цельный кристалл. Требовать этого от всех материалов электроваза, особенно от поводка подвески ТЭД, вряд ли уместно. Значит, стоит уменьшить значение хотя бы одного из параметров b_i ($i=0,1,2$), прежде всего b_2 . И на рисунке 3 приведён вариант, в котором $\lambda_0=0,6$, $\lambda_1=0,3$, $\lambda_2=0,01$, все $a_i=0,1$, $b_0=b_1=1$ и $b_2=0,013$.

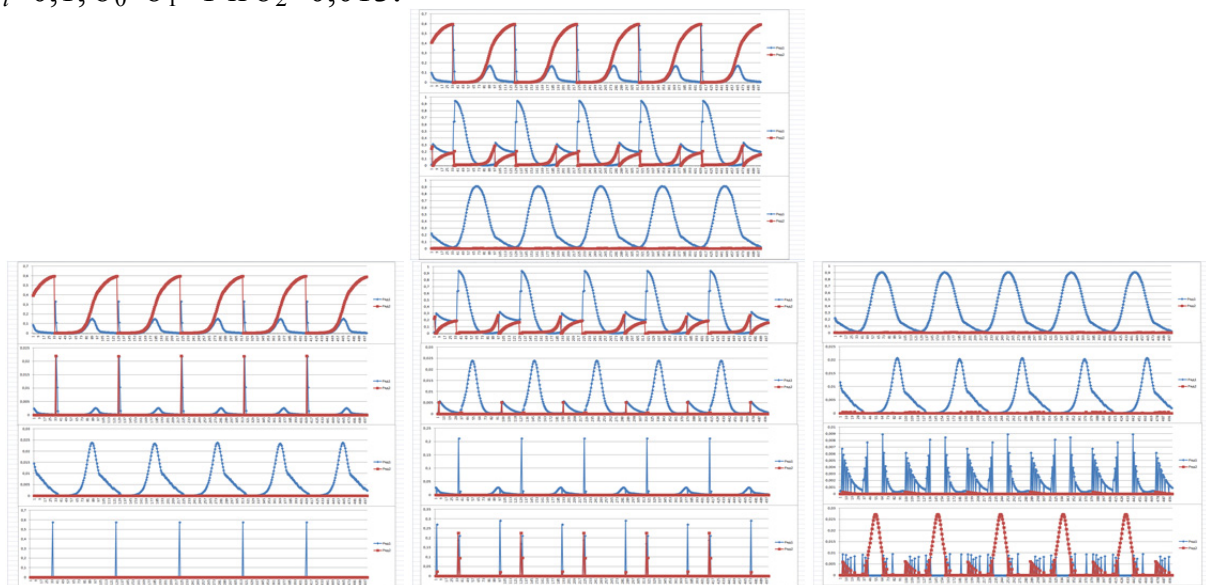


Рис. 3. Режим при малой вязкости материала поводка и типы движения при этом

При этом характерный «период» ПИФ остался примерно величиной в 100 его компонентов, как у исходного варианта, а средние показатели тепла в вершинах v_0 , v_1 , v_2 составили, соответственно, $5,7 \cdot 10^{-7}$, $1,4 \cdot 10^{-5}$, $1,7 \cdot 10^{-5}$ от условной единицы. Результат оказался явно лучше исходного, причём в поводке и оси колёсной пары улучшение составило более чем на порядок, превзойдя предыдущий результат, где все $a_i=0,01 < 0,1$. Тепло в поводке почти сравнялось с теплом у оси якоря ТЭД. Однако теперь материалам в v_0 , v_1 не обязательно быть кристаллами, а материал в v_2 , где $a_2=0,1 > b_2=0,013$, подобен резине.

В принципе, показатели тепла можно убавлять и далее на порядки, уменьшая значения всех a_i и b_2 . Однако это будет налагать уже серьёзные требования к материалам, из которых изготовлены части v_0, v_1, v_2 . У первых двух материал скоро должен выступать кристаллом, буквально алмазным при $a_i \approx 0$, а у третьей, наоборот, материал скоро должен оказаться буквально воздушным, и подвесить с его помощью ТЭД вряд ли получится. Или всё-таки можно на примере пневматического устройства? Тем более что режим ПИФ при этом становится более выровненным, снимая тревоги за безопасность работы.

4. Заключение. Итак, с применением ДИС-технологии проведён системный анализ простейшей модели в ранге триады, выражающей взаимодействие основных элементов в проблематике подвешивания ТЭД в электровозе. За основу приняты условия малости проявлений сил и тепла в поводке подвески ТЭД. Исходя из этого, выявлена пара основных вариантов организации поводка, включая особенности его рабочего материала. Примеры этих вариантов представлены на рисунках 2 и 3. При этом вариант на рисунке 3 более предпочтителен не только по малости силовых и тепловых проявлений в поводке, но и по выровненному характеру функционирования системы.

Похоже, пока на практике предпочтение отдаётся варианту, приведённому на рисунке 2, с уменьшением значений a_i , не меняя b_i ($i=0,1,2$). Ситуация останавливается на использовании материалов в ранге стали. Одной из главных причин этого является отсутствие надёжных подходов к учёту тепловых эффектов в системе, по стали всё-таки есть некие данные об её усталости в эксплуатации. А ведь, в принципе, согласно данным на рисунке 3, не исключены и другие варианты организации поводка.

В интересах приближения полученных математических результатов к практике уместно предположить, что оптимальное согласование в механической системе из трёх элементов: ось колёсной пары, ось вала якоря ТЭД, поводок подвески ТЭД, достигается по мере привлечения в систему пневматических или (и) вакуумных устройств. Это соответствует усилению варианта, приведённого на рисунке 3. Выровненный характер режима ПИФ при этом позволяет сгладить опасения за возможные избыточные напряжения и нарушения безопасности при использовании пневматических или (и) вакуумных устройств.

Продолжение серий имитационных экспериментов в русле ДИС-технологии уместно проводить в параллели с экспериментами с конструкционными материалами. Таким образом, предложенный здесь подход позволяет дополнить, но не заменить, использование инструментов физики, в том числе механики для расчетов распределения сил в системе, в оценке, например, такого важного фактора как усталость материала. Однако эти инструменты актуально применять уже после того, как осуществлена достаточно надёжная качественная проработка системы в отношении её элементов, например, с помощью ДИС-технологии.

Список литературы

1. Сизиков, В.П. Модель и анализ взаимодействия протона и электрона на базе ДИС-технологии [Текст] / В.П. Сизиков // Теоретические и прикладные аспекты совре-

менной науки: Сб. науч. тр. по матер. VI Междун. науч.-прак. конф. в 6 ч. – Белгород : ИП Петрова М.Г., 2015. – Ч. III. – С. 118–125. То же [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.issledo.ru>.

2. Сизиков, В.П. Турбулентность: системный статус и управление [Текст] / В.П. Сизиков // Теоретические и прикладные аспекты современной науки: Сб. науч. тр. по матер. IX Междун. науч.-прак. конф. в 6 ч. – Белгород : ИП Петрова М.Г., 2015. – Ч. II. – С. 129–137. То же [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.issledo.ru>.

3. Сизиков, В.П. Трещины и дислокации: системный статус и управление [Текст] / В.П. Сизиков // Современные тенденции развития науки и технологий: Сб. науч. тр. по матер. II Междун. науч.-прак. конф. в 7 ч. – Белгород : ИП Ткачёва Е.П., 2015. – Ч. II. – С. 137–144. То же [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.issledo.ru>.

4. Сизиков, В.П. Системный анализ совершенства мышления [Текст] / В.П. Сизиков, Т.Ю. Круковская // Современные тенденции развития науки и технологий: Сб. науч. тр. по матер. III Междун. науч.-прак. конф. в 6 ч. – Белгород : ИП Ткачёва Е.П., 2015. – Ч. V. – С. 106–115. То же [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.issledo.ru>.

5. Сизиков, В.П. Системный анализ модернизаций в обществе [Текст] / В.П. Сизиков, В.И. Разумов // Современные тенденции развития науки и технологий: Сб. науч. тр. по матер. IV Междун. науч.-прак. конф. в 6 ч. – Белгород : ИП Ткачёва Е.П., 2015. – Ч. III. – С. 139–147. То же [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.issledo.ru>.

6. Разумов, В.И. Системный анализ роли истории [Текст] / В.И. Разумов, В.П. Сизиков. – Вестник Омского университета. – 2015. – № 2 (76). – С. 83–89.

7. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации. Часть 6. Механическая часть. – 2ЭС6.00.000.00 РЭ5 / ООО «Уральские локомотивы». – Екатеринбург, 2011.

Для заметок

Научное издание

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов
по материалам VI Международной научно-практической
конференции

г. Белгород, 30 сентября 2015 г.

В десяти частях
Часть I

Подписано в печать 09.10.2015. Гарнитура Times New Roman.
Формат 60×84/16. Усл. п. л. 8,60. Тираж 100 экз. Заказ 176
ООО «ЭПИЦЕНТР»
308010, г. Белгород, ул. Б.Хмельницкого, 135, офис 1
ИП Ткачева Е.П., 308000, г. Белгород, Народный бульвар, 70а