

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Выпуск 31

**ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ
В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ
И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2006**

Выпуск содержит материалы XXXV научной и учебно-методической конференции СПбГУ ИТМО «Достижения ученых, аспирантов и студентов университета в науке и образовании». Конференция была проведена 31 января – 3 февраля 2006 г. Санкт-Петербургским государственным университетом информационных технологий, механики и оптики в сотрудничестве с

- ФГУП ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»,
- Институтом аналитического приборостроения РАН (ИАНП РАН),
- Институтом проблем машиноведения РАН (ИПМаш РАН),
- Комитетом по науке и высшей школе Санкт-Петербурга (КНВШ),
- ВНИИМ им. Д.И. Менделеева,
- ОАО «ЛОМО»,
- ОАО «Техприбор»,
- ФГУП СПб ОКБ «Электроавтоматика»,
- ЦНИИ «Электроприбор».

В выпуске представлены работы, поддержанные финансированием в рамках:

- Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002–2006 гг» (Федеральное агентство по науке и инновациям);
- аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–08 гг.) (Федеральное агентство по образованию);
- Федеральной целевой программы развития образования на 2006–2010 гг. (Федеральное агентство по образованию),
- Российского фонда фундаментальных исследований,

а также инициативные разработки.

Программный комитет конференции:

Васильев В.Н. (СПбГУ ИТМО) – председатель

Аронов А.М. (ОАО «ЛОМО»)	Маслов Ю.В. (ОАО «Техприбор»)
Алимов Ю.А. (ФГУП ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»)	Максимов А.С. (КНВШ)
Викторов А.Д. (КНВШ)	Мусалимов В.М. (СПбГУ ИТМО)
Гатчин Ю.А. (СПбГУ ИТМО)	Парамонов П.П. (ФГУП СПб ОКБ «Электроавтоматика»)
Дукельский К.В. (ФГУП ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»)	Пешехонов В.Г. (ЦНИИ «Электроприбор»)
Карасев В.Б. (ФГУП ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»)	Путилин Э.С. (СПбГУ ИТМО)
Козлов С.А. (СПбГУ ИТМО)	Ткалич В.Л. (СПбГУ ИТМО)
Колесников Ю.Л. (СПбГУ ИТМО)	Ханов Н.И. (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева)
Курочкин В.Е. (ИАНПРАН)	Храмов В.Ю. (СПбГУ ИТМО)
	Шехонин А.А. (СПбГУ ИТМО)
	Яковлев Е.Б. (СПбГУ ИТМО)

Организационный комитет конференции:

Никифоров В.О. – председатель

Студеникин Л.М. – зам. председателя

Казар Л.Н. – ученый секретарь

Горкина Н.М.	Ноздрин М.А.
Гатчин Ю.А.	Путилин Э.С.
Гусарова Н.Ф.	Савельева Л.П.
Гуров И.П.	Томасов В.С.
Никоноров Н.В.	

ISSN 1819-222X

© Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики, 2006

ФУНКЦИЯ ГРИНА ДВУХЧАСТИЧНОЙ ЗАДАЧИ В ВОЛНОВОДЕ

С.Б. Левин, И.Ю. Попов, Е.С. Тесовская

Получена функция Грина и ее асимптотика для двух невзаимодействующих частиц в прямом бесконечном двумерном волноводе. Используется метод свертки, основанный на известной функции Грина для одной частицы в волноводе.

Вступление

Исследования баллистического транспорта электрона – важная задача физики наносистем. Во многих нанoeлектронных устройствах используется не один, а несколько электронов, распространяющихся в одной области. Это приводит к гораздо более сложной многочастичной задаче. Основным математическим объектом в ней является функция Грина. В частности, такая задача возникает при моделировании двухкубитовых операций в квантовом компьютере [1]. Соответствующая реализация элементов квантового компьютера, основанных на связанных квантовых волноводах с различными граничными условиями (Неймана и Дирихле), предложена в [2]. Поведение электрона в системе связанных квантовых волноводов с различными граничными условиями исследовано в [3, 4]. В настоящей работе исследуется функция Грина для системы двух невзаимодействующих частиц, находящихся в прямом бесконечном двумерном волноводе шириной d с условиями Неймана на границе. При этом используется представление для одночастичной функции Грина в волноводе с соответствующими граничными условиями.

Функция Грина

Пусть $X_1 = (x_1, y_1)$ и $X_2 = (x_2, y_2)$ – координаты частиц, $0 \leq y_{1,2} \leq d$, E – суммарная энергия системы. Будем считать, что $\text{Im } E = \text{const} > 0$. Тогда функция Грина двухчастичной задачи может быть получена в виде свертки двух функций Грина для каждой частицы:

$$G(X_{1,2}, X'_{1,2}, E) = \frac{1}{2\pi i} \oint_L g(X_1, X'_1, \zeta) g(X_2, X'_2, E - \zeta) d\zeta, \quad (1)$$

где L – контур вокруг спектра соответствующего оператора (спектр лежит на неотрицательной части вещественной оси), $g(X_{1,2}, X'_{1,2}, \zeta)$ – функции Грина одного электрона в волноводе с энергией ζ и граничными условиями Неймана. Используя известные выражения для функции Грина одной частицы, получаем:

$$G(X_{1,2}, X'_{1,2}, E) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_{n,m} \oint_L \frac{\exp\left(-R_1 \sqrt{\pi^2 n^2 d^{-2} - \zeta} - R_2 \sqrt{\pi^2 m^2 d^{-2} - E + \zeta}\right)}{2\pi i \sqrt{(\pi^2 n^2 d^{-2} - \zeta)(\pi^2 m^2 d^{-2} - E + \zeta)}} d\zeta. \quad (2)$$

Здесь $R_1 = |x_1 - x'_1|$, $R_2 = |x_2 - x'_2|$, $A_{n,m} = \frac{(\delta_{n0} + 1)(\delta_{m0} + 1)}{d^2} \cos \frac{\pi n y_1}{d} \cos \frac{\pi n y'_1}{d} \cos \frac{\pi m y_2}{d} \cos \frac{\pi m y'_2}{d}$.

Обозначим интеграл, входящий в (2), $F(n, m)$. Чтобы вычислить этот интеграл, разобьем контур интегрирования на две части и сведем интеграл к интегралу по вещественной переменной. После этих преобразований и замены переменной получаем

$$F(n, m) = 4i \int_0^\infty \frac{\exp\left(-nR_2 \sqrt{t^2 + C_{n,m}}\right)}{\sqrt{t^2 + C_{n,m}}} \cos nt R_1 dt, \quad (3)$$

где $C_{n,m} = \frac{\pi^2}{d^2} + \frac{\pi^2 m^2}{d^2 n^2} - \frac{E}{n^2}$. После вычисления интеграла получаем

$$F(n, m) = 4iK_0\left(nR\sqrt{C_{n,m}}\right), \quad (4)$$

где $R^2 = R_1^2 + R_2^2$, K_0 – цилиндрическая функция комплексного переменного (функция Макдональда). Окончательно для функции Грина получаем

$$G(X_{1,2}, X'_{1,2}, E) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=0}^\infty \sum_{m=0}^\infty A_{n,m} K_0 \left(R \sqrt{\frac{\pi^2}{d^2} (n^2 + m^2) - E} \right). \quad (5)$$

Обозначим для краткости

$$f = A_{n,m} K_0 \left(R \sqrt{\frac{\pi^2}{d^2} (n^2 + m^2) - E} \right). \quad (6)$$

Функция $K_0(\xi)$ является слабо убывающей при достаточно больших ξ . Тогда, выбирая достаточно большие M и N (так, чтобы аргумент функции K_0 был много больше единицы), получаем для функции Грина:

$$G(X_{1,2}, X'_{1,2}, E) = \frac{2}{\pi} (J_1 + J_2 + J_3 - J_4 + J_5), \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} J_1 &= \sum_{n=0}^N \left(\sum_{m=0}^M f - \int_0^M f dm \right) + \sum_{m=0}^M \left(\sum_{n=0}^N f - \int_0^N f dn \right), \\ J_2 &= \int_0^\infty \left(\sum_{n=0}^N f - \int_0^N f dn \right) dm + \int_0^\infty \left(\sum_{m=0}^M f - \int_0^M f dm \right) dn, \\ J_3 &= \int_0^N \int_0^M f dm dn, \quad J_4 = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M f, \quad J_5 = \int_0^\infty \int_0^\infty f dm dn. \end{aligned}$$

Используя [3], преобразуем интегралы и суммы, входящие в (7), к следующим выражениям:

$$J_1 + J_3 - J_4 = -\frac{\sqrt{E}}{\pi d} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{N_1 \left(d\pi^{-1} \sqrt{E} \sqrt{s^2 + t^2 + \pi^2 R^2 d^{-2}} \right) D_N(t, y_1) D_M(s, y_2)}{\sqrt{s^2 + t^2 + \pi^2 R^2 d^{-2}}} dt ds,$$

где

$$\begin{aligned} D_N(t, y_1) &= \sum_{n=0}^N \cos \frac{\pi n y_1}{d} \cos \frac{\pi n y'_1}{d} \cos nt - \int_0^N \cos \frac{\pi s y_1}{d} \cos \frac{\pi s y'_1}{d} \cos stds, \\ J_2 &= -(Q_1^+ + Q_1^- + Q_2^+ + Q_2^-) + \\ &+ \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{iE}^{1/4} d^{5/2}} \int_0^\infty \frac{K_{1/2} \left(id\pi^{-1} \sqrt{E} \sqrt{t^2 + \pi^2 R^2 d^{-2}} \right) (D_N(t, y_1) + D_M(t, y_2))}{(t^2 + \pi^2 R^2 d^{-2})^{1/4}} dt, \\ Q_{1,2}^\pm &= \frac{\sqrt{E}}{2\pi d} \int_0^\infty \frac{K_1 \left(id\pi^{-1} \sqrt{E} \sqrt{t^2 + \pi^2 d^{-2} (R^2 + (y_{1,2} \pm y'_{1,2})^2)} \right) D_{M,N}(t, y_{2,1})}{\sqrt{t^2 + \pi^2 d^{-2} (R^2 + (y_{1,2} \pm y'_{1,2})^2)}} dt. \end{aligned}$$

$$J_5 = \frac{4}{d^2} K_0(iR\sqrt{E}) + E_1^+ + E_1^- + E_2^+ + E_2^- + F^{++} + F^{+-} + F^{-+} + F^{--},$$

где

$$E_{1,2}^\pm = \frac{\exp\left(i\sqrt{E}\sqrt{R^2 + (y_{1,2} \pm y'_{1,2})^2}\right)}{2d\sqrt{R^2 + (y_{1,2} \pm y'_{1,2})^2}},$$

$$F^{\pm\pm} = \frac{i\sqrt{E}}{8\pi} \frac{K_1\left(-i\sqrt{E}\sqrt{R^2 + (y_1 \pm y'_1)^2 + (y_2 \pm y'_2)^2}\right)}{\sqrt{R^2 + (y_1 \pm y'_1)^2 + (y_2 \pm y'_2)^2}}.$$

Асимптотика функции Грина

Для использования полученных результатов нас интересует асимптотическое поведение функции Грина в окрестности точки $R \rightarrow 0$, $|y_{1,2} - y'_{1,2}| \rightarrow 0$. Асимптотика функции Грина имеет вид:

$$G(X_{1,2}, X'_{1,2}, E) \square$$

$$\square \ln(R\sqrt{E}) \left[\frac{2i}{d^3\sqrt{E}} (\delta(y_1 - y'_1) + \delta(y_2 - y'_2)) - \frac{2\pi}{d^2} \delta(y_1 - y'_1) \delta(y_2 - y'_2) - \frac{8}{\pi d^2} \right] +$$

$$+ \frac{1}{4\pi d} \left[\frac{4 + i\delta(y_1 - y'_1)}{\sqrt{R^2 + (y_2 - y'_2)^2}} + \frac{4 + i\delta(y_2 - y'_2)}{\sqrt{R^2 + (y_1 - y'_1)^2}} + \frac{4 + i\delta(y_1 - y'_1)}{\sqrt{R^2 + (y_2 + y'_2)^2}} + \frac{4 + i\delta(y_2 - y'_2)}{\sqrt{R^2 + (y_1 + y'_1)^2}} \right] +$$

$$+ \frac{i\sqrt{E}}{8\pi} \frac{1}{\sqrt{R^2 + (y_1 - y'_1)^2 + (y_2 - y'_2)^2}}. \quad (8)$$

Добавление еще одной частицы

Используя метод свертки, можно получить функцию Грина для трех невзаимодействующих частиц. Аналогичная процедура дает следующий результат:

$$G(X_{1,2,3}, X'_{1,2,3}, E) =$$

$$= \frac{1}{\pi^2 i} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_{n,m,k} \oint_L \frac{K_0\left(R\sqrt{\frac{\pi^2}{d^2}(n^2 + m^2) - E + \varsigma}\right) \exp\left(-R_3\sqrt{\pi^2 k^2 d^{-2} - \varsigma}\right)}{\sqrt{\pi^2 k^2 d^{-2} - \varsigma}} d\varsigma,$$

где

$$A_{n,m,k} = \frac{(\delta_{n0} + 1)(\delta_{m0} + 1)(\delta_{k0} + 1)}{d^3} \cos \frac{\pi n y_1}{d} \cos \frac{\pi n y'_1}{d} \cos \frac{\pi m y_2}{d} \cos \frac{\pi m y'_2}{d} \cos \frac{\pi k y_3}{d} \cos \frac{\pi k y'_3}{d}$$

И, окончательно,

$$G(X_{1,2,3}, X'_{1,2,3}, E) = \frac{2}{\pi R} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} A_{n,m,k} \exp\left(-R\sqrt{\frac{\pi^2}{d^2}(n^2 + m^2 + k^2) - E}\right), \quad (9)$$

где

$$R = \sqrt{(x_1 - x'_1)^2 + (x_2 - x'_2)^2 + (x_3 - x'_3)^2}.$$

Литература

1. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. Москва-Ижевск: РХД, 2002. 352 стр.
2. Popov I. Yu., Gortinskaya L.V., Gavrilov M.I., Pestov A.A., Tesovskaya E.S. Weakly coupled quantum wires and layers as an element of quantum computer. // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2006. V. 3. №2.
3. Popov I.Yu. // J. Math. Phys. 2002. V. 43. № 1. P. 215–234.
4. Гортинская Л.В., Тесовская Е.С., Попов И.Ю. // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). 2003. Выпуск 9. С. 22–28.
5. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Наука, 1971. 1108 с.

КВАНТОВЫЙ СЛОЙ С ДВУМЯ ЭЛЕКТРОНАМИ: ФУНКЦИЯ ГРИНА

Л.В. Гортинская, С.Б. Левин, И.Ю. Попов

Получена асимптотика функции Грина для двухчастичной задачи в системе нанослоев с граничными условиями Неймана. Использован метод свертки.

Вступление

Создание элементной базы квантового компьютера – одна из наиболее бурно развивающихся областей наноэлектроники. В настоящее время предложены несколько вариантов реализации квантовых вычислений, в частности, с использованием ядерного магнитного резонанса, ионных ловушек, сверхпроводящих эффектов, квантовых точек и др. [1]. В последнее время появилась идея использовать для этой цели резонансные эффекты в квантовых слоях и волноводах [2]. При описании электронного транспорта в металлических нанослоях задача сводится к решению уравнению Шредингера для свободного электрона в соответствующих областях, при этом граничные условия зависят от спина электрона и могут меняться при приложении внешнего магнитного поля. [3, 4]. Основой квантовых вычислений являются двухкубитовые операции, следовательно, требуется решить задачу о двух электронах.

В статье изучена функция Грина для случая двух невзаимодействующих частиц в трехмерных бесконечных слоях с граничными условиями Неймана. Для построения функции Грина используется метод свертки, базирующийся на представлении одночастичной функции Грина.

Функция Грина

Известна функция Грина для одной частицы:

$$g(X, X', \zeta) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{d(\delta_{n0} + 1)} \cos \frac{x_3 \pi n}{d} \cos \frac{x'_3 \pi n}{d} \cdot \frac{i}{4} H_0^{(1)} \left(i \sqrt{\frac{\pi^2 n^2}{d^2} - \zeta} \cdot \sqrt{(x_1 - x'_1)^2 + (x_2 - x'_2)^2} \right), \quad (1)$$

где $X \rightarrow ((x_1, y_1, z_1))$, $X' \rightarrow ((x'_1, y'_1, z'_1))$. Добавление в систему новой частицы эквивалентно возрастанию размерности пространства до $\mathbf{R}^6$, что соответствует трехчастичной задаче (роль третьей частицы играют границы области). В этом случае $\bar{X} \rightarrow ((x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2))$, $\bar{X}' \rightarrow ((x'_1, y'_1, z'_1), (x'_2, y'_2, z'_2))$. Будем искать функцию Грина как интеграл по контуру L вокруг спектра соответствующего оператора (спектр лежит на неотрицательной части вещественной оси):

$$G(\bar{X}, \bar{X}', E) = \frac{1}{2\pi i} \oint_L g_1(\bar{x}_1, \bar{x}'_1, \zeta) \cdot g_2(\bar{x}_2, \bar{x}'_2, E - \zeta) d\zeta, \quad (2)$$

Подставим известное выражение для функции Грина одной частицы (1) в (2):

$$G(\bar{X}, \bar{X}', E) = \frac{1}{2\pi i} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{4}{d^2(\delta_{n0} + 1)(\delta_{m0} + 1)} \cos \frac{z_1 \pi n}{d} \cos \frac{z'_1 \pi n}{d} \cos \frac{z_2 \pi m}{d} \cos \frac{z'_2 \pi m}{d} \cdot \left(\frac{i}{4} \right)^2 \cdot \oint_L H_0^{(1)} \left(i \sqrt{\frac{\pi^2 n^2}{d^2} - \zeta} \sqrt{(x_1 - x'_1)^2 + (y_1 - y'_1)^2} \right) \cdot H_0^{(1)} \left(i \sqrt{\frac{\pi^2 m^2}{d^2} - E + \zeta} \sqrt{(x_2 - x'_2)^2 + (y_2 - y'_2)^2} \right) d\zeta \quad (3)$$

Введем новые переменные: $R_1 = \sqrt{(x_1 - x'_1)^2 + (y_1 - y'_1)^2}$, $R_2 = \sqrt{(x_2 - x'_2)^2 + (y_2 - y'_2)^2}$,

$\eta = \frac{\zeta}{n^2}$, $\omega = \frac{E}{m^2}$. Будем вычислять интеграл

$$I = n^2 \oint_L H_0^{(1)} \left(in \sqrt{\frac{\pi^2}{d^2} - \eta R_1} \right) \cdot H_0^{(1)} \left(in \sqrt{\frac{\pi^2 m^2}{n^2 d^2} - w + \eta \cdot R_2} \right) d\eta. \quad (4)$$

Для вычисления интеграла разобьем его на четыре части и сведем к интегралу по вещественной переменной:

$$\begin{aligned} I = & n^2 \int_{\frac{\pi^2}{d^2}}^{\frac{\pi^2}{d^2}} H_0^{(1)} \left(in \cdot i \sqrt{\eta - \frac{\pi^2}{d^2} R_1} \right) \cdot H_0^{(1)} \left(in \sqrt{\eta - B_{n,m} \cdot R_2} \right) d\eta + \\ & n^2 \int_{\frac{\pi^2}{d^2}}^0 H_0^{(1)} \left(in \sqrt{\frac{\pi^2}{d^2} - \eta R_1} \right) \cdot H_0^{(1)} \left(in \sqrt{\eta - B_{n,m} R_2} \right) d\eta + \\ & n^2 \int_0^{\frac{\pi^2}{d^2}} H_0^{(1)} \left(in \sqrt{\frac{\pi^2}{d^2} - \eta R_1} \right) \cdot H_0^{(1)} \left(in \sqrt{\eta - B_{n,m} R_2} \right) d\eta + \\ & n^2 \int_{\frac{\pi^2}{d^2}}^{\infty} H_0^{(1)} \left(-in \cdot i \sqrt{\eta - \frac{\pi^2}{d^2} R_1} \right) \cdot H_0^{(1)} \left(in \sqrt{\eta - B_{n,m} \cdot R_2} \right) d\eta. \end{aligned}$$

После вычисления и замены переменной получим следующий интеграл:

$$I = -\frac{4n^2}{\pi i} \int_0^{\infty} J_0(ntR_1) \cdot K_0 \left(n \sqrt{t^2 + \frac{\pi^2}{d^2} - B_{n,m} \cdot R_2} \right) 2tdt \quad (5)$$

где $t = \sqrt{\eta - \frac{\pi^2}{d^2}}$. Используя формулу № 6.596.7 из [5], получим:

$$I = \frac{8i}{\pi R} \sqrt{\frac{\pi^2}{d^2} (n^2 + m^2) - E} \cdot K_1 \left(R \sqrt{\frac{\pi^2}{d^2} (n^2 + m^2) - E} \right). \quad (6)$$

Подставляя (6) в (3), получим функцию Грина для двух частиц.

$$G(\bar{X}, \bar{X}', E) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{-A_{n,m}}{4\pi^2 d^2 R} \sqrt{\frac{\pi^2}{d^2} (n^2 + m^2) - E} \cdot K_1 \left(R \sqrt{\frac{\pi^2}{d^2} (n^2 + m^2) - E} \right)$$

Рассмотрим частичные суммы

$$G(\bar{X}, \bar{X}', E) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M \frac{-A_{n,m}}{4\pi^2 d^2 R} \sqrt{\frac{\pi^2}{d^2} (n^2 + m^2) - E} \cdot K_1 \left(R \sqrt{\frac{\pi^2}{d^2} (n^2 + m^2) - E} \right) \quad (7)$$

Используя [5], приведем (7) к двойному интегралу:

$$G(\bar{X}, \bar{X}', E) = \frac{E}{2\pi^4 d} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{K_2 \left(d\pi^{-1} \sqrt{-E} \sqrt{\pi^2 R^2 d^{-2} + p^2 + t^2} \right)}{\pi^2 R^2 d^{-2} + p^2 + t^2} \cdot S_N(p, z_1) \cdot S_M(t, z_2) dt dp, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} S_N(t, z_1) &= \sum_{n=0}^N \frac{2}{\delta_{n0} + 1} \cos \frac{\pi n z_1}{d} \cos \frac{\pi n z'_1}{d} \cos nt = \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{\sin(N+1)\alpha_1}{\sin \alpha_1} + \frac{\sin(N+1)\alpha_2}{\sin \alpha_2} + \frac{\sin(N+1)\alpha_3}{\sin \alpha_3} + \frac{\sin(N+1)\alpha_4}{\sin \alpha_4} \right], \end{aligned}$$

$$\alpha_{1,2,3,4} = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{d} (z_1 \pm z'_1) \pm t \right).$$

Теперь рассмотрим предел частичных сумм при $N, M \rightarrow \infty$:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} S(N, t, y_1) = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} [\delta(\alpha_1 + \pi n) + \delta(\alpha_2 + \pi n) + \delta(\alpha_3 + \pi n) + \delta(\alpha_4 + \pi n)]. \quad (9)$$

Подставляя полученные пределы в выражение (8), для функции Грина находим:

$$G(X_{1,2}, X'_{1,2}, E) = \frac{E}{2d\pi^4} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{p=0}^1 \sum_{q=0}^1 \frac{K_2(\sqrt{-E} d \pi^{-1} Q_{p,q})}{Q_{p,q}},$$

где

$$Q_{p,q} = \frac{\pi}{2d} \left((z_1 + (-1)^p z'_1)^2 + (z_2 + (-1)^q z'_2)^2 + R^2 \right)^{1/2}.$$

Асимптотика функции Грина

Теперь рассмотрим асимптотику полученной функции Грина при $R \rightarrow 0$, $|z_{1,2} - z'_{1,2}| \rightarrow 0$. Для получения главного члена положим в (9) $n = 0$, $m = 0$. Тогда имеем:

$$G(X_{1,2}, X'_{1,2}, E) = \frac{E}{2\pi^4 d} \cdot \left[\frac{K_2(\sqrt{-E} \sqrt{(z_1 + z'_1)^2 + (z_2 + z'_2)^2 + R^2})}{(z_1 + z'_1)^2 + (z_2 + z'_2)^2 + R^2} + \frac{K_2(\sqrt{-E} \sqrt{(z_1 + z'_1)^2 + (z_2 - z'_2)^2 + R^2})}{(z_1 + z'_1)^2 + (z_2 - z'_2)^2 + R^2} + \right. \\ \left. \frac{K_2(\sqrt{-E} \sqrt{(z_1 - z'_1)^2 + (z_2 + z'_2)^2 + R^2})}{(z_1 - z'_1)^2 + (z_2 + z'_2)^2 + R^2} + \frac{K_2(\sqrt{-E} \sqrt{(z_1 - z'_1)^2 + (z_2 - z'_2)^2 + R^2})}{(z_1 - z'_1)^2 + (z_2 - z'_2)^2 + R^2} \right].$$

Используя асимптотику функции Макдональда, получим главный член асимптотического разложения функции Грина

$$G(X_{1,2}, X'_{1,2}, E) \square$$

$$\frac{4}{\pi^4} \left[\frac{1}{((z_1 + z'_1)^2 + (z_2 + z'_2)^2 + R^2)^2} + \frac{1}{((z_1 - z'_1)^2 + (z_2 + z'_2)^2 + R^2)^2} + \right. \\ \left. + \frac{1}{((z_1 + z'_1)^2 + (z_2 - z'_2)^2 + R^2)^2} + \frac{1}{((z_1 - z'_1)^2 + (z_2 - z'_2)^2 + R^2)^2} \right].$$

Работа поддержана грантом РФФИ № 05-03-32576

Литература

1. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. Москва-Ижевск: РХД, 2002. 352 с.
2. Popov I. Yu., Gortinskaya L.V., Gavrilov M.I., Pestov A.A., Tesovskaya E.S. Weakly coupled quantum wires and layers as an element of quantum computer. // Physics of Particles and Nuclei. Letters. 2006. V.3. №2.
3. Bruno P. // Phys. Rev. B 52 (1). 1995. P. 411–439.
4. Uzdin V.M., Yartseva N.S. // J. Magn. Magn. Mater. 1996. 156. P.193–194.
5. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений, Москва, 1963. 1108 с.

СМЕЩЕНИЕ РЕЗОНАНСА В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ ВОЛНОВОДОВ В СЛАБОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Н.А. Малина

Получены параметры резонанса в системе двух слабо связанных волноводов в поперечном электрическом поле. Используется метод согласования асимптотических разложений.

Вступление

Один из наиболее активно развивающихся разделов наноэлектроники в настоящее время связан с созданием элементной базы квантового компьютера. Предлагаются различные способы реализации, основанные на использовании ядерного магнитного резонанса, ионов в ловушках при лазерном охлаждении, сверхпроводящих устройств, фотонных кристаллов, квантовых точек и квантовых нитей. С последним из перечисленных вариантов и связана задача, рассматриваемая в данной работе. А именно, для создания соответствующих устройств необходимо уметь описывать поведение электрона в соответствующих структурах, особенно во внешних полях, с помощью которых может осуществляться управление. При прохождении электроном системы из двух связанных волноводов наблюдается резонансный эффект. Внешнее электрическое поле позволяет управлять параметрами резонанса, т.е. можно контролировать поведение электрона. Следует отметить, что внешнее электрическое поле может быть создано и другим электроном. В частности, такая ситуация наблюдается при реализации в данной системе как в элементе квантового компьютера двухкубитовых операций.

Рассмотрим систему двух плоских волноводов, связанных через малое отверстие, находящуюся в поперечном электрическом поле. Для описания поведения электрона в баллистическом режиме необходимо решить свободное уравнение Шредингера, т.е. уравнение Гельмгольца с соответствующими граничными условиями. Наиболее естественными для полупроводниковых наноструктур считаются условия Дирихле. В случае металлических наноструктур ситуация изменяется. Решающую роль играет спин электрона. В ферромагнитном слое положение энергетического уровня определяется ориентацией спина электрона. Таким образом, для электронов с различной ориентацией спина граничные условия различаются. Выбор соответствующих граничных условий зависит от существования свободных уровней в ферромагнитном слое соответствующего электрона. Например, отсутствие свободных уровней приводит к условиям Дирихле. Во всех остальных случаях рассматриваются другие условия, например, условия Неймана.

Волновод в электрическом поле

Рассмотрим уравнение, описывающее поведение электрона в волноводе шириной d с поперечным электрическим полем напряженности F :

$$\varphi'' + \frac{2m}{\hbar^2}(\lambda + Fy)\varphi = 0. \quad (1)$$

С помощью замены переменных

$$z = \left(y + \frac{\lambda}{F}\right)p^{\frac{1}{3}}, \quad p = \frac{2mF}{\hbar^2}, \quad (2)$$

уравнение сводится к уравнению Эйри:

$$\varphi''(z) + z\varphi(z) = 0, \quad (3)$$

решениями которого являются функции вида

$$\varphi(z) = CAi(-z) + DBi(-z), \quad (4)$$

где $Ai(-z)$ и $Bi(-z)$ - функции Эйри. Пусть на границах волновода выполняются условия Неймана: $\varphi'(0) = \varphi'(d) = 0$. Тогда, зная асимптотики функций Эйри при больших значениях z ,

$$\begin{aligned} Ai(-z) &= z^{-\frac{1}{4}} \left(\sin \left(\frac{2}{3} z^{\frac{3}{2}} + \frac{\pi}{4} \right) + o \left(z^{-\frac{3}{2}} \right) \right), \\ Bi(-z) &= z^{-\frac{1}{4}} \left(\cos \left(\frac{2}{3} z^{\frac{3}{2}} + \frac{\pi}{4} \right) + o \left(z^{-\frac{3}{2}} \right) \right), \end{aligned} \quad (5)$$

получаем уравнение для значения порога непрерывного спектра:

$$\lambda_1 - \frac{\pi}{d} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \lambda_1^{\frac{1}{2}} + \frac{dF}{4} = 0. \quad (6)$$

Отсюда

$$\sqrt{\lambda_1} = \sqrt{\Lambda_1} - \frac{1}{4} \frac{dF}{\sqrt{\Lambda_1}}, \quad (7)$$

где $\Lambda_1 = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2}$ - значение порога спектра невозмущенной задачи (в отсутствие электрического поля).

Стоит заметить, что выражение для первого порога (7) остается таким же в случае граничных условий Дирихле.

Связанные волноводы в электрическом поле

Рассмотрим систему двух плоских волноводов шириной d_+ и d_- , связанных через малое отверстие ширины $2a$, находящуюся в поперечном электрическом поле. Известно, что наличие соединяющего отверстия приводит к появлению резонанса. Параметры этого резонанса (квазисобственных значения) были исследованы ранее. Интересен вопрос о влиянии электрического поля на расположение резонанса.

Используя метод согласования асимптотических разложений решений краевых задач, будем искать коэффициенты τ_1 и τ_2 в асимптотическом разложении (по малому параметру a) для резонансной частоты следующего вида (здесь k_a^2 близко к порогу π^2 / d_+^2):

$$\sqrt{\frac{\pi^2}{d_+^2} - k_a^2} = \tau_1 \ln^{-1} a + \tau_2 \ln^{-2} a + o(\ln^{-2} a). \quad (8)$$

Нам понадобится функция Грина:

$$G_N^\pm(\bar{X}, \bar{X}', k) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\lambda_n - k^2}} \psi_n(-z) \psi_n(-z') e^{-\sqrt{\lambda_n - k^2}(x-x')}, \quad (9)$$

здесь $\psi_n(-z) = CAi\left(-p^{\frac{1}{3}}\left(y + \frac{\lambda_n}{F}\right)\right) + DBi\left(-p^{\frac{1}{3}}\left(y + \frac{\lambda_n}{F}\right)\right)$.

Асимптотики функций Грина в окрестности точки (0,0) границы области при значениях k^2 , близких к π^2 / d_+^2 , имеют вид:

$$G^+(\bar{X}, 0, k) = -\frac{1}{\pi} \ln |\bar{X}| + \frac{\psi_1^2\left(-\frac{\lambda_1}{F} p^{\frac{1}{3}}\right)}{\sqrt{\lambda_1 - k^2}} + g^+(\bar{X}), \quad (10)$$

$$G^-(\bar{X}, 0, k) = -\frac{1}{\pi} \ln |\bar{X}| + g^-(\bar{X}),$$

здесь функции $g^+(\bar{X})$, $g^-(\bar{X})$ регулярны. Тогда асимптотическое разложение квази-собственной функции $\psi_a(x)$ ищем в виде:

$$\psi_a(\bar{X}) = \begin{cases} \sqrt{\pi^2/d_+^2 - k_a^2} G^+(\bar{X}, 0, k_a) + \dots, & \bar{X} \in \Omega^+ \setminus S_{\sqrt{a}}, \\ v_0(|\bar{X}/a|) + v_1(|\bar{X}/a|) \cdot \ln^{-1} a + \dots, & \bar{X} \in S_{2\sqrt{a}}, \\ -\sqrt{\pi^2/d_+^2 - k_a^2} G^-(\bar{X}, 0, k_a) + \dots, & \bar{X} \in \Omega^- \setminus S_{\sqrt{a}}, \end{cases} \quad (11)$$

где S_t – круг радиуса t с центром в середине отверстия. Метод согласования сводится к поиску таких «склеивающих» функций $v_0(|\bar{X}/a|)$, $v_1(|\bar{X}/a|)$, удовлетворяющих краевым условиям Неймана и являющихся решениями уравнения (1), что члены соответствующих порядков в асимптотических разложениях (11) будут совпадать в областях $(\Omega^+ \setminus S_{\sqrt{a}}) \cap S_{2\sqrt{a}}$, $(\Omega^- \setminus S_{\sqrt{a}}) \cap S_{2\sqrt{a}}$. Можно легко показать, что функции $v_0(|\bar{X}/a|)$, $v_1(|\bar{X}/a|)$ должны удовлетворять уравнению Лапласа.

Выписывая коэффициенты при a^0 в асимптотике функции $\psi_a(\bar{X})$, получаем уравнение для нахождения τ_1 :

$$\psi_1^2 \left(-\frac{\lambda}{F} p^{\frac{1}{3}} \right) - \frac{1}{\pi} \tau_1 = v_0 = \frac{1}{\pi} \tau_1. \quad (12)$$

В качестве $v_0(|\bar{X}/a|)$ можно выбрать константу $v_0(\bar{X}/a) = \frac{1}{2} \psi_1^2 \left(-\frac{\lambda_1}{F} p^{\frac{1}{3}} \right)$, тогда

$$\tau_1 = \frac{\pi}{2} \psi_1^2 \left(-\frac{\lambda_1}{F} p^{\frac{1}{3}} \right). \quad (13)$$

Далее, приравнивая коэффициенты при $\ln^{-1} a$, получаем выражение для τ_2 :

$$\tau_2 = \frac{\pi}{2} \left(\frac{2\tau_1}{\pi} \ln 2 + \tau_1 (g^+(0) + g^-(0)) \right). \quad (14)$$

Здесь функция выбрана следующим образом:

$$v_1 \left(\frac{|\bar{X}|}{a} \right) = \begin{cases} -\frac{\tau_1}{\pi} (\ln |\bar{X}/a| + \ln 2) - A + \dots, & y > 0, \\ \frac{\tau_1}{\pi} (\ln |\bar{X}/a| + \ln 2) - A + \dots, & y < 0, \end{cases}$$

а константа A обеспечивает склеивание значений коэффициентов в верхнем и нижнем волноводах.

Чтобы понять, как сильно влияет электрическое поле на сдвиг резонанса, получим асимптотику для коэффициента τ_1 в формуле (13).

$$\tau_1 \approx \frac{\pi}{2d_+} + \frac{385}{48^2} \cdot \frac{F^2 \hbar^2 d_+^2}{2m\pi^2} \dots \quad (15)$$

Значение $\tau_1 = \frac{\pi}{2d_+}$ соответствует коэффициенту в асимптотике квазисобственного

значения для волноводов в отсутствие электрического поля.

Работа поддержана грантом РФФИ 05-03-32576.

Литература

1. Bruno P. // Phys. Rev. 1995. V. B 52. № 1. P. 411–439.
2. Uzdin V.M., Yartseva N.S. // J. Magn. Magn. Mater. 1996. V. 156. P.193–194.
3. Duclos P., Exner P. // Rev. Math. Phys. 1995. V. 7. P. 73–102.
4. Ильин А.М. Согласование асимптотических разложений решений краевых задач. М.: Наука, 1989. 334 с.
5. Гадыльшин Р.Р. // УМН. 1997. Т. 52. № 1, С.3–76.
6. Poroв I.Yu. // J. Math. Phys. 2002. V. 43. № 1. P. 215–234.
7. Гортинская Л.В., Тесовская Е.С., Попов И.Ю. // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). 2003. Выпуск 9. С. 22–28.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ МЕТОДА МНОГОЧЛЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ТЕОРИИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

С.Е. Иванов, Г.И. Мельников

Метод многочленных преобразований применен для исследования нелинейной динамической системы с тремя степенями свободы полиномиальной структуры с периодическими параметрами. Получены алгоритмические формулы метода, ориентированные на применение существующих математических пакетов программ. Они применяются при определении существенных качественных констант нелинейных динамических систем в задачах защиты приборов в условиях кинематических периодических возмущений.

При создании нелинейных механических устройств и приборов с требуемыми техническими свойствами необходимо формирование небольшого количества констант, характеризующих механическое состояние объектов из всего большого количества постоянных параметров. Такая проблема решается, в частности, в теории подобия линейных систем. Для нелинейных систем полиномиальной структуры Г.И. Мельниковым в 1963 г. разработан метод многочленных преобразований [1, 2], обобщающий метод Пуанкаре–Дюлака. В нем существенные качественные константы получены в виде некоторых многочленов, образованных из коэффициентов при нелинейных членах динамической системы. Данный метод применяется, например, в теории нелинейных колебаний, наряду с другими известными методами [3]. В ряде случаев преобразованные уравнения с малым количеством констант имеют достаточно простую рекуррентную структуру. Применение метода многочленного преобразования к сложным многомерным механическим системам приводит иногда к большому объему символьных вычислений. В условиях современного развития компьютерного моделирования такие вычисления необходимо выполнять с применением компьютерных пакетов символьных вычислений, а в особо сложных случаях преобразование производится при численных значениях констант, поскольку символьные расчеты могут потребовать неоправданно больших компьютерных ресурсов.

Ставится задача разработки алгоритмов, применяемых в математических компьютерных пакетах и предназначенных для расчета установившихся режимов колебаний нелинейных виброзащитных систем полиномиальной структуры с одной, двумя и тремя степенями свободы в условиях периодических кинематических возмущений, а также силового периодического возмущения.

Метод применяется к задаче виброзащиты приборов с тремя степенями свободы с использованием амортизаторов и демпферов с нелинейными характеристиками полиномиального типа, используемых в технических устройствах [4].

Рассмотрим математическую модель нелинейной механической системы с тремя степенями свободы, правые части которой содержат степенные многочлены до четвертой степени относительно фазовых переменных с периодическими и постоянными параметрами. Будем считать, что дифференциальные уравнения движения системы приведены к виду

$$I\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = \sum_{|v|=1}^4 h_v \cos^{v_1}(\omega t) \sin^{v_2}(\omega t) q_1^{v_3} q_2^{v_4} q_3^{v_5} \dot{q}_1^{v_6} \dot{q}_2^{v_7} \dot{q}_3^{v_8}, \quad (1)$$

Здесь в левой части находятся все линейные члены с постоянными коэффициентами, а в правой – степенные многочлены с постоянными и периодическими коэффициентами.

циентами, включая и линейные члены с периодическими коэффициентами, $q = [q_1, q_2, q_3]^T$ – вектор-столбец обобщенных координат системы, I, B, C – квадратные матрицы третьего порядка, $\nu = (\nu_1 \nu_2 \nu_3 \nu_4 \nu_5 \nu_6 \nu_7 \nu_8)$ – векторный индекс, $|\nu| = \nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_8$ – норма индекса, $h_\nu = [h_\nu^1, h_\nu^2, h_\nu^3]^T$ – трехэлементные векторы-столбцы постоянных коэффициентов.

Предположим, что характеристическое уравнение $\text{Det}[I\lambda^2 + B\lambda + C] = 0$ имеет три пары комплексно сопряженных корней $\lambda_s, \bar{\lambda}_s$ с малыми отрицательными вещественными частями и коэффициенты вектора нелинейной части малы: $|h_\nu^s| < \varepsilon$.

Введем две дополнительные экспоненциальные переменные $q_0 = \exp(i\omega t)$ и $\bar{q}_0 = \exp(-i\omega t)$, через которые запишем периодические функции

$$\cos(\omega t) = (q_0 + \bar{q}_0)/2, \quad \sin(\omega t) = (q_0 - \bar{q}_0)/(2i). \quad (2)$$

Запишем систему (1) в виде системы восьми дифференциальных уравнений первого порядка в нормальной форме Коши с фазовым вектором $X = [q_0 \bar{q}_0 q_1 q_2 q_3 \dot{q}_1 \dot{q}_2 \dot{q}_3]^T$:

$$\dot{X} = PX + R, \quad (3)$$

Предположим, что линейным неособым преобразованием

$$Y = DX \quad (4)$$

линейная часть системы (3) в условиях отсутствия кратных корней приводится к диагональному виду:

$$\dot{Y} = \Lambda Y + R|_{X \rightarrow D^{-1}Y}, \quad \Lambda = \text{diag}[\lambda_1, \bar{\lambda}_1, \dots, \lambda_4, \bar{\lambda}_4]. \quad (5)$$

Выполним преобразование, содержащее многочлены до четвертой степени включительно:

$$y_s = z_s + \sum_{|\nu|=2}^4 a_\nu^s Z^\nu, \quad (s=3, \dots, 8), \quad Z^\nu \equiv z_1^{\nu_1} z_2^{\nu_2} \dots z_8^{\nu_8}. \quad (6)$$

Здесь a_ν^s – постоянные коэффициенты, подлежащие определению. Отметим, что дополнительные экспоненциальные переменные остаются прежними: $y_s = z_s$ ($s=1, 2$).

Потребуем, чтобы преобразованная система содержала минимальное количество одночленов,

$$\dot{z}_s = \lambda_s z_s + \sum_{|\nu|=2}^4 q_\nu^s Z^\nu, \quad (s=3, \dots, 8), \quad (7)$$

где q_ν^s – искомые коэффициенты преобразованной системы. Здесь имеется 24 отличных от нуля коэффициентов со следующими значениями векторных индексов в нерезонансном случае:

для q_ν^3 : $\nu = (00100011), \nu = (00101100), \nu = (00210000), \nu = (11100000)$,

для q_ν^4 : $\nu = (00010011), \nu = (00011100), \nu = (00120000), \nu = (11010000)$,

для q_ν^5 : $\nu = (00001011), \nu = (00002100), \nu = (00111000), \nu = (11001000)$,

для q_ν^6 : $\nu = (00000111), \nu = (00001200), \nu = (00110100), \nu = (11000100)$,

для q_ν^7 : $\nu = (00000021), \nu = (00001110), \nu = (00110010), \nu = (11000010)$,

для q_ν^8 : $\nu = (00000012), \nu = (00001101), \nu = (00110001), \nu = (11000001)$,

Отметим, что в случае внешних или внутренних резонансов добавляются и другие коэффициенты с определенными особыми индексами.

Формулы для вычисления коэффициентов преобразованной системы и коэффициентов преобразования приведены ниже. Допустим, что преобразование (6), (7) выполнено. Преобразованную систему можно подвергнуть дальнейшему упрощению.

Выполним показательную замену переменных:

$$z_{1,2} \equiv \exp(\pm it\omega), z_s = \rho_s \exp(i(t \operatorname{Im} \lambda_s + \theta_s)), \bar{z}_{s+1} = \rho_s \exp(i(t \operatorname{Im} \lambda_{s+1} - \theta_s)), s = 3, 5, 7; \quad (8)$$

Получим в нерезонансном случае систему шести дифференциальных уравнений, в которой первые три уравнения отделены, а следующие три уравнения можно решать после интегрирования первых трех уравнений:

$$\dot{\rho}_s = \operatorname{Re}(\lambda_s) \rho_s + \operatorname{Re} \left(\sum_{|v|=2}^4 q_v^s \rho_3^{v_3+v_4} \rho_5^{v_5+v_6} \rho_7^{v_7+v_8} \right), \quad \dot{\theta}_s = \rho_s^{-1} \operatorname{Im} \left(\sum_{|v|=2}^4 q_v^s \rho_3^{v_3+v_4} \rho_5^{v_5+v_6} \rho_7^{v_7+v_8} \right). \quad (9)$$

Из (9) следует, что качество движения и устойчивости системы определяется 12 константами, входящими в первую группу уравнений, наряду с тремя константами $\operatorname{Re}(\lambda_s)$.

Стационарное решение динамической системы находится из уравнений, получаемых посредством приравнивания нулю правых частей первой группы уравнений:

$$\operatorname{Re}(\lambda_s) \rho_s + \operatorname{Re} \left(\sum_{|v|=2}^4 q_v^s \rho_3^{v_3+v_4} \rho_5^{v_5+v_6} \rho_7^{v_7+v_8} \right) = 0, \quad \operatorname{Im} \left(\sum_{|v|=2}^4 q_v^s \rho_3^{v_3+v_4} \rho_5^{v_5+v_6} \rho_7^{v_7+v_8} \right) = 0.$$

Подставляя стационарное решение в формулы замены переменных (8), можно найти вектор Z . Затем по формулам многочленной замены (6) определим вектор Y , и по формулам обратной линейной замены, $X = D^{-1}Y$, получается решение системы (1).

Приведем алгоритмические формулы метода многочленных преобразований для расчета коэффициентов преобразования и преобразованной системы, получаемых по методике [5]. Представим систему (5) в переменных Z многочленного преобразования (6):

$$\dot{y}_s = \lambda_s z_s + \lambda_s \sum_{|v|=2}^4 a_v^s Z^v + R_s(Z). \quad (10)$$

Учитывая (7), продифференцируем формулу многочленных преобразований (6):

$$\dot{y}_s = \lambda_s z_s + \sum_{|v|=2}^4 q_v^s Z^v + \sum_{|v|=2}^4 (a_v^s Z^v \sum_{k=1}^8 \lambda_k v_k) + \sum_{|v|=2}^4 (a_v^s Z^v \sum_{k=3}^8 v_k z_k^{-1} \sum_{|\mu|=2}^4 q_\mu^k Z^\mu). \quad (11)$$

Приравнявая выражения (10) и (11), получим равенство:

$$\sum_{|v|=2}^4 (a_v^s Z^v \sum_{k=3}^8 v_k z_k^{-1} \sum_{|\mu|=2}^4 q_\mu^k Z^\mu) + \sum_{|v|=2}^4 (a_v^s Z^v (\sum_{k=1}^8 \lambda_k v_k - \lambda_s)) + \sum_{|v|=2}^4 q_v^s Z^v = R_s(Z), \quad (s = 3, \dots, 8). \quad (12)$$

Для определения неизвестных коэффициентов преобразования и преобразованной системы приравняем в (12) коэффициенты при одинаковых векторных степенях Z , в результате чего получаем рекуррентную систему алгебраических уравнений.

Рассмотрена нелинейная динамическая система полиномиальной структуры с периодическими коэффициентами. Нелинейные части системы представлены в виде многочленов до четвертой степени включительно относительно фазовых координат с периодическими коэффициентами. Исследование системы предлагается проводить методом нормализующих многочленных преобразований. Приведена структура алгоритмов метода и процедура определения установившихся процессов вынужденных колебаний нелинейных динамических систем с одной, двумя и тремя степенями свободы. Показан алгоритм программной реализации метода. В результате многочленных преобразований нелинейная периодическая система приводится к автономному виду с принятой точностью до многочленов четвертой степени. Выделены существенные константы системы в виде коэффициентов при нелинейных членах преобразованных уравнений, наряду с вещественными и мнимыми частями корней характеристического уравнения

линейной части системы. Показан процесс определения периодического режима колебаний в нерезонансных случаях. Алгоритмы применены при практических расчетах в задаче виброзащиты систем с одной, двумя и тремя степенями свободы.

Работа поддержана грантом РФФИ 06-08-01338-а

Литература

1. Мельников Г.И. Динамика нелинейных механических и электромеханических систем. Л: Машиностроение, 1975. 198 с.
2. Мельников Г.И. К теории нелинейных колебаний. // Вестник ЛГУ. 1964. №1. Вып.1. С. 88–98.
3. Фролов К.В. Нелинейные задачи динамики машин. М: Машиностроение, 1992. 376 с.
4. Фурман Ф.А., Фролов К.В. Прикладная теория виброзащитных систем. М: Машиностроение, 1980. 317 с.
5. Иванов С.Е. О реализации численно-аналитического метода многочленных преобразований на компьютере. // Современные технологии: Труды молодых ученых ИТМО / Под ред. проф. С.А. Козлова. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. С. 138–141.

КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ НЕЛИНЕЙНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А.Г. Кривошеев

Для нелинейной механической системы с двумя степенями свободы при периодическом возмущении формулируются условия существования установившихся режимов одночастотных колебаний при наличии кратного внешнего резонанса.

Введение

В [1–3] развит метод многочленного преобразования динамических уравнений движения нелинейных механических систем с конечным числом степеней свободы. Этот метод применим к колебательным системам, для которых характерна малость вещественных частей собственных чисел матрицы линейной части уравнений. Многочленное преобразование может выполняться численно-аналитическим способом с применением ПК [4, 5].

В данной работе продолжено исследование нелинейной нестационарной колебательной механической системы с двумя степенями свободы в случае внешнего кратного резонанса. Алгоритмы многочленного преобразования динамических уравнений такой системы изложен в [8]. В результате замены фазовых переменных изучаемой механической системы получена ее математическая модель в виде автономной дифференциальной системы уравнений. Полученная дифференциальная система уравнений позволяет провести качественный анализ стационарных режимов колебаний механической системы, а также построить количественные оценки переходных режимов колебаний. Стационарным режимам колебаний соответствуют стационарные решения полученной автономной дифференциальной системы. Здесь рассматривается существование искомых стационарных решений и формулируются критерии их устойчивости по первому приближению.

1. Постановка задачи

Рассмотрим механическую систему с двумя степенями свободы и с голономными нестационарными периодическими связями. Допустим, что ее уравнения Лагранжа имеют матричный вид

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = h_1 \cos \omega_0 t + h_2 \sin \omega_0 t + \sum_{|\nu|=2}^3 h_\nu \cdot \cos^{\nu_0} \omega_0 t \cdot \sin^{\nu'_0} \omega_0 t \cdot q_1^{\nu_1} \cdot q_2^{\nu_2} \cdot \dot{q}_1^{\nu'_1} \cdot \dot{q}_2^{\nu'_2} \quad (1)$$

Здесь $q = [q_1 q_2]^T$ – вектор обобщенных координат системы; A, B, C – постоянные матрицы, причем матрица A – обратимая; $h_1, h_2, h_\nu = [h_\nu^1, h_\nu^2]^T$ – постоянные векторы; суммирование ведется по векторному индексу $\nu = [\nu_0 \nu_1 \nu_2 \nu'_0 \nu'_1 \nu'_2]$ с нормой $|\nu| = \nu_0 + \nu_1 + \dots + \nu'_2$. Предположим, что характеристическое уравнение $\det[A\lambda^2 + B\lambda + C] = 0$ имеет сопряженные комплексные корни $\lambda_s = \alpha_s + i\omega_s$, $\bar{\lambda}_s = \alpha_s - i\omega_s$, $\omega_s > 0$, $s = 1, 2$ с малыми ненулевыми вещественными частями и различными мнимыми частями:

$$\max |\alpha_s| = \varepsilon \ll \omega_j, \quad j = 0, 1, 2; \quad |\omega_1 - \omega_2| \gg \varepsilon.$$

К изучению рассматриваемой механической системы при достаточно малых коэффициентах h_v^s применим метод многочленного преобразования с целью получения динамических уравнений в наиболее простом виде.

При сделанных предположениях результат многочленного преобразования существенно зависит от наличия резонансных соотношений

$$\left| k_0 \omega_0 + k_1 \omega_1 + k_2 \omega_2 \right| \approx \varepsilon, \quad k_j = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \quad 2 \leq \sum_{j=0}^2 |k_j| \leq 4. \quad (2)$$

Исходные уравнения (1) при условии отсутствия резонансных соотношений (2) рассмотрены в [6]; резонанс вида $\omega_1 \approx \omega_0$ изучен в [7]. В данной работе продолжено рассмотрение случая резонанса $\omega_1 \approx 2\omega_0$.

2. Применение метода многочленного преобразования

Алгоритм применения метода в поставленной задаче подробно изложен в [8]. Он состоит в последовательном выполнении линейной, а затем нелинейной полиномиальной, замене фазовых переменных системы (1). В результате получена дифференциальная система уравнений, первые три уравнения которой имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{z}_0 &= i\omega_0 z_0, \quad z_0(0) = 1; \\ \dot{z}_1 &= \left(\lambda_1 + \tilde{p}_0^1 + \tilde{p}_1^1 z_1 \bar{z}_1 + \tilde{p}_2^1 z_2 \bar{z}_2 \right) z_1 + \tilde{p} z_0^2; \\ \dot{z}_2 &= \left(\lambda_2 + \tilde{p}_0^2 + \tilde{p}_1^2 z_1 \bar{z}_1 + \tilde{p}_2^2 z_2 \bar{z}_2 \right) z_2; \end{aligned} \quad (3)$$

а остальные три уравнения являются попарно комплексно сопряженными с ними. В уравнениях (3) при коэффициентах $\tilde{p}_j^s = a_{sj} + i b_{sj}$ используется скалярный индекс $j = 0, 1, 2$; для резонансного векторного индекса введен коэффициент $\tilde{p} = c \exp i\vartheta$.

Уравнения (3) содержат переменную $z_0 = \exp i\omega_0 t$ и не являются автономными, но путем замены переменных $z_1 = z_0^2 u_1$; $z_2 = u_2$ приводятся к двум автономным уравнениям относительно переменных u_1, u_2 :

$$\begin{aligned} \dot{u}_1 &= \left(\lambda_1 - 2\lambda_0 + \tilde{p}_0^1 + \tilde{p}_1^1 u_1 \bar{u}_1 + \tilde{p}_2^1 u_2 \bar{u}_2 \right) u_1; \\ \dot{u}_2 &= \left(\lambda_2 + \tilde{p}_0^2 + \tilde{p}_1^2 u_1 \bar{u}_1 + \tilde{p}_2^2 u_2 \bar{u}_2 \right) u_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Представив в уравнениях (4) переменные $u_1 = \rho_1 \exp i(\varphi_1 + \vartheta)$; $u_2 = \rho_2 \exp i\varphi_2$ и разделив вещественные и мнимые части этих уравнений, получаем автономную дифференциальную систему уравнений относительно переменных $\rho_s, \varphi_s, s = 1, 2$ с вещественными коэффициентами:

$$\begin{cases} \dot{\rho}_1 = (a_1 + a_{11}\rho_1^2 + a_{12}\rho_2^2) \rho_1 + c \cos \varphi_1 \equiv R_1; \\ \dot{\varphi}_1 = b_1 + b_{11}\rho_1^2 + b_{12}\rho_2^2 - \frac{c \sin \varphi_1}{\rho_1} \equiv \Phi_1; \\ \dot{\rho}_2 = (a_2 + a_{21}\rho_1^2 + a_{22}\rho_2^2) \rho_2 \equiv R_2; \\ \dot{\varphi}_2 = b_2 + b_{21}\rho_1^2 + b_{22}\rho_2^2, \end{cases} \quad (5)$$

где $a_1 = \alpha_1 + a_{10}$; $b_1 = \omega_1 - 2\omega_0 + b_{10}$; $a_2 = \alpha_2 + a_{20}$; $b_2 = \omega_2 + b_{20}$, а также введены обозначения функций, стоящих в правых частях первых трех уравнений. В системе (5) замкнуты первые три уравнения относительно трех «медленных» переменных: двух амплитудных

переменных ρ_1, ρ_2 и одной фазовой переменной φ_1 . Коэффициенты этой системы будем считать ненулевыми константами одинакового порядка малости.

3. Определение стационарных режимов колебаний

Стационарные режимы колебаний рассматриваемой механической системы определяются существованием стационарных решений вида $\rho_{s*} = 0, s = 1, 2$. Тривиальному решению $\rho_{s*} = 0, s = 1, 2$ соответствуют одночастотные колебания с возмущающей частотой ω_0 . К таким колебаниям могут добавляться колебания с частотами ω_{1*} или ω_{2*} (близкими к собственным частотам ω_1, ω_2), если имеются соответствующие решения $\rho_{s*} \neq 0$. Среди всех выявленных стационарных режимов колебаний интерес представляют, прежде всего, устойчивые режимы.

Для изучаемых резонансных колебаний система (5) не имеет тривиального решения. Рассмотрим задачу определения ее стационарных решений вида $\rho_{1*} \neq 0, \varphi_{1*} \neq 0, \rho_{2*} = 0$. Она сводится к нахождению корней алгебраической системы уравнений

$$\begin{cases} (a_1 + a_{11}\rho_{1*}^2)\rho_{1*} + c \cos \varphi_{1*} = 0; \\ (b_1 + b_{11}\rho_{1*}^2)\rho_{1*} - c \sin \varphi_{1*} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Исключая φ_{1*} с помощью основного тригонометрического тождества, получаем кубическое уравнение относительно квадрата амплитуды $r_1 = \rho_{1*}^2$:

$$c_0 r_1^3 + c_1 r_1^2 + c_2 r_1 + c_3 = 0 \quad (7)$$

с коэффициентами $c_0 = a_{11}^2 + b_{11}^2 > 0$; $c_1 = 2(a_1 a_{11} + b_1 b_{11})$; $c_2 = a_1^2 + b_1^2$; $c_3 = -c^2 < 0$.

Согласно теореме Виета, произведение всех трех корней уравнения (7) равно положительному числу $-c_3 / c_0$. Следовательно, уравнение имеет, по крайней мере, один положительный корень. Возможен случай, когда все три корня будут положительными. Для каждого найденного корня ρ_{1*} из системы (6) легко определить соответствующее стационарное значение фазы φ_{1*} .

Таким образом, колебания механической системы с возмущающей частотой ω_0 всегда сопровождаются возбуждением колебаний с собственной частотой $\omega_1 \approx 2\omega_0$, для которых важным вопросом является их устойчивость.

4. Критерии устойчивости стационарных режимов колебаний

Матрица линейного приближения первых трех уравнений системы (5) в окрестности стационарного решения $\rho_{1*}, \varphi_{1*}, \rho_{2*} = 0$ имеет структуру ненулевых элементов

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial R_1}{\partial \rho_1} & \frac{\partial R_1}{\partial \varphi_1} & 0 \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial \rho_1} & \frac{\partial \Phi_1}{\partial \varphi_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial R_2}{\partial \rho_2} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

которая представлена соответствующими частными производными, вычисленными при стационарных значениях переменных.

Одно из собственных чисел матрицы (8) определяется непосредственно, а для анализа двух других чисел применим критерий Гурвица. В результате необходимые и достаточные условия отрицательности вещественных частей собственных чисел матрицы линейного приближения формулируются в виде следующих неравенств:

$$\begin{cases} a_1 + 2a_{11}\rho_{1*}^2 < 0; \\ (a_1 + a_{11}\rho_{1*}^2)(a_1 + 3a_{11}\rho_{1*}^2) + (b_1 + b_{11}\rho_{1*}^2)(b_1 + 3b_{11}\rho_{1*}^2) > 0; \\ a_2 + a_{21}\rho_{1*}^2 < 0. \end{cases} \quad (9)$$

При выводе первых двух неравенств (9) стационарная фаза φ_{1*} исключена с использованием уравнений (6). Заметим, что достаточными условиями являются отрицательные значения коэффициентов $a_1, a_{11}, b_1, b_{11}, a_2, a_{21}$.

Заключение

Для нелинейной колебательной механической системы с двумя степенями свободы и с периодическим возмущением ее динамические уравнения методом многочленного преобразования приведены к автономной рекуррентной дифференциальной системе четвертого порядка в случае внешнего кратного резонанса. Коэффициенты полученной дифференциальной системы являются существенными константами рассматриваемой механической системы, на основе которых решена задача определения стационарных режимов резонансных колебаний и сформулированы критерии их устойчивости.

Работа поддержана грантом РФФИ 06-08-01338.

Литература

1. Мельников Г.И. К теории нелинейных колебаний. // Вестник ЛГУ. 1964. №1. С. 88–98.
2. Мельников Г.И. О характере затухания возмущенного движения в двух особых случаях // Вестник ЛГУ. 1965. №19. С. 99–111.
3. Мельников Г.И. Динамика нелинейных механических и электромеханических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 200 с.
4. Кривошеев А.Г., Мельников Г.И. Вынужденные колебания механических систем с нелинейными характеристиками полиномиального вида. // Прикладная механика. 1990. Т. 26. №1. С. 108–113.
5. Мельников Г.И., Кривошеев А.Г. О многочленном преобразовании нелинейных динамических уравнений. // Проблемы алгебры и кибернетики. Материалы международной конференции. Гомель, 1995. С. 66.
6. Мельников Г.И., Кривошеев А.Г. О применении метода многочленных преобразований к теории нелинейных колебаний. / В сб. «Проблемы Пространства, Времени, Движения». Т. II. СПб, 1997. С. 185–190.
7. Кривошеев А.Г. Вынужденные резонансные колебания нелинейной системы с двумя степенями свободы. // Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ). 2001. Выпуск 3. С. 5–8.
8. Кривошеев А.Г. Вынужденные колебания нелинейной системы при резонансах высших порядков. // Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ). 2005. Выпуск 19. С. 12–15.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЧНОЙ ФОРМЫ УРАВНЕНИЙ ЛАГРАНЖА В КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

С.Е. Иванов, В.Г. Мельников

Динамические уравнения голономной стационарной системы с двумя степенями свободы представлены в матричной строчной форме, а также в нормальной матричной форме Коши, удобной для применения системы MatLab в учебном процессе. В ней четырехэлементный фазовый вектор объекта представлен вектором-строкой. Предполагается, что матрица инерции постоянна и к системе приложены линейные диссипативные, квазиупругие и возмущающие силы. Система динамических уравнений Лагранжа представлена в матричной строчной форме, а также в нормальной форме Коши, при этом применен прием горизонтальной и вертикальной конкатенации блочных матриц. Приведено обобщение на системы с конечным числом степеней свободы.

Рассмотрим матричные уравнения Лагранжа двухстепенной голономной стационарной механической системы. Они содержатся в [1, 2] в матричной столбцовой форме, мы представим их в строчной форме, удобной для применения MatLab. Кинетическая энергия двухстепенной стационарной механической системы (МС) приводится к виду однородной квадратичной формы относительно обобщенных скоростей с постоянными или зависящими от обобщенных координат коэффициентами:

$$2T = a_{11}\dot{q}_1^2 + a_{22}\dot{q}_2^2 + 2a_{12}\dot{q}_1\dot{q}_2 = \dot{q}A\{\dot{q}\} = uAu^T \text{ при } u = \dot{q}, u = [u_1, u_2] = [\dot{q}_1, \dot{q}_2]. \quad (1)$$

Здесь $q = [q_1, q_2]$ и $u = [u_1, u_2]$ – вектор-строки обобщенных координат и обобщенных скоростей, $V = [u, q] = [u_1, u_2, q_1, q_2]$ – фазовый вектор, определяющий кинематическое состояние механической системы, $\{q\} = q^T, \{\dot{q}\} = \dot{q}^T, \{V\} = V^T$ – транспонированные векторы, т.е. векторы-столбцы обобщенных координат, обобщенных скоростей и фазового вектора системы, $A_0 = [a_{11}, a_{12}; a_{21}, a_{22}]$ – симметрическая квадратная 2×2 -матрица инерции МС, постоянная или зависящая от обобщенных координат. В дальнейшем будем считать матрицу A постоянной.

Допустим, что к механической системе приложена система сил $\bar{F}_i$ ($i=1, \dots, n_1$) и система пар сил с моментами $\bar{M}_j$ ($j=1, \dots, n_2$). Для определенности при вычислении кинетической энергии и обобщенных сил целесообразно рассматривать положительное состояние системы, при котором все фазовые координаты положительны: $V > 0 \Leftrightarrow [u_1 > 0, u_2 > 0, q_1 > 0, q_2 > 0]$. Однако в некоторых случаях (например, при наличии сухого или квадратичного трения) необходима проверка получаемых обобщенных сил и для неположительных состояний, что может привести к появлению двойных знаков в выражениях обобщенных сил.

Скорости $\bar{v}_i$ точек приложенных сил и угловые скорости $\bar{\omega}_i$ тел, к которым приложены пары сил, разложим на две составляющие, соответствующие обобщенным скоростям:

$$\bar{v}_i = v_i^{(1)}u_1 + v_i^{(2)}u_2, \quad \bar{\omega}_i = \omega_i^{(1)}u_1 + \omega_i^{(2)}u_2. \quad (2)$$

Мощность системы сил и пар сил, приложенных к МС, определяется следующим образом:

$$P = \sum_1^{n_1} \bar{F}_i \cdot \bar{v}_i + \sum_1^{n_2} \bar{M}_j \cdot \bar{\omega}_j = \left(\sum_1^{n_1} \bar{F}_i \cdot \bar{v}_i^{(1)} + \sum_1^{n_2} \bar{M}_j \cdot \bar{\omega}_j^{(1)} \right) u_1 + \left(\sum_1^{n_1} \bar{F}_i \cdot \bar{v}_i^{(2)} + \sum_1^{n_2} \bar{M}_j \cdot \bar{\omega}_j^{(2)} \right) u_2. \quad (3)$$

После перегруппировки слагаемых и вынесения общих множителей при очевидных обозначениях получаем:

$$P = Q_1u_1 + Q_2u_2 = Q\{u\} \text{ при } Q = [Q_1, Q_2], \quad (4)$$

$$Q_1 = \sum_1^{n_1} \bar{F}_i \cdot \bar{V}_i^{(1)} + \sum_1^{n_2} \bar{M}_j \cdot \bar{\omega}_j^{(1)}, Q_2 = \sum_1^{n_1} \bar{F}_i \cdot \bar{V}_i^{(2)} + \sum_1^{n_2} \bar{M}_j \cdot \bar{\omega}_j^{(2)}.$$

Коэффициенты Q_1, Q_2 в выражении мощности системы сил, стоящие при обобщенных скоростях, называются обобщенными силами, Q – вектор-строка обобщенных сил. Обобщенные силы Q_1 и Q_2 можно находить отдельно, как мощность системы приложенных сил на первой единичной скорости $[u_1 = 1, u_2 = 0]$ и на второй единичной скорости $[u_1 = 0, u_2 = 1]$, но при этом силы рассматриваются в общем, естественном виде, в положительном состоянии $V = [u_1 > 0, u_2 > 0, q_1 > 0, q_2 > 0], t > 0$.

Будем считать, что к МС приложены три системы сил: квазиупругие (или позиционные) силы, диссипативные силы, возмущающие гармонические и нелинейные силы. Для каждой системы сил можно отдельно вычислять обобщенные силы. В таком случае вектор-строка обобщенных сил разделяется на четыре слагаемых:

$$Q = Q^{yn} + Q^{duc} + Q^{803M} + Q^* = -qC_0 - uB_0 + F_0 \cos(pt) + Q^*. \quad (5)$$

Здесь $C_0 = [c_{11}, c_{12}; c_{21}, c_{22}]$ – квазиупругая постоянная 2×2 -матрица, $B_0 = [b_{11}, b_{12}; b_{21}, b_{22}]$ – диссипативная постоянная 2×2 -матрица, $F_0 = [F_{01}, F_{02}]$ – вектор-строка амплитудных коэффициентов обобщенных возмущающих сил, $Q^* = [Q_1^*, Q_2^*]$ – вектор-строка обобщенных нелинейных сил.

На основании классических уравнений Лагранжа получаем систему двух дифференциальных уравнений в матричной строчной форме:

$$\ddot{q}A_0 + \dot{q}B_0 + qC_0 = F_0 \cos(pt) + Q^*. \quad (6)$$

С целью уменьшения количества постоянных параметров в уравнениях матричное динамическое уравнение умножим на обратную матрицу инерции $I = A_0^{-1}$:

$$\ddot{q} + \dot{q}B + qC = F \cos(pt) + \tilde{Q}, \quad (7)$$

$$B = B_0 I, C = C_0 I, F = F_0 I, \tilde{Q} = Q^* I, \quad (8)$$

$$I = [a_{11}, a_{12}; a_{21}, a_{22}]^{-1} = [a_{22}, -a_{12}; -a_{12}, a_{11}] / (a_{11}a_{22} - a_{12}^2).$$

Введем в рассмотрение единичную E_2 и нулевую O_2 матрицы второго порядка [3, 4]. Преобразуем уравнение (7) к нормальной форме Коши, добавив некоторые нулевые слагаемые и применяя операции вертикальной конкатенации (сцепления) матриц в блочную матрицу:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= -uB - qC + F_0 \cos(pt) + \tilde{Q} \\ \dot{q} &= u \end{aligned} \quad \text{или} \quad \begin{aligned} \dot{u} &= V[-B; -C] + F_0 E_2 \cos(pt) + \tilde{Q} E_2 \\ \dot{q} &= V[E_2; O_2] \end{aligned}, \quad (9)$$

$$\text{где } V = [u, q], E_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, O_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Выполним горизонтальную конкатенацию (сцепление, объединение) матричных уравнений (9). Получим одно матричное динамическое уравнение в форме Коши вида:

$$\dot{V} = VK + H \cos(pt) + Q_0, \quad (10)$$

где

$$K = \begin{bmatrix} -B & E_2 \\ -C & O_2 \end{bmatrix}, H = F_0 E, Q_0 = \tilde{Q} E, E = [E_2, O_2]. \quad (11)$$

Далее рассматриваем случай линейной системы: $\tilde{Q} = [0, 0]$. Комплексные корни характеристического уравнения системы (6) определяются как собственные значения матрицы K либо находятся в результате решения уравнения

$$\det(E_2 \lambda^2 + B \lambda + C) = 0. \quad (12)$$

Вынужденные колебания определяются методом комплексных амплитуд [5]. А именно, вместо уравнения (7) рассматривается дифференциальное уравнение в комплексной форме

$$\ddot{\tilde{q}} + \dot{\tilde{q}}B + \tilde{q}C = F \exp(ipt), i = \sqrt{-1}. \quad (13)$$

Комплексное периодическое решение находится в показательной форме $\tilde{q} = f \exp(ipt)$.

Подставляя его в уравнение (13), получаем матричное алгебраическое уравнение

$$-fp^2 + ifpB + fC = F. \quad (14)$$

Отсюда находим вектор-строку комплексных коэффициентов:

$$f = F(C - p^2 E_2 + ipB)^{-1}. \quad (15)$$

Уравнение вынужденных колебаний для вектора-строки $q = [q_1, q_2]$ определяется в виде

$$q = \operatorname{Re}(f \exp(ipt)). \quad (16)$$

Расчеты вынужденных колебаний по формулам (15), (16), а также по определению собственных значений матрицы K легко выполняются в системе MatLab.

Динамические уравнения линейных голономных стационарных систем с n степенями свободы аналогичны уравнениям (6), (7), (10), (13) при условии, что матрицы коэффициентов этих уравнений имеют более высокий порядок.

В общем случае нелинейной двухстепенной системы, когда вектор-строка нелинейных обобщенных сил отлична от нуля, $Q \neq [0, 0]$ и задано начальное состояние $V(0) = V_0$, интегрирование динамической системы (10) выполняется численно в системе MatLab.

Рассматривается голономная стационарная линейная система с двумя степенями свободы в условиях периодических возмущений. Динамические уравнения Лагранжа представлены в матричной форме Коши. Определение свободных и вынужденных колебаний системы ориентировано на применение пакета MatLab, где отдается предпочтение удобной для применения строчной форме записи векторов состояния и прочих векторов и систем динамических уравнений. Система динамических уравнений представлена в матричной форме, приведены расчетные формулы. В системе MathCad данные уравнения можно применять в столбцовой форме после выполнения операции транспонирования каждого уравнения.

Работа поддержана грантом РФФИ 06-08-01338-а

Литература

1. Мельников Г.И. Учебное пособие для слушателей УПК и студентов. Л.: ЛИТМО, 1984. 176 с.
2. Мельников Г.И. Нормальные матричные формы уравнений динамики голономных систем. / Сборник научно-методических статей по теоретической механике. М.: Высшая школа, 1987. С. 103–108.
3. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.П. Матричные вычисления. М.: Наука, 1984. 390 с.
4. Фаддеев В.К., Фаддеева В.Н. Вычислительные методы линейной алгебры. М.: Физматгиз, 1963. 530с.
5. Вибрации в технике. Справочник. Т.1. Колебания линейных систем./ Под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение, 1999. 304с.

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЕМКОСТИ ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА БЕСЩЕЛЕВОГО ПОЛУПРОВОДНИКА ОТ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИ КОМНАТНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

О.Ю. Шевченко, В.Б. Божевольнов, А.Д. Перепелкин, А.М. Яфясов

Предложена методика оценки электронных параметров (величины матричного элемента оператора квазиимпульса, эффективной массы электронов, положения уровня Ферми) бесщелевых полупроводников в рамках классического описания области пространственного заряда при комнатной температуре. Получен критерий ее применимости. Проведена оценка электронных параметров и определен критерий точности методики для бесщелевого соединения HgSe.

Введение

Исследование бесщелевых и узкощелевых полупроводников на сегодняшний день является одним из основных направлений микроэлектроники. Это обусловлено возможностью использования этих материалов в качестве основы для создания быстродействующих полупроводниковых приборов, гетероструктур, квантовых интерференционных структур [1]. Однако в настоящее время электронные свойства бесщелевых полупроводников изучены недостаточно. Особенно мало информации об электронных параметрах поверхности и приповерхностного слоя этих соединений при высоких температурах.

Для экспериментального исследования электронных свойств поверхности и приповерхностной области бесщелевых полупроводников HgSe при комнатной температуре использован метод эффекта поля в системе полупроводник – электролит ЭППЭ [2]. Определена величина матричного элемента оператора квазиимпульса, эффективная масса электронов для этого соединения.

Методика расчета

Закон дисперсии для узкощелевых полупроводников в кейновском представлении обычно записывается в виде [3]

$$s\hbar k = \frac{E(E + E_g)(E + E_g + \Delta)}{\frac{3}{2}(E + E_g) + \Delta} = E(E + E_g) \frac{1 + \frac{E + E_g}{\Delta}}{1 + \frac{3(E + E_g)}{\Delta}}. \quad (1)$$

Для бесщелевых полупроводников в приближении $\Delta \rightarrow \infty$ и $E_g = 0$ выражение (1) можно переписать в виде (псевдоульtrarелятивистский случай)

$$E \cong ps - \frac{|E_g|}{2} = s\hbar k - \frac{|E_g|}{2}, \quad (2)$$

где $s = \sqrt{\frac{2}{3}}P$. Плотность состояний в интервале изменения квазиимпульса $p, p + dp$ может быть рассчитана из соотношения

$$D(E) = \frac{2}{(2\pi)^3} \int_s \frac{dS}{\nabla_p E} = \left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\left(E + \frac{|E_g|}{2}\right)^2}{\pi^2 P^3}. \quad (3)$$

Поскольку у бесщелевых полупроводников уровень Ферми находится выше дна зоны проводимости, то практически во всем обогащенном электронами слое на поверхности соблюдены условия сильного вырождения электронного газа, т.е. справедливо выражение $\mu(z) \gg k_0 T$, где $\mu(z) = qV(z) + \mu_b$ ($\mu_b \equiv E_F$ в объеме проводника, т.е. при $z \rightarrow \infty$). Выражение для локальной концентрации электронов ($n(z) = n(\mu)$) в ОПЗ с учетом (3) можно получить в виде

$$n(\mu) = \int_0^\mu D(E) dE = \left(\frac{3}{8}\right)^{1/2} \frac{\left(\mu + \frac{|E_g|}{2}\right)^3}{\pi^2 P^3}. \quad (4)$$

Используя (4), плотность заряда в ОПЗ может быть рассчитана по формуле

$$Q_{sc} = \varepsilon_0 \varepsilon_{sc} \frac{dV}{dz} \Big|_{V=V_s} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{sc}}{q} \frac{d\mu}{dz} \Big|_{\mu=\mu_3}. \quad (5)$$

Производную в формуле (5) можно вычислить аналитически:

$$\left| \frac{d\mu}{dz} \right|_{\mu=\mu_3} = \sqrt{\frac{2q^2}{\varepsilon_0 \varepsilon_{sc}}} \left[\int_{\mu_b}^{\mu_s} n(\mu) d\mu \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Используя (6), а также определение дифференциальной емкости ОПЗ полупроводника, получим

$$C_{sc}^{kl} \approx \beta \frac{\left(qV_s + \mu_b + \frac{|E_g|}{2}\right)^3}{\sqrt{\left(qV_s \mu_b + \frac{|E_g|}{2}\right)^4 - \left(\mu_b + \frac{|E_g|}{2}\right)^4}}, \quad (7)$$

где $\beta = \frac{q^2 \varepsilon_0 \varepsilon_{sc}}{\left(\frac{2}{3}\right)^{1/2} \pi^2 P^3}$. Разлагая (7) в ряд по малому параметру $\left(\mu_b + \frac{|E_g|}{2}\right) / qV_s$, при-

ходим к выражению

$$C_{sc}^{kl} \approx \beta \left(qV_s + \mu_b + \frac{|E_g|}{2}\right) \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\left(\mu_b + \frac{|E_g|}{2}\right)^3}{qV_s}\right). \quad (8)$$

Поскольку поправка, связанная с отклонением от ультрарелятивистского предела

$E_g = 0, \mu_b = 0$, возникает только в третьем порядке по $\left(\mu_b + \frac{|E_g|}{2}\right) / qV_s$, вклад второго

члена в скобках несуществен уже при небольших изгибах зон и быстро падает с ростом V_s . Тогда выражение (8) может быть записано в виде

$$C_{sc}^{kl} \approx \beta \left(qV_s + \mu_b + \frac{|E_g|}{2}\right), \quad (9)$$

и

$$\frac{dC}{dV_s} = q^2 \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_{sc}}{(2/3)^{1/2} \pi^2 P^3}}. \quad (10)$$

Производная dC/dV_s , измеренная в области линейного участка электронной ветви ВФХ, определяется только двумя материальными параметрами – матричным элементом оператора квазиимпульса P и диэлектрической проницаемостью. Таким образом, формула (8) позволяет точно определить один из двух параметров, если другой измерен независимым образом или известен из литературы.

Зададимся вопросом, насколько выведенное выражение (8) является универсальным и корректным для вырожденной системы электронов на поверхности бесщелевого полупроводника. Для упрощения вычислений предположим $E_g = 0$. В этом случае закон дисперсии записывается выражением

$$E = ps = \hbar k. \quad (11)$$

Оценим отношение характерного размера ширины потенциальной ямы, которая задается величиной поверхностного потенциала $V_s > 0$ к длине волны электрона. При этом будем полагать, что $qV_s \gg \mu_b$. Для такой оценки воспользуемся соотношением для локальной концентрации электронов

$$n(E) = \int_0^{qV(z)} \frac{2 \cdot 4\pi k^2 dk}{(2\pi)^3} = \frac{(3/2)^{3/2}}{\pi^2 P^3} \frac{1}{3} |qV(z)|^3. \quad (12)$$

Ход электростатического потенциала $V(z)$ в формуле (12) можно непосредственно определить из решения уравнения Пуассона

$$\frac{d^2 V}{dz^2} = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_{sc}} n(z) \quad (13)$$

с граничными условиями $V|_{z=0} = V_s$ и $V|_{z=\infty} = 0$. Уравнение (13) с учетом (12) можно переписать в виде

$$\frac{d^2 V}{dz^2} = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_{sc}} \frac{(3/2)^{3/2}}{\pi^2 P^3} |q|^3 V^3(z) = AV^3, \quad (14)$$

где $A \equiv \frac{q^4 (3/2)^{3/2}}{3\pi P^3 \epsilon_0 \epsilon_{sc}}$. Для решения уравнения (14) домножим левую и правую части

уравнения на $2 \frac{dV}{dz}$ и проинтегрируем его:

$$\int_0^V 2 \frac{dV}{dz} \left(\frac{d^2 V}{dz^2} \right) = \left(\frac{dV}{dz} \right)^2 \Big|_0^V = \frac{A}{2} V^4 \Big|_0^V. \quad (15)$$

Из формулы (15) следует, что

$$\frac{dV}{dz} = \sqrt{\frac{A}{2}} V^2. \quad (16)$$

Интегрирование (16) позволяет получить ход потенциала в ОПЗ полупроводника:

$$V = \frac{V_s}{1 + V_s \sqrt{\frac{A}{2}} z}. \quad (17)$$

Используя формулу (17), можно оценить соотношение размеров и длины дебройлевской волны электрона:

$$\gamma = \left(\sqrt{\frac{2}{A} \frac{1}{V_s}} \right)^3 n_s. \quad (18)$$

В этом выражении n_s – концентрация электронов на поверхности полупроводника. Очевидно, что соотношение (18) можно использовать только в том случае, если $\gamma \gg 1$. В противном случае описание зависимости дифференциальной емкости от поверхностного потенциала вырожденной системы электронов на поверхности бесщелевого полупроводника должно учитывать процессы размерного квантования.

Оценка (18) с учетом констант и диэлектрической проницаемости может быть представлена в следующем виде:

$$\gamma \approx 1.15 \cdot 10^{-12} \frac{1}{\epsilon_{sc}} \frac{n_s}{V_s^2}. \quad (20)$$

Выражение (20) при определенном соотношении величины поверхностного изгиба зон и локальной концентрации электронов в ОПЗ для конкретного полупроводника может быть много больше единицы, тогда соотношение (10) корректно для расчета величины матричного элемента оператора квазиимпульса.

Знание величины матричного элемента оператора квазиимпульса позволяет сделать оценку некоторых других параметров. Для псевдоульtrarелятивистского закона дисперсии (2) конечное значение E_g позволяет сделать оценки эффективной массы электронов на дне зоне проводимости (или ширины запрещенной зоны E_g при известном значении m_e^*), воспользовавшись выражением

$$E_g = \frac{4}{3} \frac{m_0 P^2}{\hbar^2 \left(\frac{m_0}{m_e^*} - 1 \right)}. \quad (21)$$

В заключение следует отметить, что если для оценок использовать соотношение (10), то его экстраполяция к $C_{sc}^{kl} = 0$ позволяет получить оценку энергии уровня Ферми E_F в объеме полупроводника из соотношения

$$E_F = -qV_s \Big|_{C_{sc}=0} - \frac{E_g}{2}. \quad (22)$$

Для бесщелевого полупроводника HgSe проводилась проверка корректности использования формул (8) и (10) для определения матричного элемента оператора квазиимпульса. Искомая оценка (20) при потенциале 0.3 В и $n_s \approx 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (расчет по рис. 1) составляет примерно 20. Более того, во всем диапазоне изменения электродных потенциалов в катодную область от 0 В до –0.5 В такая оценка как минимум на порядок больше 1, что свидетельствует о корректности проводимых расчетов в условиях эксперимента. Полученная величина матричного элемента оператора квазиимпульса P для HgSe в пределах разброса экспериментальных ВФХ (см. рис. 1) составляет $P = (7.2 - 8.2) \cdot 10^{-8} \text{ эВ} \cdot \text{см}$, что хорошо согласуется с литературными данными [4]. Используя полученные значения P и величину запрещенной зоны при комнатной температуре [5], по формуле (21) была определена эффективная масса электронов для HgSe. Оценка в пределах экспериментального разброса составила $m_e^* = (0.0050 - 0.0065)m_0$ (m_0 – масса свободного электрона), что ниже известных из литературы значений $m_e^* = (0.015 - 0.095)m_0$. Это позволяет утверждать, что эффекты размерного квантования электронов в ОПЗ бесщелевых полупроводников проявляются уже при комнатных тем-

пературах, и оценка величины эффективной массы электронов в этих соединениях должна быть основана на квантовых расчетах.

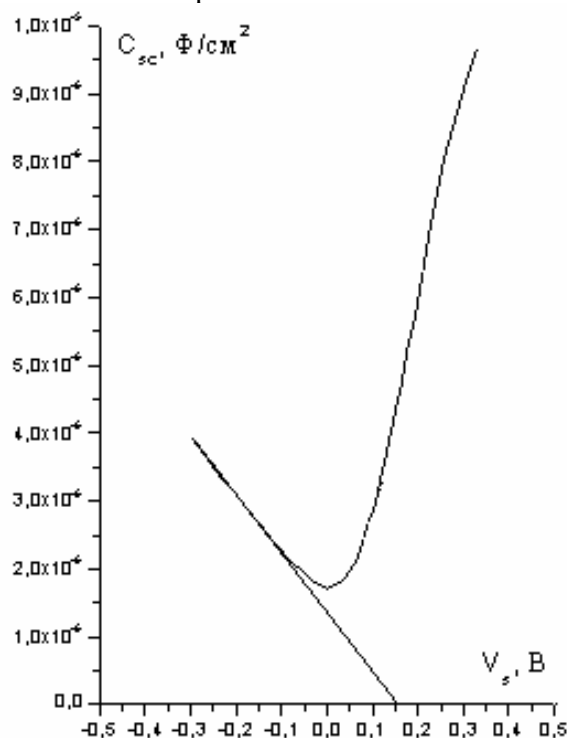


Рис. 1. Экспериментальная $C_{sc}(V_s)$ -зависимость для бесщелевого полупроводника HgSe, измеренная методом ЭПЭ в водном растворе KCl

Заключение

Проведенные исследования позволяют утверждать, что размерное квантование электронов в ОПЗ в бесщелевых полупроводниках HgSe проявляется уже при комнатных температурах. Получена формула для электронных параметров бесщелевых полупроводников в рамках классического описания области пространственного заряда при комнатной температуре. Определен критерий ее применимости. Проведена оценка величины матричного элемента оператора квазиимпульса и величины эффективной массы электронов, определен критерий точности полученной методики для бесщелевого соединения HgSe.

Литература

1. Dornhaus R., Nimtz G. Narrow-Gap semiconductors. // Springer – Tracts in Mod. Phys. 1983. V.98. №1. P.309.
2. Мямлин В.А., Плесков Ю.В. Электрохимия полупроводников. М: Наука, 1965. 338 с.
3. Цидильковский И.М. Зонная структура полупроводников. М.: Наука, 1978. 328 с.
4. Шевченко О.Ю., Раданцев В.Ф., Яфясов А.М., Божевольнов В.Б., Иванкив И.М., Перепелкин А.Д. Определение матричного элемента оператора квазиимпульса в бесщелевом полупроводнике HgSe методом эффекта поля в электролите. // ФТП. 2002. Т.36. В.4. С. 412–415.
5. Lehovski S.L., Broerman J.G., Nelson D.A., Whitesett Ch.R. Temperature-dependent electrical properties of HgSe. // Phys.Rev.B. 1974. V.9. №4. P.1598–1619.

ФОРМИРОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ФАЗ И КРИТИЧЕСКИЙ ТОК В Вi-КЕРАМИКЕ

Е.И. Загоруйко

Изучены сверхпроводящие свойства прессованных образцов, нагретых до температуры интенсивного фазоизменения ($\sim 880^\circ\text{C}$) и температуры частичного плавления ($\sim 895\text{--}910^\circ\text{C}$). Показано, что в первом случае термообработка не приводит к изменению продуктов реакции – сверхпроводящие свойства не наблюдаются, во втором – продукты распада практически отсутствуют, плотность критического тока (j_c) достигает 80 А/см^2 . При увеличении времени изотермической выдержки плотность критического тока (j_c) превышает значение 160 А/см^2 ($B=0$; 77 К).

Введение

Сверхпроводящая керамика как поликристаллический материал широко используется для решения научных и ряда прикладных задач. Многочисленные эксперименты, выполненные на монокристаллах и тонких пленках, показали, что монокристаллический сверхпроводящий материал может нести ток свыше 10^5 А/см^2 в магнитном полях $\sim 5\text{--}10\text{ Тл}$ при 77 К [1]. Однако на объемной сверхпроводящей керамике пока достигнуты токи не более 10^4 А/см^2 в нулевом магнитном поле [2, 3]. При этом плотность критического тока (j_c) сильно подавляется даже в слабых полях $\sim 0,02\text{ Тл}$. Причиной такого поведения является ослабление контактов на границе сверхпроводящих кристаллов, обусловленное рядом факторов:

- разориентация контактирующих анизотропных кристаллов;
- возникновение дефектов упаковки и связанное с ними изменение кислородной нестехиометрии в приповерхностных слоях;
- аморфизация границ зерен;
- непрореагировавшие фазы и выделения на границе зерен, и т.д.

Перечисленные факторы взаимосвязаны, и их количество может быть снижено до минимума в высокоплотной текстурированной и крупнокристаллической керамике. В то же время крупнокристаллической структуре сопутствуют значительные потери механической прочности и возможность образования дефектов кристаллического строения, понижающих значение (j_c) (точечные, линейные и объемные дефекты, на которых может происходить зацепление вихрей Абрикосова). Это означает, что взаимосвязь между параметрами микроструктуры и плотностью критического тока неоднозначна, и ее предстоит еще установить, научившись получать керамические структуры с вполне определенной плотностью, размером, формой и ориентацией кристаллов, размером и формой пор, распределением их по объему [4, 5].

В задачу работы входило изучение процессов фазообразования, протекающих при температурах, близких к температуре плавления, и влияние этих процессов на величину плотности критического тока висмутсодержащей керамики, легированной атомами свинца.

Методика эксперимента

Исследования проводились с Вi-содержащими порошковыми образцами с составом $(\text{Bi}_4\text{Pb})_{0,8}\text{Sr}_4\text{Ca}_5\text{Cu}_7\text{O}_y$, содержащими 90% фазы (2223) и 10% фазы (2212).

Для изучения процесса фазообразования при нагреве (охлаждении) прессованных образцов Вi-керамики использовали высокотемпературную дифрактометрию в $\text{Cu } k_\alpha$ – излучении [5–7]. Терморентгеновские исследования выполнены на воздухе в интервале $20\text{--}900^\circ\text{C}$ при средней скорости нагрева (охлаждения) $283^\circ/\text{мин}$. Использовалась высокотемпературная приставка ГПВТ-1500. Температура образца измерялась платиновой-платиновой термопарой, рабочий спай которой располагался вблизи поверхности образца. Температура регулировалась с точностью $\pm 3^\circ\text{C}$.

Изучение кинетики разложения в изотермических условиях проводились путем регистрации интенсивности дифракционных максимумов при температурах 820–895°C.

Измерения плотности критического тока (j_c) образцов проводились по четырехточечной методике. Чтобы избежать влияния термо-ЭДС, в токовую цепь схемы был включен переключатель направления тока – П-302. Измерения проводились следующим образом: пропускаемый через образец ток ступенчато повышался (минимальное значение ступени 10 мА), и с помощью мультиметра определялось то значение тока, при котором на образце появлялось падение напряжения. В качестве величины падения напряжения на образце принималось среднее арифметическое между показателями мультиметра при различных полярностях данного измерительного тока. Величина тока, при котором падение напряжения на образце составляло ± 1 мкВ, принималось за критический ток образца.

Фазообразование при нагреве до температуры частичного плавления Вi-керамики

Высокотемпературная дифракция показала, что до температуры 780°C дифракционная картина не испытывает каких-либо изменений, и только в интервале температур 780–810°C происходит увеличение дифракционных максимумов до 20–25%.

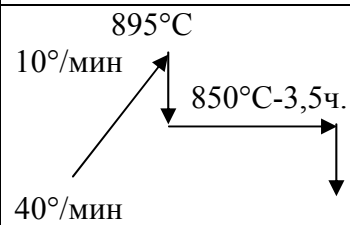
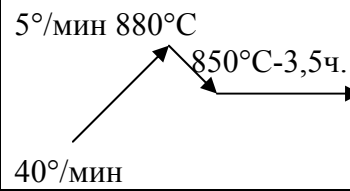
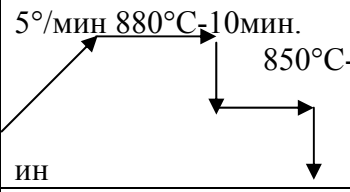
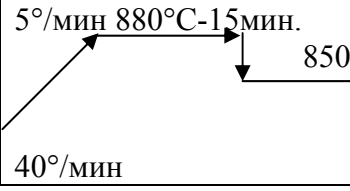
№ обр.	Схема термообработки	Фазовый состав, %				$j_c, \text{A/cm}^2$ ($B=0; 77\text{K}$)
		2223	2212	2201	BiO	
1		22,5	22,5	37	14	$28 \cdot 10^{-3}$
2		85	10,5	-	следы	0
3		33,5	65	-	1,5	80
4		95	следы	-	следы	>160

Таблица 1. Влияние режимов термообработки на фазообразование и критический ток в Вi-керамике

Заметные изменения в дифракционной картине начинаются при температуре $\sim 820^\circ\text{C}$. При этом происходит уменьшение интенсивности дифракционных пиков, принадлежащих только фазе (2212). При температуре $\sim 870\text{--}875^\circ\text{C}$ эти пики практически исчезают. В это же

время интенсивность пиков фазы (2223) практически остается неизменной, но при температуре 875°C их интенсивность заметно снижается до 4–7%. По мере увеличения температуры нагрева интенсивность дифракционных максимумов от фазы (2223) относительно быстро уменьшается, при 890–900°C фаза исчезает и образец начинает плавиться.

Для изучения влияния температуры нагрева и режима термообработки на токонесущую способность одинаково спрессованных и с высокой степенью текстуры образцов Вi-керамики были выбраны две температуры нагрева и одна температура изотермической выдержки: ~880°C (интенсивного фазообразования), 895°C (близкая к плавлению) и 850°C. Основные результаты исследований приведены в табл. 1.

Величина температуры под изотермическую выдержку существенно сказывается на фазообразовании. Нагрев до 895°C приводит к существенным изменениям в микроструктуре образца. Лучшие результаты наблюдались в образцах № 3, 4. В нашем случае более предпочтительной оказалась термообработка, проведения по схеме образца № 4. По-видимому, увеличение времени изотермической выдержки улучшает состояние границ зерен за счет спекания. Процессы подплавления в этом случае не наблюдались. Возможно, что присутствие разветвленной сети границ зерен, пор и микротрещин делает граничную диффузию более предпочтительной (по сравнению с объемной), и за время изотермической выдержки образец насыщается кислородом до оптимального стехиометрического состава. При этом предполагается, что потери катионов в данном случае не имели места в связи с невысокой температурой нагрева под изотермическую выдержку.

Заключение

В работе изучено фазообразование при температурах интенсивного фазового изменения и частичного плавления. Изучены сверхпроводящие свойства спрессованных образцов при двух различных режимах термообработки. В одном случае нагрев производился до температуры интенсивного фазообразования (880°C); во втором – до температуры частичного плавления (~895°C).

Показано, что в первом случае, когда термообработка не приводит к исчезновению продуктов реакции, сверхпроводящие свойства не наблюдаются; во втором, где продукты распада практически отсутствуют, плотность критического тока (j_c) достигает 80 А/см². При увеличении времени изотермической выдержки плотность критического тока (j_c) превышает 160 А/см² ($B=0$; 77K).

Литература

- Физические свойства высокотемпературных сверхпроводников. / Гинзбург Д.М. (ред.). М.: Мир, 1990.
- Strobel P., Fournier Th.-J. // *Less-Common Met.* 1990. V. 164&165. P. 519–525.
- Schulze K., Majewski P., Hettich B., Petzow G. // *Zeitschrift Metal.* 1990. V. 81. №11. P. 836–842.
- Кононюк И.Ф., Ломоносов В.А., Толочко С.П. и др. // *Сверхпроводимость. Физика. Химия. Техника.* 1994. Т. 7. №4. С. 666–671.
- Бобылев И.Б., Морычева В.Н., Сударова С.В. и др. // *Сверхпроводимость. Физика. Химия. Техника.* 1994. Т. 7. № 4. С. 678–688.
- Питов В.А., Козловская Н.А., Спиридонов Ф.М. и др. // *Сверхпроводимость. Физика. Химия. Техника.* 1994. Т. 7. С. 871–875.
- Ibrahim M.M., Khalil S.M., and Ahmed A.M. // *Journal of Physics and Chemistry of Solids.* 2000. V. 61. №10. P. 1553–1560.

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАВЕДЕННОЙ ТЕРМОЛИНЗЫ
В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРАХ С ПРОДОЛЬНОЙ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ НАКАЧКОЙ****А.Н. Степанов**

Выполнен эксперимент по исследованию выходной мощности одномодовой генерации и оптической силы наведенной термолинзы в твердотельных лазерах с продольной полупроводниковой накачкой при использовании активных элементов различных типов.

Введение

Одной из проблем, препятствующих увеличению выходной мощности твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой, является неоднородность тепловыделения в активном элементе (АЭ) [1]. Неоднородность тепловыделения приводит к увеличению термооптических аберраций и, как следствие, к ухудшению качества пучка и резкому росту внутрирезонаторных потерь [2], что не позволяет полностью использовать преимущества схемы продольной полупроводниковой накачки – высокую оптическую эффективность в условиях одномодовой генерации.

Высокое качество пучка и сокращение внутрирезонаторных потерь может быть достигнуто за счет соответствующей конструкции резонатора и существенного уменьшения тепловых эффектов в активном элементе. Под этим подразумевается либо полное исключение вредного влияния тепловой линзы, либо его компенсация. Одним из способов является ориентация теплового потока коллинеарно направлению распространения лазерного пучка, что достигается, когда длина лазерной среды мала по сравнению с ее диаметром [3]. Примером такой конструкции могут служить лазеры с активным элементом в виде тонкого диска, охлаждаемого и одной или двух сторон [2, 4].

В настоящей работе выполнено экспериментальное сравнение зависимостей выходной мощности и оптической силы термолинзы для трех конфигураций лазеров – с цилиндрическим и тонкодисковым активными элементами при идентичных условиях накачки.

Экспериментальная установка

На рис. 1 представлены схемы накачки и контактного охлаждения АЭ.

Цилиндрические АЭ (рис. 1а) представлены в двух вариантах: активный элемент (1) из Nd:YAG длиной 6 мм и составной активный элемент из Nd:YAG длиной 10 мм с наконечником из неактивированного кристалла YAG длиной 5 мм. Диаметры элементов 4 мм. Концентрация ионов Nd^{3+} 1 ат.%. На торце активного элемента имеется двухволновое покрытие, обеспечивающее высокий коэффициент отражения на длине волны генерации (1064 нм) и высокий коэффициент пропускания на длине волны накачки (808 нм). Кристаллы установлены в медный корпус (2) через индиевую фольгу (3) толщиной 100 мкм для обеспечения интенсивного и однородного теплоотвода с боковой поверхности. Резонатор лазера образован выходным зеркалом (4) и высокоотражающим покрытием на торце активного элемента (1).

Во второй экспериментальной схеме (рис. 1б) лазерный кристалл (1) выполнен в виде диска толщиной 2 мм и диаметром 7 мм из Nd:YAG с концентрацией ионов Nd^{3+} 1,1 ат.%, имеющего высокоотражающее покрытие на одной из сторон как для лазерно-

го излучения, так и для накачки. Диск установлен на медный теплоотвод (2) через теплопроводящую подложку (3). Считая коэффициент теплоотвода через область контакта достаточно большим, можно ожидать, что установившееся температурное поле будет иметь квазипродольное распределение. Резонатор образован выходным зеркалом (4), угловым дихроичным зеркалом (5) и высокоотражающим покрытием на торце активного элемента (1).

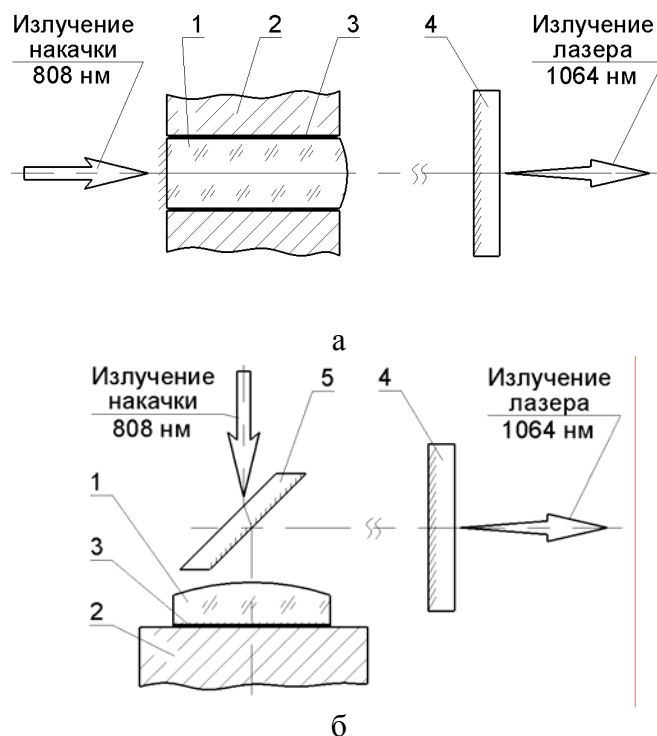


Рис. 1. Схемы накачки и контактного охлаждения активных элементов: а – цилиндрического типа; б – дискового типа. 1 – активный элемент; 2 – теплоотвод; 3 – теплопроводящая подложка; 4 – выходное зеркало; 5 – угловое зеркало

Излучение накачки, доставляемое по волоконно-оптическому кабелю, формируется двухлинзовой оптической системой и в цилиндрический активный элемент вводится с торца. В случае дискового активного элемента накачка осуществляется через дихроичное зеркало. Поскольку длина активного элемента 2 мм, можно говорить о двойном проходе излучения накачки через кристалл.

Диаметр прокачанной зоны для всех конфигураций находится в диапазоне 0,8–1,1 мм.

Определение оптической силы термолинзы

При работе лазера в прокачанной области активного элемента происходит выделение тепла. Основным источником связан со стоксовым сдвигом длин волн накачки и генерации. Возникающий градиент температуры приводит, вследствие температурной зависимости показателя преломления и теплового расширения кристалла, к нарушению оптической однородности активного элемента и появлению термонаведенной линзы. Эта линза в первом приближении может быть охарактеризована оптической силой.

В настоящей работе для определения силы термолинзы используется метод резонатора, находящегося на границе устойчивости [5]. Использование других, более пространственных методов, таких как метод зондирующего луча He-Ne лазера или интерферометрический метод, затруднительно. Причинами, по которым данные методы не

используются в настоящей работе, являются малые диаметры прокачанных зон в кристаллах и угловая схема резонатора в случае с дисковым активным элементом.

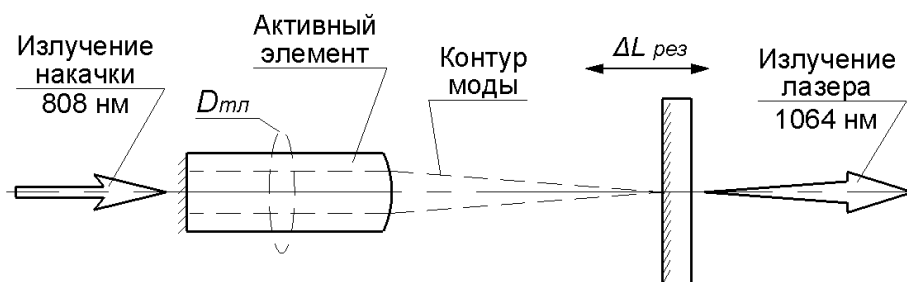


Рис. 2. Схема экспериментального определения наведенной термолинзы в активном элементе

Принцип измерения оптической силы термолинзы пояснен на схеме, приведенной на рис. 2. Он заключается в определении длины резонатора, которой соответствует эквивалентная полуконцентрическая конфигурация резонатора в зависимости от поглощенной мощности накачки. Такая конфигурация соответствует границе устойчивости лазерного резонатора. Искомая точка отчетливо определяется по резкому искажению структуры основной поперечной моды, снижению и срыву лазерной генерации. Переход от длин резонатора к значениям оптической силы термолинзы при различных значениях поглощенной мощности накачки осуществляется с помощью матричного метода.

Результаты эксперимента

На рис. 3 показаны экспериментальные результаты зависимости выходной мощности P_{out} от поглощенной мощности накачки P_{abs} для разных конфигураций активных элементов. Оптическая длина резонатора для всех схем составляла 55 мм.

В первой схеме (с цилиндрическим активным элементом) одномодовая генерация сохраняется до уровня выходной мощности 2,1 Вт (точка (1) на рис. 3). Эффективность оптического преобразования в зависимости от поглощенной мощности накачки составляет $\eta_{opt} = (P_{out} / P_{abs}) = 38\%$; дифференциальная эффективность $\eta_D = (dP_{out} / dP_{abs}) = 45\%$. При дальнейшем увеличении мощности накачки наблюдается снижение энергетической эффективности вследствие роста дифракционных потерь и срыв генерации.

Составной АЭ обеспечивает одномодовую генерацию до 5 Вт (точка (2)) с эффективностью оптического преобразования $\eta_{opt} = 48,5\%$ и дифференциальной эффективностью $\eta_D = 55\%$.

Как и ожидалось, схема с дисковым активным элементом обеспечивает наибольшую эффективность оптического преобразования $\eta_{opt} = 50,5\%$ и показывает возможность дальнейшего масштабирования выходной мощности. Профиль нулевой моды TEM_{00} сохраняется до значений мощности излучения лазера на уровне 7,7–7,8 Вт (точка (3)). Дифференциальная эффективность составляет $\eta_D = 58\%$.

На рис. 4 показана зависимость оптической силы термолинзы в АЭ от поглощенной мощности накачки. Дисковый АЭ с двойным проходом излучения накачки в среднем обеспечивает уменьшение наведенной термолинзы на 60% при сравнении с цилиндрическим и на 25% при сравнении с составным активным элементом.

Измеренные данные о зависимости выходной мощности и оптической эффективности для лазера с дисковым активным элементом свидетельствуют об отсутствии роста дифракционных потерь, следовательно, и о малом вкладе асферической составляю-

щей тепловой линзы. Сферическая составляющая тепловой линзы может быть скомпенсирована соответствующей конструкцией резонатора.

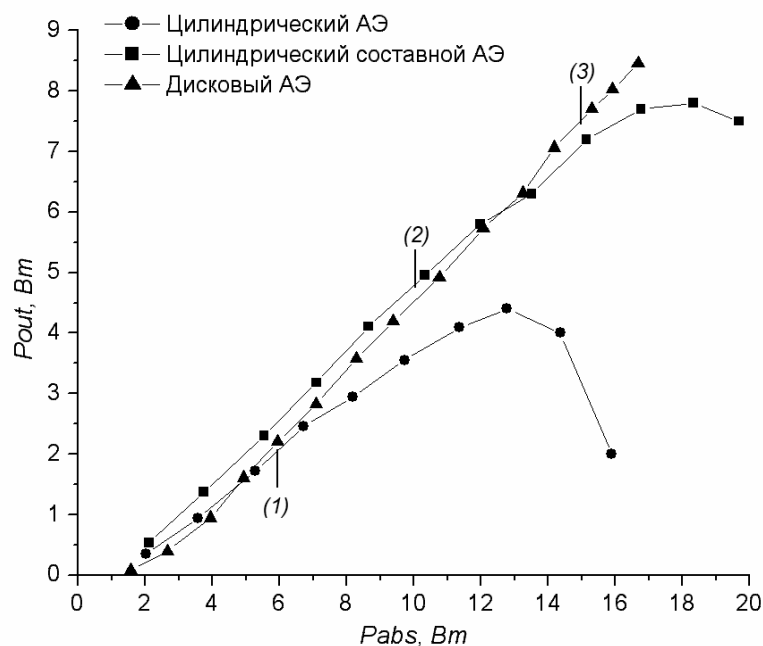


Рис. 3. Зависимость выходной мощности P_{out} от поглощенной мощности накачки P_{abs} . Цифрами обозначены точки перехода к многомодовой генерации

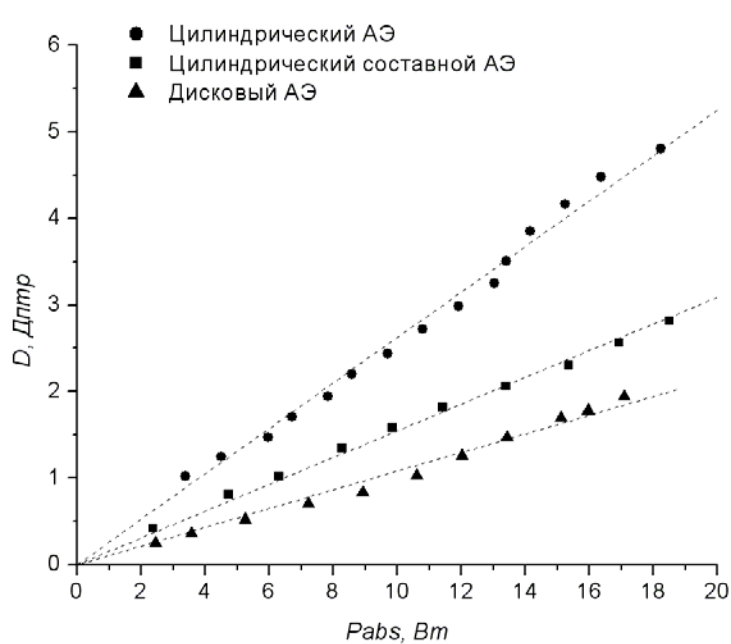


Рис. 4. Экспериментально измеренные зависимости оптической силы термолинзы D от поглощенной мощности накачки P_{abs} . Пунктиром показаны аппроксимированные кривые.

Заключение

В ходе эксперимента получены зависимости выходной мощности и оптической силы термолинзы от поглощенной мощности накачки для разных конфигураций активных элементов. Проведенный эксперимент показывает преимущества дискового активного элемента; сокращение толщины кристалла и увеличение числа проходов излу-

ния накачки приводит к уменьшению температурных искажений внутри кристалла (величины и асферической составляющей термолинзы) и, как следствие, позволяет добиться больших значений выходной мощности при одномодовой генерации.

В работе продемонстрирован лазер с выходной мощностью до 7,7 Вт ТЕМ₀₀, с эффективностью оптического преобразования $\eta_{opt} = 50,5\%$ и дифференциальной эффективностью $\eta_D = 58\%$.

Литература

1. W.A. Clarkson, Thermal effects and their mitigation in end-pumped solid-state lasers. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2001. V. 34. P. 2381-2395.
2. W. Koechner, Solid-State Laser Engineering, Springer-Verlag, New York, 1999.
3. K. Contag, M. Karszewski, C. Stewen, A. Giesen, H. Hugel, Theoretical modelling and experimental investigation of the diode-pumped thin-disk Yb:YAG laser (Erratum). // Quantum Electronics. 1999. V. 29. № 8.
4. W.S. Martin, J.P. Chernoch: US Pat.nt No. 3, 633. 126 (January 1972).
5. Jiaan Zheng, Shengzhi Zhao, Lei Chen, Thermal lens determination of LD end-pumped solid-state laser with stable resonator by slit scanning method. // Optics & Laser Technology. 2002. V. 34.

О КАСАТЕЛЬНЫХ ЛУЧЕВЫХ ИНВАРИАНТАХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

П.А. Коротков, Д.Ю. Сачков

В работе введены понятия касательных лучевых инвариантов (произвольных) линейных оптических систем. Даны параксиальные формы этих инвариантов и приведены аргументы в пользу их использования при анализе локальных свойств оптических систем, а также в задачах синтеза оптических поверхностей с заданными свойствами.

Введение

В 30-х годах XIX в. ирландский математик и механик У.Р. Гамильтон разработал теорию характеристических функций оптической среды (системы). В рамках этой теории устанавливается, что, в согласии с принципом Ферма, независимо от структуры оптической системы можно найти такие скалярные функции, заданные на множествах оптических лучей и/или множествах точек на лучах, которые полностью определяют параметры входных и выходных лучевых полей для данной системы [1, 2, 4, 5].

Настоящая работа посвящена лишь одному прикладному аспекту применения теории оптических характеристических функций Гамильтона или, как часто говорят, теории эйконолов, а именно, определению инвариантных характеристик лучевых полей при их распространении (трассировке) через произвольные линейные оптические системы и наиболее очевидным применениям полученных инвариантов.

Известные из лучевой оптики и широко используемые инварианты, такие как инварианты Аббе или Лагранжа-Гельмгольца, получены в параксиальном приближении [1] и поэтому не являются универсальными характеристиками связи предмета и изображения для оптических элементов или систем.

Ниже показывается, что при известном угловом эйконале данной системы можно определить инварианты, отражающие не ограниченную, в общем случае, параксиальным приближением связь входных и выходных лучевых полей. В качестве частного случая легко получаются параксиальные формы этих лучевых инвариантов.

В работе также приводятся аргументы в пользу использования таких инвариантов при анализе (в том числе и абберационном) локальных свойств оптических систем, а также в задачах синтеза оптических поверхностей с заданными свойствами, например, для апланатических систем со сплайн-профилированными поверхностями.

Касательный угловой эйконал

Ограничимся рассмотрением однородных изотропных оптических сред. Дадим определение углового эйконала (УЭ) или угловой характеристической функции (УХФ) [1, 4, 5], являющегося структурной основой дальнейшего изложения:

$$T(\mathbf{p}; \mathbf{p}') \equiv T(p_x, p_y, p_z; p'_x, p'_y, p'_z) = V(\mathbf{r}; \mathbf{r}') + \mathbf{p} \cdot \mathbf{r} - \mathbf{p}' \cdot \mathbf{r}', \quad (1)$$

где $V(\mathbf{r}; \mathbf{r}')$ – точечная характеристическая функция, $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$, $\mathbf{p}' = (p'_x, p'_y, p'_z)$ – лучевые векторы падающего и преобразованного (преломленного или отраженного) лучей в системах координат $OXYZ$ и $O'X'Y'Z'$ (в пространствах предметов и изображений) с радиус-векторами $\mathbf{r} = (x, y, z)$ и $\mathbf{r}' = (x', y', z')$, соответственно (см. рис. 1). Кроме того, заданы и фиксированы некоторые плоскости $z = z_0$ и $z' = z'_0$. При постоянных n и n' геометрический смысл УЭ заключается в том, что (для фиксированных входного и выходного лучей) T совпадает с оптическим путем от точки Q до точки Q' (см. рис. 1).

Напомним, что УЭ – это функция, которая полностью определяет направления лучей относительно выделенных плоскостей в пространствах предметов и изображений. Однако ее использование невозможно, если входящие и выходящие лучи параллельны. Последний случай всегда имеет место для (идеальных) афокальных систем, а также в ситуациях, когда падающий луч параллелен нормали к любой оптической поверхности в данной точке.

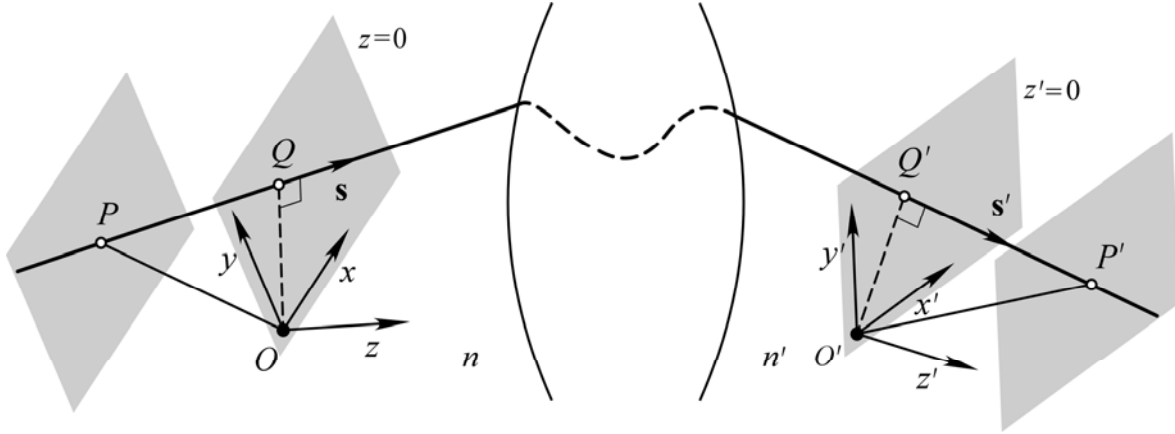


Рис. 1. К определению углового эйконала

Известно [1, 4, 5], что для углового эйконала имеют место равенства:

$$\frac{\partial T}{\partial p_\zeta} = \zeta - \frac{p_\zeta}{p_z} z, \quad \frac{\partial T}{\partial p'_\zeta} = -\left(\zeta' - \frac{p'_\zeta}{p'_z} z' \right), \quad (2)$$

причем здесь и везде ниже $\zeta = \{x, y\}$.

Введем векторнозначную функцию (касательный угловой эйконал):

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}(\mathbf{p}; \mathbf{p}') = T(p_\zeta; p'_\zeta) = T(\mathbf{p}; \mathbf{p}') \mathbf{p} \times \mathbf{p}', \quad (3)$$

модуль которой $|\mathbf{T}| = |T(\mathbf{p}; \mathbf{p}')| n n' \sin(\angle \{\mathbf{p}, \mathbf{p}'\})$. Эта функция, заданная на лучевых векторах из пространств предметов и изображений, определяет векторное поле, которое обращается в нуль (если только $T \neq 0$) тогда и только тогда, когда входной и выходной лучевые векторы параллельны. Таким образом, использование касательного углового эйконала в вычислительных процедурах представляется более удобным, чем обычной УХФ, поскольку даже при параллельности падающего и преобразованного лучей неопределенности в значении $\mathbf{T}(\mathbf{p}; \mathbf{p}')$ не возникнет. При этом нули векторного поля $\mathbf{T}$ можно однозначно воспринимать в процессе счета как точки, где отсутствует изменение направления преобразованного луча.

Исходя из требований корректности определения векторного произведения, мы будем рассматривать оба лучевых вектора $\mathbf{p}$ и $\mathbf{p}'$ в единой декартовой системе координат $OXYZ$ со стандартным ортонормированным базисом $\{\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z\}$, в котором они имеют вид $\mathbf{p} = \sum_\mu p_\mu \mathbf{e}_\mu$ и $\mathbf{p}' = \sum_\mu p'_\mu \mathbf{e}_\mu$, $\mu = \{x, y, z\}$.

Найдем частные производные T по p_μ и p'_μ :

$$\frac{\partial T}{\partial p_\zeta} = \frac{\partial T}{\partial p_\zeta} \mathbf{p} \times \mathbf{p}' + T \frac{\partial(\mathbf{p} \times \mathbf{p}')}{\partial p_\zeta} = \frac{\partial T}{\partial p_\zeta} \mathbf{p} \times \mathbf{p}' + T \left\{ \left(\mathbf{e}_\zeta - \frac{p_\zeta}{p_z} \mathbf{e}_z \right) \times \mathbf{p}' \right\}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial p'_\zeta} = \frac{\partial T}{\partial p'_\zeta} \mathbf{p} \times \mathbf{p}' + T \frac{\partial(\mathbf{p} \times \mathbf{p}')}{\partial p'_\zeta} = \frac{\partial T}{\partial p'_\zeta} \mathbf{p} \times \mathbf{p}' - T \left\{ \left(\mathbf{e}_\zeta - \frac{p_\zeta}{p_z} \mathbf{e}_z \right) \times \mathbf{p} \right\}. \quad (5)$$

Далее умножим скалярно (слева) обе части уравнений (4) и (5) на $\mathbf{p}$ и $\mathbf{p}'$, соответственно. Тогда получим:

$$\mathbf{p} \frac{\partial T}{\partial p_\zeta} = T \left\{ \mathbf{p} \cdot (\mathbf{e}_\zeta \times \mathbf{p}') - \mathbf{p} \cdot \left(\frac{p_\zeta}{p_z} \mathbf{e}_z \times \mathbf{p}' \right) \right\} = T \left\{ [\mathbf{p}, \mathbf{e}_\zeta, \mathbf{p}'] - \frac{p_\zeta}{p_z} [\mathbf{p}, \mathbf{e}_z, \mathbf{p}'] \right\}, \quad (6)$$

$$\mathbf{p}' \frac{\partial T}{\partial p'_\zeta} = -T \left\{ \mathbf{p}' \cdot (\mathbf{e}_\zeta \times \mathbf{p}) - \mathbf{p}' \cdot \left(\frac{p'_\zeta}{p'_z} \mathbf{e}_z \times \mathbf{p} \right) \right\} = -T \left\{ [\mathbf{p}', \mathbf{e}_\zeta, \mathbf{p}] - \frac{p'_\zeta}{p'_z} [\mathbf{p}', \mathbf{e}_z, \mathbf{p}] \right\}, \quad (7)$$

где $[\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}] = \mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = -[\mathbf{c}, \mathbf{b}, \mathbf{a}]$ – смешанное произведение векторов. Исключая T из системы уравнений (6) и (7), находим связь между производными касательного углового эйконала:

$$\left\{ [\mathbf{p}', \mathbf{e}_\zeta, \mathbf{p}] - \frac{p'_\zeta}{p'_z} [\mathbf{p}', \mathbf{e}_z, \mathbf{p}] \right\} \left(\mathbf{p} \frac{\partial T}{\partial p_\zeta} \right) = \left\{ [\mathbf{p}', \mathbf{e}_\zeta, \mathbf{p}] - \frac{p_\zeta}{p_z} [\mathbf{p}', \mathbf{e}_z, \mathbf{p}] \right\} \left(\mathbf{p}' \frac{\partial T}{\partial p'_\zeta} \right). \quad (8)$$

Полученное уравнение является общей формой касательных лучевых инвариантов; в параксиальном приближении равенство (8) можно существенно упростить. Направим ось OZ системы координат вдоль оптической оси данной системы. Тогда из условия параксиальности следуют неравенства:

$$\frac{p_\zeta}{p_z}, \frac{p'_\zeta}{p'_z} \ll 1. \quad (9)$$

Не сильно ограничивая общность рассмотрения, потребуем также, чтобы $|\mathbf{p}', \mathbf{e}_\zeta, \mathbf{p}| = |p_x p'_y - p_y p'_x| < 1$. Тогда для лучевых полей, удовлетворяющих условию $[\mathbf{p}', \mathbf{e}_\zeta, \mathbf{p}] \neq 0$, уравнения (8) можно переписать в более простом виде:

$$\mathbf{p} \frac{\partial T}{\partial p_\zeta} = \mathbf{p}' \frac{\partial T}{\partial p'_\zeta}. \quad (10)$$

Полученные равенства (10) имеют смысл инвариантных характеристик данной (параксиальной) оптической системы; мы будем называть их (параксиальными) сагиттальным и меридиональным касательными лучевыми инвариантами.

Использование касательных инвариантов для синтеза оптических поверхностей

В данном пункте рассмотрим лишь одно из направлений прикладной оптики, где применение введенных выше понятий касательных лучевых инвариантов является наиболее естественным – теорию синтеза оптических систем.

Напомним, что на сегодняшний день точные аналитические выражения для углового эйконала известны как для сферической (преломляющей/отражающей) поверхности, так и для ряда простейших асферических оптических поверхностей (например, параболоида). Подчеркнем, что подобная ситуация нетипична для вычислительной оптики, так как в ней весьма редки случаи, когда известны не приближенные, а точные формы зависимостей, полностью определяющих трансформационные свойства оптической системы. На основании сказанного возникает надежда на то, что практическое использование теории эйконалов для решения задач синтеза оптических систем сможет, по крайней мере, не уступать по эффективности классическим методам многомерной оптимизации, наиболее широко используемым сегодня в теории расчета оптики.

Ниже описывается один из подходов к решению задач анализа оптических систем, а также их синтеза без привлечения теории оптимального управления, используя только выведенные выше инварианты (8) или (10).

Наметим общую схему вычисления УЭ [1, 2, 4]. Положим, что в пространстве задана поверхность, которая в некоторой фиксированной системе координат $O\Xi\eta Z$, связанной с ее полюсом (стационарной точкой), задается функцией

$$\zeta(\xi, \eta) = h_1(\xi^2 + \eta^2). \quad (11)$$

Пусть в точке P данной поверхности, разделяющей оптические среды с показателями преломления n и n' , соответственно, преломляется падающий на поверхность луч. Введем в пространствах предметов и изображений дополнительные системы координат $OXYZ$ и $O'X'Y'Z'$ (идентичные $O\xi\eta\zeta$), как показано на рис. 2.

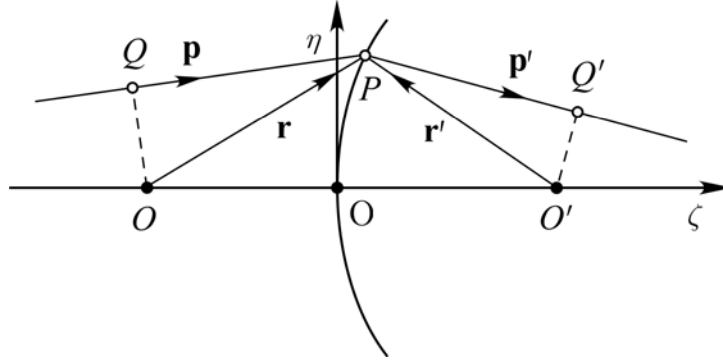


Рис. 2. К расчету углового эйконала оптической поверхности

Тогда, в соответствии с определением (1), угловой эйконал оптической поверхности (11) будет определяться равенством:

$$T(\mathbf{p}; \mathbf{p}') = [\xi p_x + \eta p_y + (\zeta - a)p_z(p_x, p_y)] - [\xi p'_x + \eta p'_y + (\zeta - a')p'_z(p'_x, p'_y)], \quad (12)$$

где $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$ и $\mathbf{p}' = (p'_x, p'_y, p'_z)$ – лучевые векторы падающего и преломленного лучей, $a \leq 0$, $a' \geq 0$ – аппликаты начал координат O и O' в системе координат $O\xi\eta\zeta$.

Чтобы исключить переменные (ξ, η, ζ) из (12), выразив их через компоненты лучевых векторов $\mathbf{p}$ и $\mathbf{p}'$, воспользуемся законом Снеллиуса:

$$\nu \operatorname{grad} F = \mathbf{N},$$

где $\mathbf{N}$ – нормаль в точке падения, а функция $F(\xi, \eta, \zeta) = \zeta - h_1(\xi^2 + \eta^2) = 0$ определяет рассматриваемую поверхность. После несложных преобразований искомая связь примет вид:

$$\xi = \xi(p_x, p_y; p'_x, p'_y) = -\frac{1}{2h_1} \frac{p_x - p'_x}{p_z - p'_z}, \quad (13)$$

$$\eta = \eta(p_x, p_y; p'_x, p'_y) = -\frac{1}{2h_1} \frac{p_y - p'_y}{p_z - p'_z}. \quad (14)$$

Подставляя (13) и (14) в (11), получаем

$$\zeta = \frac{(p_x - p'_x)^2 + (p_y - p'_y)^2}{4h_1(p_z - p'_z)^2}. \quad (15)$$

Прямая подстановка (13), (14) и (15) в (12) дает нам окончательное точное выражение для УЭ поверхности (11), которое здесь не приводится ради экономии места.

Отметим, что тип оптической поверхности (11) был выбран не случайно. Эта поверхность примечательна не только тем, что для нее известно точное выражение УХФ. Не менее существенным является еще и то, что, как известно, поверхностями такого вида можно локально аппроксимировать всякую сложную (но гладкую) поверхность в пространстве, т.е. с помощью элементарных интерполяционных поверхностей (11) можно проводить локальный (сканирующий) анализ свойств любой области светового объема произвольной линейной оптической системы.

Понятно, что для перехода от задач анализа к задачам синтеза поверхностей с наперед заданными свойствами требуется некоторые дополнительные условия (уравнения связи), обеспечивающие совместности задачи. Такими добавочными уравнениями к

системе (2), которая будет содержать в этом случае неизвестные параметры синтезируемой поверхности, являются касательные лучевые инварианты (8) (или (10)), устанавливающие дополнительные связи входные и выходные лучевые поля.

Очевидно, что как при расчете распространения света в конкретной системе, так и при синтезе систем целесообразно находить угловые эйконалы не всех аппроксимирующих параболоидов, а только тех, с которыми связаны трассируемые узкие лучевые пакеты, например, параксиальных и наклонных пучков лучей, каждый раз используя описанный выше алгоритм вычисления $T(\mathbf{p}; \mathbf{p}')$, а затем $T(\mathbf{p}; \mathbf{p}')$.

В данном контексте предлагается, таким образом, один из способов синтеза оптических систем, не обладающих, вообще говоря, симметрией, со сплайн-профилированными поверхностями.

Описанный подход к синтезу поверхностей с использованием касательных лучевых инвариантов и параболической аппроксимации близок по идеологии к подходу, изложенному в работе [3], но обладает одним принципиальным преимуществом перед последним. А именно, эйкональная методика ориентирована на локальные построения поверхности с заданными свойствами для целых пучков лучей, а не для отдельных лучей, как это предложено в [3].

В следующих работах авторы планируют развить технику локального синтеза поверхностей на основе использования касательных лучевых инвариантов.

Заключение

В работе на базе угловой характеристической функции построены новые инварианты оптических систем; приведены их непараксиальные и параксиальные формы. Предложено использовать данные инвариантные характеристики для (локального) анализа и синтеза оптических систем.

Введенные инварианты, равно как и понятие касательного углового эйконала, могут также найти свое применение в теории распространения лазерных пучков в оптических системах, где широко используются характеристические функции Гамильтона для обобщений в параксиальной оптике [6].

Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
2. Герцбергер М. Современная геометрическая оптика. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
3. Семин В.А. Расчет асферических поверхностей на основе моделирования оптической системы дифференциальными уравнениями. // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 3. С. 90–95.
4. Солимено С., Крозиньяни Б., Ди Порто П. Дифракция и волноводное распространение света. М.: Мир, 1989.
5. Buchdahl H.A. An introduction to Hamiltonian optics. New York: Dover, 1993.
6. Zhao C., Tan W., Guo Q. Generalized optical ABCD theorem and its application to the diffraction integral calculation. // JOSA A. 2004. V. 21. № 11. P. 2154–2163.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯРКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ СВЕТА ПРИ ВНЕ- И ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

В.В. Назаров, Л.В. Хлопонин, В.Ю. Храмов

Проведены численные исследования яркостных характеристик излучения параметрического генератора света (ПГС) при размещении ПГС внутри и вне резонатора лазера накачки. Показано, что использование внerezонаторной накачки позволяет достичь более чем пятикратного увеличения яркости излучения параметрической генерации при условии оптимизации резонатора ПГС.

Введение

В настоящее время в дальнометрии, системах оптической связи, при проведении лидарных исследований широкое применение нашли лазерные излучатели, включающие ПГС, что позволяет получать излучение генерации в диапазоне 1.5–2 мкм [1–3]. Для ряда применений требуются источники ИК-излучения, имеющие частоту повторения импульсов в диапазоне 1–3 кГц и среднюю мощность генерации более 1 Вт. Необходимым условием эффективного преобразования накачки в ПГС является высокий уровень плотности мощности излучения накачки, требуемой для возбуждения генерации в активном элементе ПГС [4]. Ранее в наших работах мы рассматривали вариант создания лазерной системы, удовлетворяющей вышеприведенным требованиям и использующей размещение ПГС внутри резонатора лазера накачки [5, 6]. Подобная схема, тем не менее, не обеспечивала достаточно высокие значения энергии импульса параметрического излучения на частоте сигнальной волны вследствие обратного сильного воздействия ПГС на условия генерации излучения накачки. Повысить энергию импульса и яркость выходного излучения представляется возможным в случае внerezонаторной схемы накачки ПГС при сохранении высокой частоты следования импульсов.

Целью настоящей работы является проведение численных исследований, направленных на изучение яркостных характеристик параметрической генерации при внутриврезонаторном и внerezонаторном размещении ПГС.

Модели моноимпульсных твердотельных лазерных систем, включающих ПГС

В ходе численного моделирования были рассмотрены два варианта моноимпульсных лазерных систем (рис. 1). Резонатор лазера накачки с внутриврезонаторным ПГС (рис. 1а) включает глухое сферическое зеркало с радиусом кривизны -0.5 м и выходное сферическое зеркало с радиусом кривизны $+0.5$ м, база резонатора равна 1.4 м. Выходное зеркало с коэффициентом отражения 99% на длине волны излучения накачки 1.047 м имеет минимальный коэффициент отражения для длин волн 1.54 мкм и 3.27 мкм. Для учета наведенных тепловых линз в активных элементах в резонаторе размещена компенсирующая линза. Диафрагма диаметром 1.8 мм установлена в резонаторе для получения квазиодномодового излучения накачки. Параметры расчетной схемы максимально соответствовали параметрам схемы, использовавшейся нами при проведении численных и экспериментальных исследований [5, 6].

Резонатор ПГС размещался вблизи перетяжки каустики пучка накачки, что позволило при проведении расчетов воспользоваться коллинеарной схемой трехволнового взаимодействия излучения накачки, сигнальной и холостой волн. Резонатор ПГС был образован вогнутыми сферическими зеркалами, кривизна которых при проведении расчетов варьировалась. База резонатора составляла 0.07 м. Глухое зеркало резонатора имело максимальный коэффициент отражения на длине волны сигнала 1.54 мкм. Коэффициент отражения выходного зеркала на длине волны сигнала варьировался. Коэф-

коэффициенты отражения обоих зеркал для холостой волны составляли ~20%, что обеспечивало однорезонаторный режим параметрической генерации. Процесс параметрической генерации осуществлялся в кристалле КТР размерами 4×4×40 мм, который находился в центре резонатора.

Эквивалентная оптическая схема резонатора твердотельного моноимпульсного лазера, осуществляющего внерезонаторную накачку ПГС (рис 1б), включала глухое сферическое зеркало с радиусом кривизны +0.4 м, учитывающим тепловую линзу в активном элементе, и диафрагму диаметром 1 мм. База резонатора составляла 0.15 м.

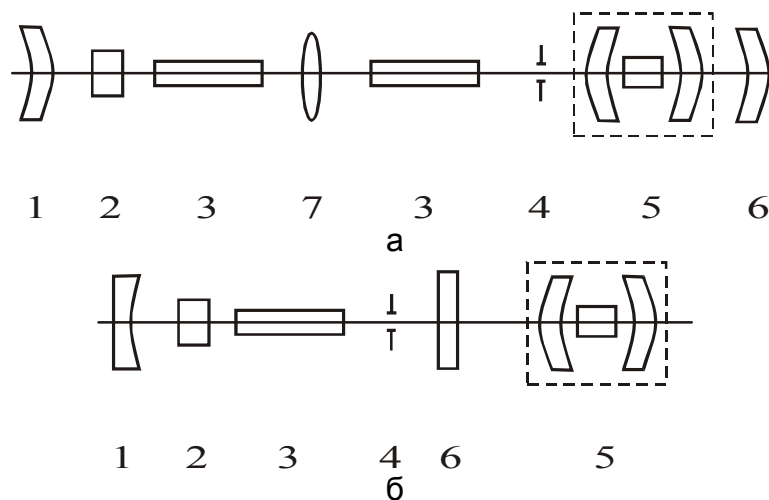


Рис 1. Схемы моноимпульсных лазерных излучателей, включающих ПГС:
1 – глухое зеркало резонатора лазера накачки, 2 – модулятор добротности, 3 – активный элемент, 4 – диафрагма, 5 – резонатор ПГС, 6 – выходное зеркало резонатора лазера накачки, 7 – линза

Результаты численных исследований пространственно-энергетических характеристик излучения параметрической генерации

Для описания внутрирезонаторного поля лазера накачки была применена модель устойчивого резонатора в режиме модулированной добротности с учетом дифракции излучения внутрирезонаторного поля и динамики изменения плотности инверсной населенности в активной среде лазера в процессе генерации [5]. Поля излучения сигнальной и холостой волн внутри резонатора ПГС определялись с учетом процессов дифракции, а также трехволнового взаимодействия в объеме нелинейного кристалла.

Для исследования процессов параметрической генерации в ходе численных исследований определялись временные зависимости мощности накачки внутри резонатора, временные зависимости мощностей сигнальной и холостой волн на выходе ПГС, а также диаметр и расходимость излучения на частоте сигнала. Эти характеристики были использованы для оценки яркости пучка излучения на частоте сигнальной волны, которая рассчитывалась по формуле

$$B \sim \frac{E}{\theta^2 d^2},$$

где E , θ , d – энергия моноимпульса, расходимость, диаметр пучка излучения, соответственно.

Сравнительный анализ характеристик сигнала, полученного при двух вариантах рассмотренных схем накачки, был проведен при одинаковых коэффициентах усиления слабого сигнала в активных элементах лазера накачки. Результаты численных исследований показывают, что использование внерезонаторной схемы накачки ПГС позволяет

получить почти на порядок большие значения энергии импульса сигнала по сравнению с вариантом внутрирезонаторной накачки (рис. 2). Это может объясняться низкой эффективностью преобразования излучения накачки в сигнал при внутрирезонаторной накачке. Причиной этого может быть сильное обратное воздействие сигнала, приводящее к резкому уменьшению мощности излучения накачки [6]. При внерезонаторной накачке ПГС генерация сигнала продолжается практически до окончания импульса накачки. На рис 2 приведены результаты, полученные как для плоского резонатора ПГС, так и оптимизированной конфигурации резонатора ПГС. Для данной конфигурации резонатора лазера накачки найдена оптимальная конфигурация резонатора ПГС. Для оптимальной конфигурации радиусы кривизны зеркал резонатора ПГС составили примерно +3 м. В качестве критерия оптимизации была выбрана максимальная энергетическая эффективность преобразования излучения накачки в излучение на частоте сигнальной волны.

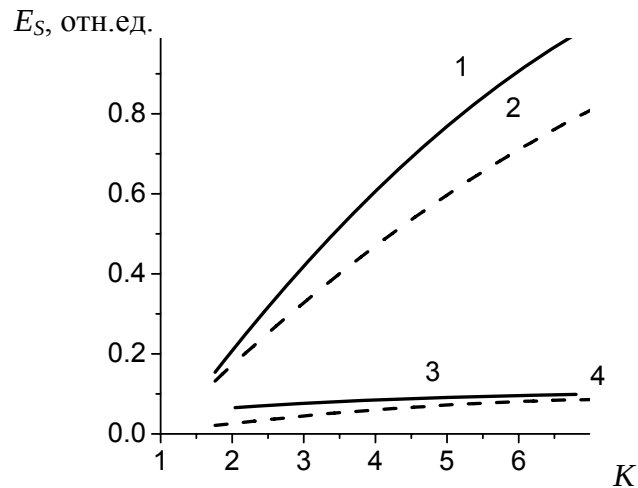


Рис. 2. Зависимость энергии импульса параметрической генерации E_s от коэффициента усиления активной среды K при внерезонаторном (1,2) и внутрирезонаторном (3,4) размещении ПГС: 1, 3 – оптимизированный резонатор ПГС; 2, 4 – плоский резонатор ПГС

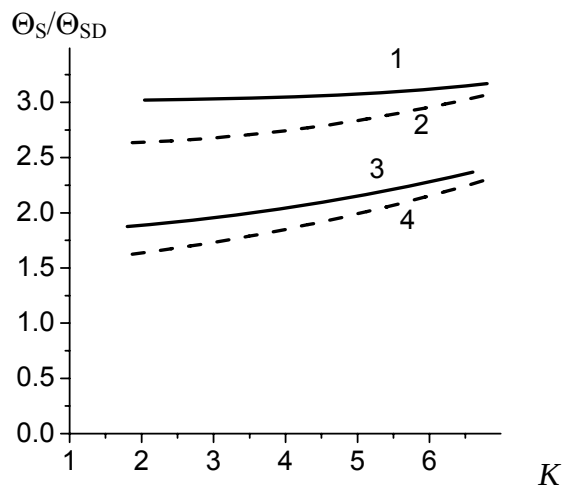


Рис. 3. Зависимость расходимости излучения параметрической генерации Θ_s от коэффициента усиления активной среды K при внерезонаторном (1,2) и внутрирезонаторном (3,4) размещении ПГС: 1, 3 – оптимизированный резонатор ПГС; 2, 4 – плоский резонатор ПГС; Θ_{SD} – значение расходимости, соответствующей дифракционному пределу

Анализ результатов расчетов пространственных характеристик показывает, что угловая расходимость излучения сигнала при переходе к внерезонаторной накачке существенно возрастает в условиях существенно более высокой плотности мощности накачки (рис. 3). Расходимость излучения, полученного в плоском резонаторе ПГС, растет сильнее при увеличении коэффициента усиления активной среды лазера накачки по сравнению с вариантом оптимизированного резонатора ПГС. Следует отметить, что диаметр пучков излучения изменялся незначительно при увеличении коэффициента усиления активной среды.

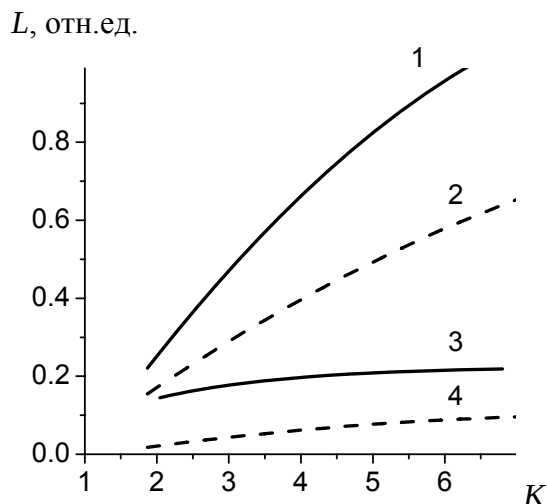


Рис. 4. Зависимость яркости излучения параметрической генерации L от коэффициента усиления активной среды K при внерезонаторном (1, 2) и внутрирезонаторном (3, 4) размещении ПГС: 1, 3 – оптимизированный резонатор ПГС; 2, 4 – плоский резонатор ПГС

Результаты численных исследований двух вариантов оптических схем лазера накачки и ПГС позволили оценить яркость излучения сигнала. Проведенные оценки (рис. 4) показывают, что при сравнительно высоких коэффициентах усиления активной среды применение внерезонаторной схемы накачки ПГС позволяет добиться примерно пятикратного увеличения яркости излучения параметрической генерации.

Заключение

При помощи численной модели моноимпульсного твердотельного лазера, учитывающей процессы дифракции и усиления излучения лазерной и параметрической генерации, проведено исследование яркостных характеристик излучения на частоте сигнальной волны при внутрирезонаторном и внерезонаторном вариантах размещения ПГС. Результаты численного анализа двух рассмотренных схем показывают, что использование внерезонаторного варианта размещения ПГС дает возможность получить примерно пятикратное увеличение яркости и почти десятикратное увеличение энергии импульса излучения параметрической генерации.

Литература

1. Larry R. Marshall, A. Kaz. Eye-safe output from noncritically phase-matched parametric oscillators.. // J. Opt. Soc. Am. B. 1993. V.10. №9. P. 1730–1736
2. Naoumov V.L., Onischenko A.M., Podstavkin A.S. Miniature optical parametric 1064/1573 nm converter. // Proceedings of X Conference on Laser Optics. St-Petersburg, Russia, 2000.

3. J. Chung, A.E.Siegman Singly resonant continuous-wave mode-locked KTiOPO₄ optical parametric oscillator pumped by a Nd:YAG laser. // J. Opt. Soc. Am. B. 1993. V.10. №11. P. 2201–2210.
4. В.Г.Дмитриев, Л.В.Тарасов Прикладная нелинейная оптика: Генераторы второй гармоники и параметрические генераторы света. М.: Радио и связь 1982. 352 с.
5. Калинин А.Г., Назаров В.В., Хлопонин Л.В., Храмов В.Ю. Исследование квазипрерывного внутрирезонаторного ПГС с длиной волны генерации 1.54 мкм // Оптические и лазерные технологии. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. С. 84–94.
6. Калинин А.Г., Назаров В.В., Хлопонин Л.В., Храмов В.Ю. Исследование динамики внутрирезонаторной параметрической генерации на длине волны 1.54 мкм. // Оптический журнал. 2002. Т.69. №3. С. 54–58.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНО-СВЕТОДИОДНОГО АППАРАТА «СПЕКТР ЛЦ-02» В ЛЕЧЕНИИ РЯДА ЗАБОЛЕВАНИЙ

А.Б. Веселовский, В.В. Кирьянова, А.С. Митрофанов, Г.Д. Фефилов

В работе приведены результаты исследований эффективности применения монохромного светодиодного излучения при лечении хронического тонзиллита, компрессионно-ишемической невропатии и последствий перинатальных поражений центральной нервной системы у детей.

Введение

Фототерапия с помощью оптического излучения с узкой спектральной полосой (фотохромотерапия) находит все более широкое применение в медицинской практике. В настоящее время достоверно выявлена селективность (избирательность) действия различных длин волн оптического излучения на течение различных патологических процессов. Однако недостаточность теоретического обоснования по выбору длины волны излучения, дозы облучения и облучаемых поверхностей, зон, точек, органов и т.д. при той или иной патологии накладывает большую ответственность как на разработчиков аппаратуры, так и на практикующих врачей. Поэтому экспериментальные исследования в области эффективности применения излучения той или иной длины волны и оптимизация методик лечения различных заболеваний сохраняют высокую актуальность.

Исследования эффективности фотохромотерапии проводились с помощью специальных рабочих инструментов аппарата «Спектр ЛЦ-02».

Эффективность применения монохромного светодиодного излучения при лечении хронического тонзиллита, компрессионно-ишемической невропатии и последствий перинатальных поражений центральной нервной системы у детей оценивалась по общепринятой методике, путем сравнения клинических и ряда специальных для данного заболевания показателей у пациентов основной (экспериментальной) группы (или нескольких групп) и пациентов контрольной группы. При наличии нескольких экспериментальных групп проводился сравнительный анализ показателей для пациентов этих групп с целью выявления наиболее эффективной методики лечения.

Описание аппарата

Аппарат «Спектр ЛЦ-02» предназначен для лазерной терапии и светодиодной фотохромотерапии, в том числе фоторефлексотерапии и пунктурной терапии, путем воздействия на патологические и рефлексогенные зоны, внутренние органы (черескожно), биологически активные точки низкоинтенсивным лазерным и светодиодным излучением различных участков оптического спектра.

Принцип лечебного действия аппарата основан на селективном поглощении биологическими тканями низкоинтенсивного (низкоэнергетического) оптического излучения различных длин волн, оказывающем лечебный эффект.

В состав аппарата входит блок питания и управления и набор оригинальных рабочих инструментов: лазерный облучатель, светодиодные матрицы, держатель накопчиков со сменными светодиодными наконечниками. Светодиодные матрицы (совокупность светодиодов) использовались для облучения широких полей или зон, а наконечники (одиночные светодиоды) – для локального облучения очагов патологии.

Блок питания и управления предназначен для управления режимами работы и параметрами излучения рабочих инструментов, а также для визуального контроля режимов и параметров с помощью цифровых и световых индикаторов.

Блок питания и управления обеспечивает возможность работы излучателей в 2-х режимах: непрерывном и импульсном. Диапазон частот следования импульсов - 0,2–1500 Гц. Ряд частот, заложенный в аппарате: 0,2; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 28; 34; 38; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 150; 300; 1000; 1500 Гц. Предусмотрено, что набор частот в импульсном режиме работы излучателей должен позволять реализовать, в том числе, и некоторые частоты Шумана (7 Гц, 17 Гц и т.д.), а также частоты, соответствующие ряду Фибоначчи (0, 1, 2, 3, 5, 8, 13 Гц и т.д.), что отсутствует во многих аналогичных аппаратах.

Диапазон плотностей мощности оптического излучения в зависимости от используемых излучателей лежит в пределах от 0,5 до 150 мВт/см². Мощность излучения может дискретно уменьшаться до 0,75 или 0,5 от максимальной, что в ряде случаев является необходимым, например, при работе с грудными детьми. Работой излучателей программно управляет микроЭВМ, что позволяет повысить стабильность мощности излучения и воспроизводимость этого параметра от аппарата к аппарату.

В аппарате используются светодиодные излучатели, работающие как в видимом ($\lambda = 670$ нм, $\lambda = 610$ нм, $\lambda = 580$ нм, $\lambda = 540$ нм, $\lambda = 470$ нм, $\lambda = 400$ нм), так и в ближнем ИК диапазоне ($\lambda = 840$ нм). Предусмотрена возможность контроля ИК излучения с помощью встроенного в блок питания и управления фотодиодного устройства и светового индикатора.

Таким образом, благодаря использованию современных излучателей, микропроцессорной техники, современной элементной базы и оригинальной программы работы аппарата достигнуты широкие технические возможности, такие как широкий выбор длины волны излучения, выбор режимов работы, широкий набор частот в импульсном режиме работы, малогабаритность, простота и удобство в эксплуатации и др.

Аппарат «Спектр ЛЦ-02» разработан сотрудниками СПб ГУИТМО, прошел необходимые испытания и разрешен Минздравом РФ к применению в медицинской практике, что подтверждается наличием государственного регистрационного удостоверения и сертификата соответствия.

При использовании аппарата в клинических исследованиях энергетическая экспозиция (или доза облучения) W (Дж/см²) рассчитывалась по формулам:

$$\text{для непрерывного режима: } W = 0,06 \cdot E_{\max} \cdot T \cdot L$$

$$\text{для импульсного режима: } W = 0,06 \cdot E_{\max} / 2 \cdot T \cdot L,$$

где T – время процедуры (мин), L – уровень мощности излучения ($L = 1, 0,75, 0,5$), $E_{\max}$ – максимальная облученность, создаваемая используемым рабочим инструментом (мВт/см²).

Результаты исследований при лечении хронического тонзиллита

Хронический тонзиллит является распространенным заболеванием среди всех групп населения, особенно среди детей и лиц молодого возраста, и может привести к возникновению тяжелых осложнений со стороны сердечно-сосудистой системы, почек, суставов и других органов. Он занимает одно из первых мест среди всех заболеваний ЛОР органов.

Проблема лечения хронического тонзиллита, несмотря на то, что разработано множество различных методов, состоит в восстановлении утраченных функций миндалин. К сожалению, традиционные и достаточно эффективные методы, такие, например, как промывание лакун небных миндалин различными медикаментозными средствами, не всегда возможны в силу ряда объективных и субъективных причин: особенности анатомического строения тонзилл, беспокойное поведение ребенка и т.д. Поэтому в последние годы все большее внимание привлекают физические и, в частности, фототерапевтические методы лечения.

На базе Санкт-Петербургского научно-исследовательского института уха, горла, носа и речи Федерального агентства по здравоохранению и социальному развитию были проведены исследования по использованию красного и синего светодиодного излучения аппарата «Спектр ЛЦ-02» в комплексном лечении хронического тонзиллита.

В исследовании ставились следующие задачи:

- исследовать влияние красного и синего светодиодного излучения на иммунологическую функцию небных миндалин в динамике;
- оценить влияние красного и синего излучения на степень хронической интоксикации и сенсибилизации у больных хроническим тонзиллитом;
- провести сравнительный анализ клинико-лабораторной эффективности фотохромотерапии и традиционного метода лечения (промывание небных миндалин антисептическими средствами);
- разработать рекомендации по использованию светодиодного излучения аппарата при лечении хронического тонзиллита.

Фотохромотерапия проводилась следующим образом:

- локальное воздействие светодиодными наконечниками красного и синего излучения непосредственно на небные миндалины по 1 минуте с каждой стороны;
- зональное облучение светодиодными матрицами красного и синего излучения на кожу в области проекции небных миндалин и регионарных лимфоузлов в течение 5 минут для красного и 6 минут для синего излучения. В среднем проводилось по 8–10 процедур.

В зависимости от метода лечения все больные были разделены на 4 группы, равноценные по числу больных, по полу и возрасту:

- в лечении 1-ой группы использовали только базовый метод лечения – 8–10 промываний лакун небных миндалин различными антисептическими средствами;
- больным 2-ой группы после промывания лакун проводили локальное и зональное облучение красным светом с длиной волны 670 нм;
- больным 3-ей группы после промывания лакун проводили локальное и зональное облучение синим светом с длиной волны 480 нм;
- лечение больных 4-ой группы включало комплексную фототерапию – после промывания лакун проводили облучение красным и синим светом в чередовании через день.

Эффективность методов лечения оценивалась по наличию положительной динамики в течение заболевания, сразу после лечения и в отдаленные сроки.

Результаты исследований показали, что использованные методы фотохромотерапии имеют в целом положительный, но различный эффект.

Непосредственно после лечения у больных 1-ой группы улучшение самочувствия и исчезновение или значительное уменьшение жалоб отмечено у 65 % взрослых и 64 % детей. У больных 2-ой и 4-ой групп процент больных с улучшением был значительно выше: 89 % взрослых и 84 % детей. В 3-ей группе положительная динамика была отмечена у 70 % взрослых и 75 % детей.

Важно отметить, что у больных 3-ей и 4-ой групп (с применением синего излучения) быстрее исчезали жалобы на боли и першение в горле (после 2–4 процедур), по сравнению с 1-ой и 2-ой группами, что свидетельствует о хорошем обезболивающем действием синего излучения.

Результаты исследований показали, что улучшение положительной динамики местных признаков хронического тонзиллита, объективной его симптоматики происходит у 70 % пациентов 2-ой и 4-ой групп, в то время как в 1-ой и 3-ей группах – только у 50 % пациентов. Кроме того, более выраженная динамика была отмечена у детей.

Наиболее важным в оценке эффективности лечения является сохранение терапевтического эффекта в отдаленные сроки – через 6, 12, 18 месяцев. Осмотр больных 2-ой

и 4-ой групп в отдаленном периоде показал сохранение стойкого положительного эффекта у 80% больных. В 3-ей группе эффект сохранился у 50% больных, а в 1-ой группе – только у 28% больных (см. рис. 1).

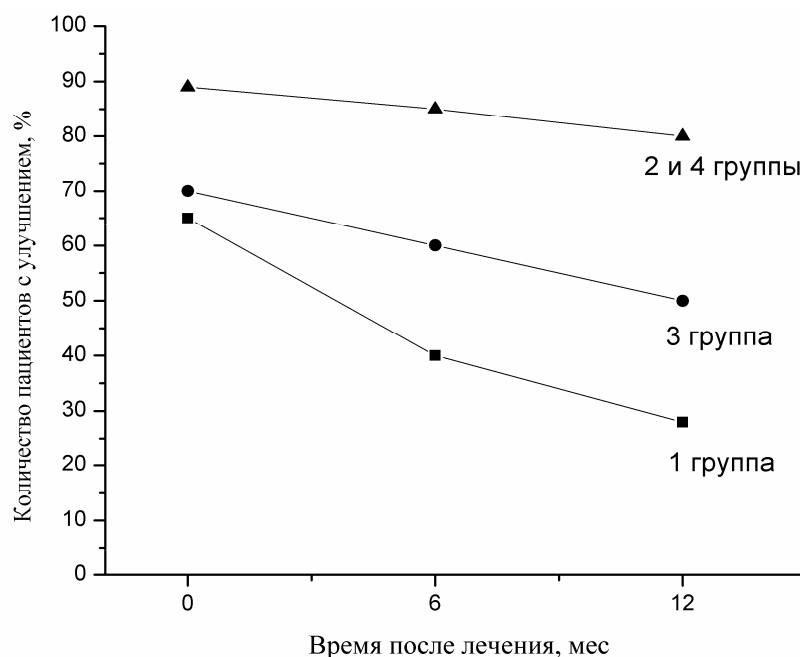


Рис. 1. Динамика клинического эффекта после курса лечения

Таким образом, полученные результаты показывают выраженную терапевтическую эффективность методов лечения, проведенных во 2-ой и 4-ой группах больных. Поэтому локальное (непосредственно на небные миндалины) и зональное (на область регионарных лимфатических узлов) облучение красным светодиодным излучением после промывания лакун, также как облучение красным и синим излучением в чередовании через день, может быть рекомендовано при лечении хронического тонзиллита с помощью использованного аппарата [1].

Результаты исследований при лечении компрессионно-ишемической невропатии

Заболевания периферической нервной системы (ПНС) являются одной из ведущих проблем в неврологии. К наиболее распространенным заболеваниям ПНС относятся компрессионно-ишемические невропатии, которые составляют 53%. Компрессионно-ишемические невропатии – это заболевание нервного ствола и его ветвей, вызванное локальным раздражением, компрессией и ишемией в анатомически и биомеханически уязвимых местах прохождения нерва. Лечение таких заболеваний представляет сложную задачу для современной неврологии. В связи с этим исследование эффективности применения фототерапии представляет особый интерес.

В этом случае были проведены исследования по эффективности применения красного и зеленого светодиодного излучения. Вначале были проведены экспериментальные исследования на лабораторных крысах в модели компрессионно-ишемической невропатии в острой стадии. В результате этих исследований выявлено, что как красное, так и зеленое светодиодное излучение оказывают положительное влияние на функциональное состояние нерва, однако эффективность зеленого излучения оказалась выше.

На основе полученных данных были проведены клинические исследования на 92 больных в комплексной терапии туннельных невропатий с использованием зеленого из-

лучения (длина волны 540 нм). Облучение проводили контактно, неподвижно на область компрессии нерва и контактно, лабильно над местом проекции пораженного нерва по 5 минут за одну процедуру. Доза облучения составляла 3 Дж/см². Курс лечения состоял из 10 процедур, проводимых ежедневно. Эффективность фототерапии оценивалась по ряду клинических и других показателей на фоне контрольной группы больных, которым фототерапия не проводилась.

В основной группе под воздействием комплексного лечения произошло более выраженное обратное развитие субъективных и объективных проявлений расстройств чувствительности, наблюдалась выраженная редукция болевого синдрома, у всех больных отмечалась положительная динамика двигательных нарушений, обусловленных парезами мышц. В целом, в результате комплексного лечения количество больных со средней степенью тяжести уменьшилось с 35 % до 15 %, тяжелая степень поражения не диагностировалась совсем. Полное выздоровление наступило у 30 % больных.

В контрольной группе больных количество пациентов со средней степенью тяжести уменьшилось крайне незначительно (40 % до 37 %), с тяжелой степенью поражения уменьшилось с 33 % до 13 %. Полное выздоровление диагностировалось у 17 % пациентов (см. рис. 2).

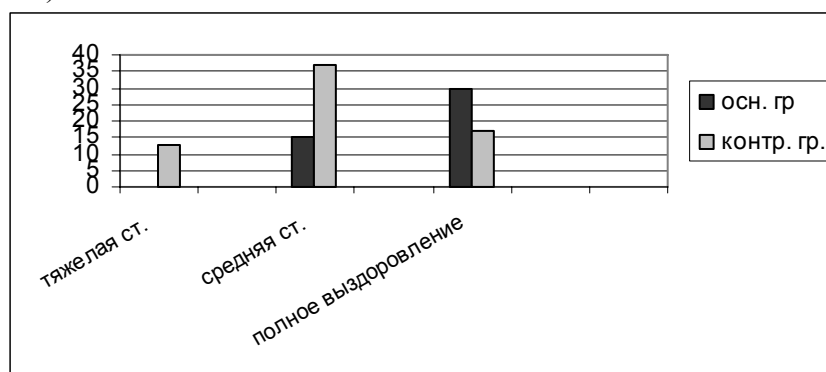


Рис. 2. Результаты лечения в основной и контрольной группах больных

Таким образом, можно считать обоснованным и рекомендовать комплексный метод лечения компрессионно-ишемической невропатии с использованием светодиодной матрицы зеленого излучения аппарата «Спектр ЛЦ-02». Применение матрицы зеленого излучения способствует положительной динамике клинических проявлений, улучшает показатели сенсорных и моторных волокон периферических нервов [2].

Результаты исследований при лечении последствий перинатальных поражений центральной нервной системы у детей

Одной из актуальных проблем в настоящее время является разработка индивидуальных программ коррекции и лечения для детей с последствиями перинатальных поражений центральной нервной системы с учетом патогенетических механизмов развития тех или иных проявлений. Ограничение применения некоторых лекарственных средств в детском возрасте, а также возможность развития побочных эффектов на фоне приема медикаментозных препаратов делают необходимым поиск новых методов лечения, в том числе и фототерапевтических.

Световое излучение зеленой области спектра уравнивает процессы возбуждения и торможения в нервной системе, влияет на сосудистый тонус (оказывая антиспастическое действие) и вегетативные дисфункции. Это делает зеленый свет перспективным в проблеме улучшения функционального состояния стволовых структур, оказания нормализующего действия на регуляторные процессы в организме и церебральную гемодинамику.

Исследования эффективности использования светодиодной матрицы зеленого излучения были проведены по результатам лечения 65 детей в возрасте 6–10 лет с проявлениями последствий перинатальных церебральных и спинальных поражений нервной системы в виде минимальной мозговой дисфункции, неврозоподобного нарушения сна, невроза навязчивых движений, последствий спинальных нарушений. Для оценки эффективности дети были разделены на 2 группы. Основная группа в количестве 35 детей без медикаментозной терапии получала лечение с применением светодиодной матрицы зеленого излучения (длина волны 540 нм) на шею и «воротниковую» зону по лабильной методике. Время экспозиции 5–7 минут. Курс лечения – 10 процедур, проводимых ежедневно. Контрольная группа в количестве 30 детей получала медикаментозное лечение.

Оценка эффективности лечения проводилась по следующим критериям: динамика клинических проявлений (общее состояние, жалобы), функциональное состояние шейного отдела позвоночника, доплерографические показатели состояния церебрального кровотока.

Получены следующие результаты.

В основной группе. Переносимость процедур всеми детьми основной группы была хорошая, что связано с безболезненностью, неинвазивностью и комфортностью получаемых процедур. Побочных явлений не зарегистрировано. Степень выраженности жалоб значительно уменьшилась. Так, жалобы на эмоциональную лабильность уменьшились у 83 % детей, на головную боль – у 75 %, на нарушения сна – у 53 % детей. У каждого второго ребенка уменьшились астенические проявления, невнимательность, возбудимость и навязчивые движения, а у трети детей уменьшилась раздражительность. После курса лечения отмечено уменьшение напряжения шейно-затылочных групп и болезненности точек позвоночных артерий. При проведении доплерографических исследований отмечены наибольшие положительные изменения кровотока в вертебробазилярном бассейне.

В контрольной группе. У двух детей контрольной группы отмечались побочные явления на фоне приема медикаментозных препаратов в виде аллергической сыпи и головокружений. После курса лечения у детей реже наблюдались головные боли, значительно уменьшились эмоциональная лабильность, гиперактивность, невнимательность, раздражительность. Однако динамика функционального состояния шейного отдела позвоночника в сравнении с основной группой оказалась менее выраженной и касалась только уменьшения болезненности точек позвоночных артерий. У детей на фоне медикаментозного лечения произошло снижение скоростных показателей кровотока.

Таким образом, показана эффективность метода лечения детей с последствиями перинатальных поражений центральной нервной системы, основанного на облучении шеи и «воротниковой» зоны зеленым светодиодным излучением с длиной волны 540 нм. Использование светодиодной матрицы зеленого излучения аппарата «Спектр ЛЦ-02» дает положительную динамику на клинические проявления при данной патологии, улучшает функциональное состояние ствольных структур, что приводит к нормализации регуляторных процессов в организме [3, 4].

Заключение

Результаты проведенных исследований показали высокую терапевтическую эффективность применения узкополосного красного, зеленого и синего светодиодного излучения в лечении ряда распространенных заболеваний. Благодаря универсальности световых рабочих инструментов аппарата «Спектр ЛЦ-02», обеспечивающих не только широкий выбор длины волны светодиодного излучения, но и возможность как локального облучения, так и облучения широких зон, разработаны и предложены новые мето-

дики лечения хронического тонзиллита, компрессионно-ишемической невропатии и последствий перинатальных поражений центральной нервной системы у детей. Использование светодиодов, являющихся более доступными, дешевыми и надежными источниками излучения по сравнению с лазерами, играет важную роль в дальнейшем развитии фотохромотерапии.

Литература

1. Веселовский А.Б., Кирьянова В.В., Линьков В.И., Хаммад И.А. Применение фотохромотерапии в лечении хронического тонзиллита. // Ученые записки СПб ГМУ. Т. XI. № 4. 2004. С.59–61.
2. Веселовский А.Б., Гузалов П.И., Жулев Н.М., Кирьянова В.В. Селективная фотохромотерапия при компрессионно-ишемических невропатиях. // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. Научно-практический журнал. 2004. № 5. С.10–16.
3. Александрова В.А., Братова Е.А. Веселовский А.Б., Кирьянова В.В. Использование монохроматического некогерентного светового излучения в лечении детей с последствиями перинатальных поражений центральной нервной системы. / Сб. тезисов межрегиональной научно-практической конференции «Актуальные вопросы физиотерапии, курортологии и восстановительной медицины». СПб, 5-6 октября 2004. С.13–14.
4. Александрова В.А., Братова Е.А., Веселовский А.Б., Кирьянова В.В. Применение фотохромотерапии в лечении детей с последствиями перинатальных поражений центральной нервной системы // Сб. тезисов научно-практической конференции «Актуальные вопросы светотерапии». СПб, 9 июня 2005. С. 7–8

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТОВ ЭКСТРЕМУМА В ДИФРАКЦИОННОЙ КАРТИНЕ ЭЙРИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АДДИТИВНОЙ ПОМЕХИ

Г.Д. Фефилов

С помощью метода имитационного моделирования исследовано влияния аддитивной помехи на величину погрешности определения экстремальных значений в дифракционной картине Эйри. Показано, что без применения специальных мер погрешность определения экстремальных значений, в основном, существенно больше 1%. Уменьшить погрешность определения экстремальных значений до величин менее 1% позволяет применение метода весовой обработки путем свертки анализируемого сигнала с оптимальной весовой функцией.

Введение

Одним из способов получения информации о линейном размере микрообъекта является измерение линейного (углового) размера боковых лепестков его дифракционной картины. При облучении объекта круглой формы пучком лазерного излучения в дальней зоне возникает дифракционная картина, известная под названием картины Эйри, имеющая вид светлого диска, окруженного светлыми и темными кольцами, интенсивность которых быстро уменьшается с увеличением радиуса [1]. Для измерения ширины дифракционного кольца производится радиальное сканирование дифракционной картины Эйри и преобразование распределения интенсивности во временной электрический сигнал $U(t)$, вид которого, нормированный к единице, показан на рис. 1 (сигнал 1). В полученном сигнале фиксируются моменты экстремума, соответствующие минимумам интенсивности дифракционной картины. Интервалы времени между выделенными моментами появления экстремума сигнала $U(t)$ прямо пропорциональны ширине соответствующих дифракционных колец.

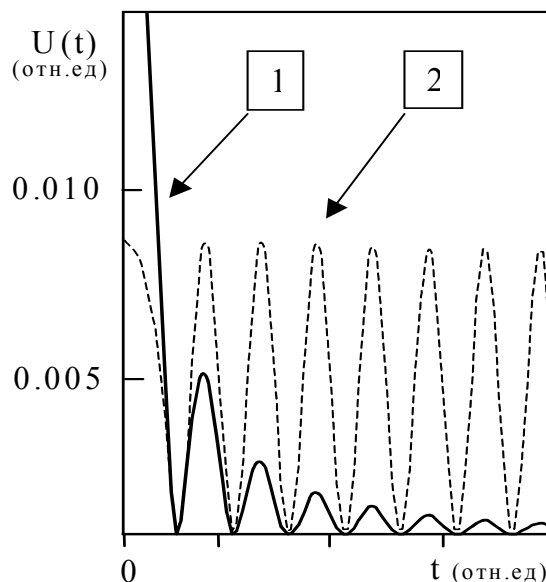


Рис. 1. Сигнал $U(t) = [2J_1(\omega_0 t)/\omega_0 t]^2$, получаемый при сканировании дифракционной картины Эйри (1); сигнал $U_g(t) = \omega_0 t \cdot 4J_1^2(\omega_0 t)$, на выходе КИХ-фильтра (2)

В любом эксперименте регистрация сигнала сопровождается принципиально неустранимой аддитивной помехой, воздействие которой на этапах преобразования сигнала приводит к появлению погрешности измерения, поэтому можно говорить лишь о

степени влияния аддитивной помехи на результат измерения и путях фильтрации полезного сигнала от помехи [2, 3, 4].

Особенности сигнала, используемого в лазерной дифрактометрии, и расчет погрешности определения экстремумов в нем при воздействии аддитивной помехи

На практике сигнал, получаемый при сканировании дифракционной картины Эйри, ограничен несколькими периодами и описывается выражением $U(t) = [2J_1(\omega_0 t)/\omega_0 t]^2$ (где J_1 – функция Бесселя первого рода; $\omega_0 = 2\pi aV/\lambda F$ – частота анализируемого сигнала; a – контролируемый размер объекта; V – скорость сканирования; λ – длина волны излучения лазера; F – фокусное расстояние Фурье-объектива; t – текущее время). Фиксирование моментов появления экстремума в таком сигнале – непростая техническая задача. Это обусловлено, в основном, двумя факторами:

- сложностью фильтрации аддитивной помехи, так как практическая ширина спектра сигнала с быстро затухающей амплитудой в десятки раз больше значения частоты анализируемого сигнала [5];
- низкой эффективностью подавления аддитивной помехи традиционными полосовыми фильтрами за время сравнимое с периодом сигнала, так как фильтры, представляющие собой пассивные или активные *LRC*-цепи, обладают теоретически бесконечной импульсной характеристикой и теоретически бесконечным временем установления сигнала на выходе при скачке амплитуды сигнала на входе фильтра [6, 7].

Определители момента появления экстремума делятся на две основные группы [8]:

- устройства, в основу работы которых положено определение максимального или минимального значения амплитуды сигнала, например, вычитанием сдвинутого во времени сигнала из исходного;
- устройства с предварительным дифференцированием анализируемого сигнала, с его помощью момент появления экстремума фиксируется по переходу через ноль производной анализируемого сигнала.

Из-за влияния аддитивной помехи срабатывание устройства фиксирования момента экстремума происходит либо раньше, либо позже. Поэтому за момент появления экстремума могут приниматься значения сигнала, отстоящие от истинного на интервал времени $\pm \Delta t_{extr}$.

Применяя метод имитационного моделирования, оценим влияние аддитивной помехи на погрешность фиксирования моментов появления экстремума двумя рассмотренными способами в сигнале, получаемом при сканировании дифракционной картины Эйри. При этом следует учитывать, что на практике приведенная погрешность фиксирования моментов появления экстремума может быть не более 0.2% [8], а технологический допуск на многие промышленные изделия, имеющие микронные размеры, составляет 1% и менее. Принято считать, что аддитивная помеха является белым шумом и характеризуется математическим ожиданием M_n , и дисперсией σ_n^2 [9]. Разложим аналитическое выражение $U(t) = [2J_1(\omega_0 t)/\omega_0 t]^2$ в ряд Фурье на интервале $\pm T_0/2$ относительно минимума сигнала, здесь T_0 – период сигнала $U(t)$. Ограничиваясь двумя членами разложения и учитывая среднее значение шума, представим ряд Фурье в виде

$$U(t) \cong U_{\max} - \frac{U_{\max}}{\cos(\omega_0 t)} + M_n, \quad (1)$$

где $U_{\max}$ – амплитуда сигнала в точке максимума. Величину наибольшей погрешности фиксирования момента экстремума $\pm \Delta t_{ext}$ найдем из выражения (1), подставив в него в

момент времени $t = 0$ вместо t и $U(t)$, соответственно $\pm \Delta t_{ext}$ и $(M_n + 3\sigma_n^2)$, тогда при фиксировании минимального значения амплитуды сигнала $U(t)$

$$\pm \Delta t_{extr} = \frac{T_0}{2\pi} \cdot \arccos \left(1 - \frac{3\sigma_n^2}{U_{\max}} \right), \quad (2)$$

а для устройств с предварительным дифференцированием сигнала погрешность фиксирования момента экстремума определяется из выражения

$$\pm \Delta t_{extr} = \frac{T_0}{2\pi} \cdot \arcsin \frac{3\sigma_n^2}{U_0}. \quad (3)$$

В сигнале $U(t) = [2J_1(\omega_0 t)/\omega_0 t]^2$ амплитуда переменной составляющей уменьшается по кубическому закону, поэтому отношение сигнал / шум для всех периодов сигнала $U(t)$ неодинаково. Для оценки погрешности фиксирования моментов экстремума в сигнале $U(t)$ зададим величину отношения сигнал / шум равной 10 и 100 для первого периода сигнала. Тогда при неизменном уровне аддитивной помехи отношение сигнал / шум в последующих периодах сигнала $U(t)$ уменьшается в соответствии с уменьшением амплитуды переменной составляющей в нем. Используя выражения (2) и (3), моделируя два способа фиксирования моментов появления экстремума, рассчитаны величины относительной погрешности $\pm \Delta t_{extr}$ в шести первых периодах сигнала $U(t)$. Результаты вычислений приведены в табл. 1.

Анализируемый сигнал	Отношение сигнал-шум	Относительная погрешность $\pm \Delta t_{extr}$ фиксирования моментов экстремума в шести минимумах анализируемого сигнала					
		1	2	3	4	5	6
$U(t)$	10	6.9%	14%	22%	33%	45%	57%
	100	2.3%	4.6%	7.5%	11%	15%	19%
$dU(t)/dt$	10	0.5%	2.0%	5.3%	11%	20%	32%
	100	0.2%	0.7%	1.7%	3.3%	6.4%	11%

Таблица 1. Погрешность фиксирования моментов экстремума в сигнале $U(t)$

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что при фиксировании минимального значения амплитуды в сигнале $U(t)$, величина относительной погрешности $\pm \Delta t_{extr}$ интенсивно возрастает от периода к периоду в соответствии с уменьшением амплитуды в нем и при этом составляет недопустимо большую величину как при отношении сигнал / шум, равном 10, так и при 100. После предварительного дифференцирования сигнала $U(t)$ погрешность $\pm \Delta t_{extr}$ становится приблизительно в три раза меньше и не превышает 1% только при отношении сигнал / шум, равном 100 для первых двух минимумов сигнала $U'(t)$, что при широкой полосе спектра частот, занимаемой сигналом $U(t)$, относительно частоты ω_0 является трудно выполнимой задачей.

В лазерной дифрактометрии фильтрацию сигнала от аддитивной помехи целесообразно проводить в два этапа. На первом этапе выравнивается амплитуда переменной составляющей сигнала $U(t) = [2J_1(\omega_0 t)/\omega_0 t]^2$ путем свертки с оптимальной весовой функции $g(u, t)$. В результате преобразования возникает сигнал вида $U_g(t) = \omega_0 t \cdot 4J_1^2(\omega_0 t)$ [10], как показано на рис. 1 (сигнал 2). Данное преобразование выполняется фильтром, обладающим конечной импульсной характеристикой (КИХ–

фильтр) [6, 7], который может быть реализован как в пространственной, так и пространственно-временной области. На втором этапе подавляется аддитивная помеха с использованием полосовых фильтров, применение которых становится возможным, так как на выходе КИХ-фильтра изменен характер сигнала, а практическая ширина его спектра всего в 3–5 раз больше частоты анализируемого сигнала [5].

После выравнивания амплитуды переменной составляющей существенно уменьшается погрешность фиксирования момента появления экстремума в анализируемом сигнале, не превышающая 0.5% для любого периода сигнала $U_g(t)$, при отношении сигнал / шум 10. С увеличением отношения сигнал / шум влияние аддитивной помехи на погрешность фиксирования момента появления экстремума становится еще меньше.

Заключение

Проведенные исследования показывают:

- из двух рассмотренных способов фиксирования момента появления экстремума наиболее помехоустойчивым является способ, в котором применяется предварительное дифференцирование анализируемого сигнала, при этом погрешность фиксирования моментов появления экстремума приблизительно в три раза меньше;
- из-за влияния аддитивной помехи величина относительной погрешности $\pm \Delta t_{extr}$ составляет менее 1% только при отношении сигнал / шум, равном 100 для первых двух минимумов сигнала, после его предварительного дифференцирования, что при широкой полосе частот, занимаемой сигналом $U(t) = [2J_1(\omega_0 t) / \omega_0 t]^2$, является практически трудно выполнимой задачей.

Применение метода весовой обработки, который заключается в свертке анализируемого сигнала с оптимальной весовой функцией, существенно уменьшает погрешность фиксирования моментов появления экстремума в анализируемом сигнале. При этом погрешность фиксирования моментов появления экстремума не превышает 0.5% для любого периода сигнала $U_g(t)$ при отношении сигнал / шум, равном 10.

Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
2. Харкевич А.А. Борьба с помехами. М.: Наука, 1965. 276 с.
3. Якушенков Ю.Г., Луканцев В.Н., Колосов М.П. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. М.: Радио и связь. 1981. 86 с.
4. Волгин Л.И. Методы построения измерительных устройств с малой аддитивной погрешностью. // Измерение, контроль, автоматизация. 1977. №3(11). С. 11–20.
5. Митрофанов А.С., Фефилов Г.Д. Анализ спектра сигналов и определение полосы пропускания дифракционного измерительного преобразователя. // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1989. Т. XXXII. № 11. С. 69–73.
6. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов. Л.: Энергоиздат. 1990. 192 с.
7. Адаптивные фильтры. Пер. с англ./ Под редакцией К.Ф.Н. Коуэна и П.М. Гранта. – М.: Мир, 1988. 392с., ил.
8. Иванов Б.Р. Исследование и разработка структур определителей экстремума для информационно-измерительных систем. Автореферат канд. дисс. Киев, 1974.
9. Суходоев И.В. Шумы электрических цепей. М.: Связь, 1975. 351 с.
10. Фефилов Г.Д. Дифракционный способ измерения линейного размера изделия и устройство для его осуществления. // А.с. №1357701. Оpubл. БИ. 1987. №45.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННОГО ПОЛЯ, ФОРМИРУЕМОГО СОВОКУПНОСТЬЮ ИДЕНТИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОРОИДАЛЬНЫХ ВОЛН

А.В. Нелепец, А.В. Тарлыков, В.А. Тарлыков

Рассмотрены особенности формирования дифракционного поля для объекта, представляющего собой регулярную систему пересекающихся окружностей; построена структура дифрагированного поля, описаны положения плоскостей Тальбота; представлены результаты экспериментального исследования дифрагированного поля.

Введение

В настоящее время проявляется интерес к использованию регулярной структуры оптического излучения в биологии и медицине, в частности, в вопросах лазерной биостимуляции [1]. Одним из аспектов такого применения является наличие плоскостей саморепродукции [1, 2], появляющихся при освещении периодической структуры когерентным излучением. Структура дифрагированного поля определяется видом рисунка.

Обычно для формирования регулярной структуры оптического поля используются сеточные структуры с ортогональной системой расположения экранов или отверстий малого диаметра. При этом предполагается, что отверстия не пересекаются. Но, наряду с такими системами, можно использовать и многосвязные элементы.

В работе для формирования регулярной структуры дифрагированного поля была исследована система пересекающихся круговых колец, образованных путем радиальной трансляции базового элемента и путем ортогональной трансляции базового элемента [3]. Кольца смещались друг относительно друга на половину диаметра. Для такого вида базового элемента, с точки зрения геометрической теории дифракции, результирующее дифракционное поле образуется в результате интерференции дифрагированных тороидальных волн.

Один из способов создания рисунка – трансляция исходной фигуры по двум направлениям (в частном случае – ортогональным) или в радиальных направлениях, принимая за центр исходную фигуру. Транслируемая фигура сама может иметь периодическую структуру. В этом случае в дифракционной картине (ДК) появятся интерференционные структуры, отвечающие как за периодичность структуры объекта, так и за период трансляции.

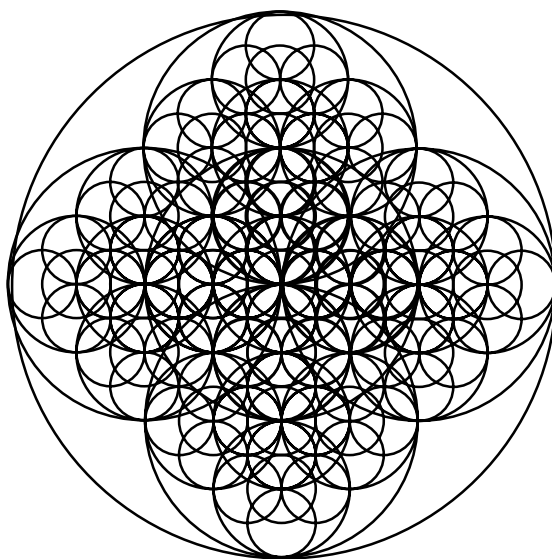


Рис. Фрактальный дифракционный элемент (4 направления и три уровня)

Цель работы – расчет Фурье-спектра фрактального дифракционного элемента, имеющего радиальную симметрию, и выявление основных закономерностей изменения ДК в зависимости от уровня фрактальности.

Геометрическая структура фрактального дифракционного элемента для 8 направлений представляет собой совокупность пересекающихся окружностей (рис. 1). На каждом этапе формирования структура строится из самоподобных элементов изменяющегося масштаба, что позволяет говорить о фрактальности геометрической структуры дифракционного элемента.

Основным (базовым) элементом, из которого строятся все последующие уровни, является кольцо. Элемент первого уровня фрактальности представляет собой совокупность 5 исходных колец. При его построении базовое кольцо помещается в центре, и к нему добавляются четыре кольца, смещенные вправо, влево, вверх и вниз относительно центра на величину радиуса кольца. Полученная фигура обводится еще одним кольцом, радиус которого в два раза больше радиуса исходного кольца. Всего получается 6 колец.

Элемент второго уровня фрактальности состоит из 27 колец. Он строится по той же схеме, но вместо исходного кольца берется элемент первого уровня фрактальности. Полная картина узора, состоящая из 112 колец, строится точно так же, но уже из элементов второго уровня фрактальности. Для 8 направлений число колец в рисунке равно 376.

Фурье-преобразование кольца

Расчет ДК можно выполнить, используя быстрое преобразование Фурье. Но в этом случае построить тонкую структуру дифракционного спектра практически не представляется возможным в силу необходимости задания очень мелкого разбиения элементов исходного рисунка. Поэтому для расчета ДК всего узора мы в качестве базового элемента использовали Фурье-спектр кольца и теорему о переносе.

Выражение для Фурье-образа кольца (1) можно получить как разность Фурье-образов двух окружностей:

$$F(\rho, h) = a^2 \frac{J_1(a\rho)}{a\rho} - (a-h)^2 \frac{J_1((a-h)\rho)}{(a-h)\rho} \quad (1)$$

Здесь a – радиус кольца, h – толщина линии кольца. Для уменьшения времени счета более целесообразно воспользоваться приближенной формулой, полученной с использованием предельного перехода. Математически очень узкую кольцевую щель можно описать, используя понятие дельта-функции

$$f(r) = \delta(r - a_0). \quad (2)$$

Это радиально-симметричная функция, и ее Фурье-образ можно получить, осуществляя преобразование Фурье-Бесселя по переменной r :

$$\begin{aligned} F(\rho) &= 2\pi \int_0^{\infty} r f(r) J_0(2\pi r \rho) dr = 2\pi \int_0^{\infty} r \delta(r - a_0) J_0(2\pi r \rho) dr = \\ &= 2\pi a_0 J_0(2\pi a_0 \rho) = a J_0(a\rho), \end{aligned} \quad (3)$$

где J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка, a – параметр, характеризующий размер объекта (радиус кольца). Особенностью полученной зависимости является отсутствие какой-либо связи амплитуды и фазы Фурье-образа с толщиной линии. Численные расчеты показали, что отличие в положении минимумов функции зависит не от абсолютного значения толщины линии h , а от соотношения толщины линии и размера кольца.

Результат с использованием формулы, полученной на основе δ -функции, дает точное положение первого минимума в предельном случае при стремлении толщины

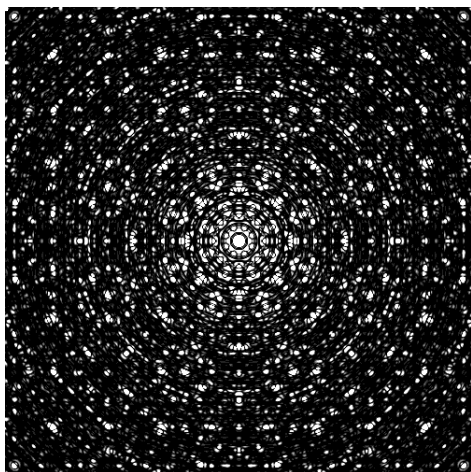
линии h к нулю. Если принять как допустимую величину ошибки 1%, то можно считать, что полученная формула применима при отношении диаметров окружностей, равном 0,98 и более (при относительной толщине (зазоре) кольца, равной 0,01).

Влияние амплитудного множителя вида α в приближенной формуле проверено путем построения зависимости амплитуды центрального максимума A_0 точной формулы от радиуса кольца при фиксированной толщине линии. При толщине линии h , равной 0,01, и при $\alpha \geq 1$ выполняется критерий применимости приближенной формулы по положению экстремумов.

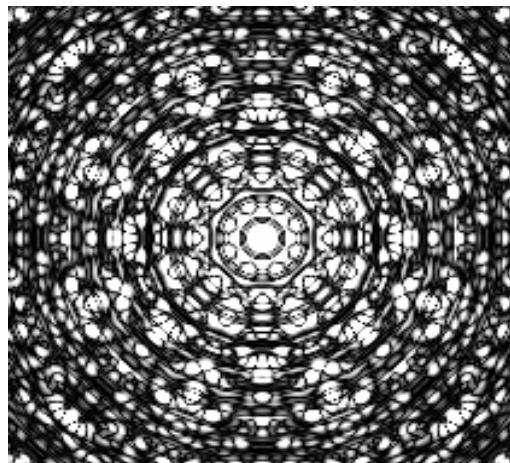
Расчет ДК фрактального элемента

Расчет ДК всего узора производился поэтапно, в соответствии со схемой построения узора. Безразмерный параметр a выбран равным 1. Соответственно, для колец большего радиуса, описанных вокруг элементов первого, второго и третьего уровня фрактальности, параметр a равен 2, 4 и 8.

Наблюдаемая ДК фрактального элемента (8 направлений, число уровней (клонов) 3) имеет ярко выраженную симметрию и наличие фрактальных элементов. Симметрия рисунка фрактального дифракционного элемента: ось симметрии – 8, плоскость симметрии – 8, центр симметрии ($L_8 8PC$); симметрия ДК: ось симметрии – 16, плоскость симметрии – 16, центр симметрии ($L_{16} 16PC$).



a



b

Рис .2. а) распределения интенсивности в дифракционной картине;
б) центр дифракционной картины

Благодаря большому числу регулярно расположенных однотипных элементов на рисунке фрактального дифракционного элемента происходит формирование регулярной спекловой картины, промодулированной дифракционными картинками колец. Выделенная область центра ДК (рис. 3) позволяет более наглядно увидеть разнообразие форм, образуемых при интерференции дифрагированных волн.

Экспериментальное исследование ДК фрактального дифракционного элемента

Дифракционный элемент помещался в сходящемся пучке лучей. Диаметр исследуемого топологического модуля 23 мм, расстояние от исследуемого модуля до экрана 3 м, размер экрана (размер наблюдаемой ДК) 210×300 мм. Фотографирование ДК производилось цифровым фотоаппаратом марки Кэнон EOS 20D с матрицей 8 мегапикселей. Наблюдаемые ДК имеют четко выраженную спекловую структуру. Спекловая

структура имеет регулярный фрактальный характер. ДК имеет восьмилучевую структуру, что соответствует рисунку топологического элемента и результатам расчета.

При рассмотрении изображения ДК при уменьшенном времени выдержки наблюдается фрактальная структура, составленная из отдельных спеклов.

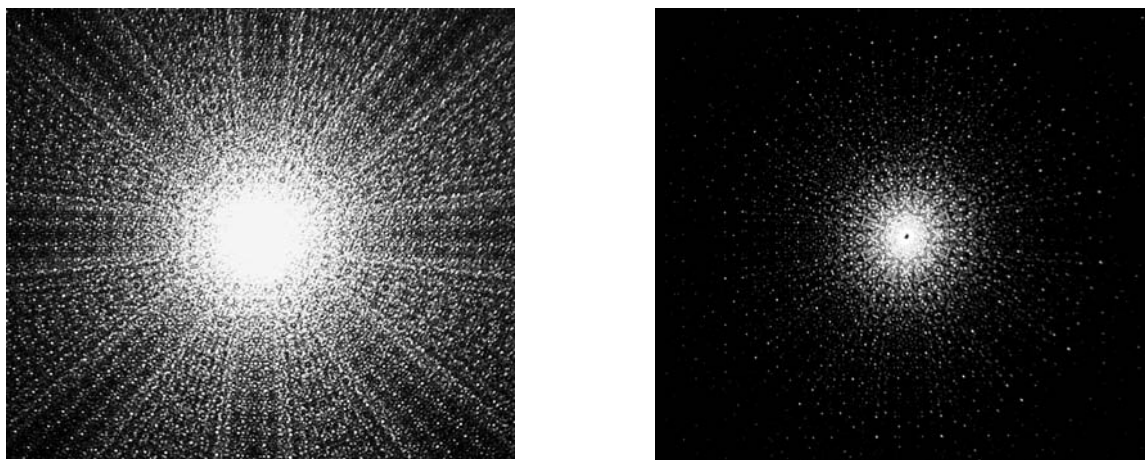


Рис. 3. Экспериментально наблюдаемые ДК

Анализ структуры дифракционного поля

Учитывая свойства линейности и интерференции Фурье-преобразования, очевидно, что вид и структура ДК определяются, в основном, двумя явлениями:

1. взаимодействием излучения, дифрагированного кольцами различного диаметра, что приводит к изменению периода и модуляции интенсивности колец в ДК;
2. смещением колец из центра узора и образованием периодических структур из колец, что приводит к появлению модуляции ДК в виде полос Юнга.

ДК каждого кольца в отдельности представляет собой совокупность концентрических колец, ширина и период которых в радиальном направлении зависит от размера кольца. Число колец на рисунке зависит от их диаметра. Интенсивность света, дифрагированного каждым кольцом, является функцией его диаметра. При дифракции на двух кольцах ДК представляет собой ДК от окружности, промодулированную полосами Юнга в соответствии со свойством интерференции Фурье-спектра. Полосы Юнга ориентированы перпендикулярно линии, соединяющей центры окружностей.

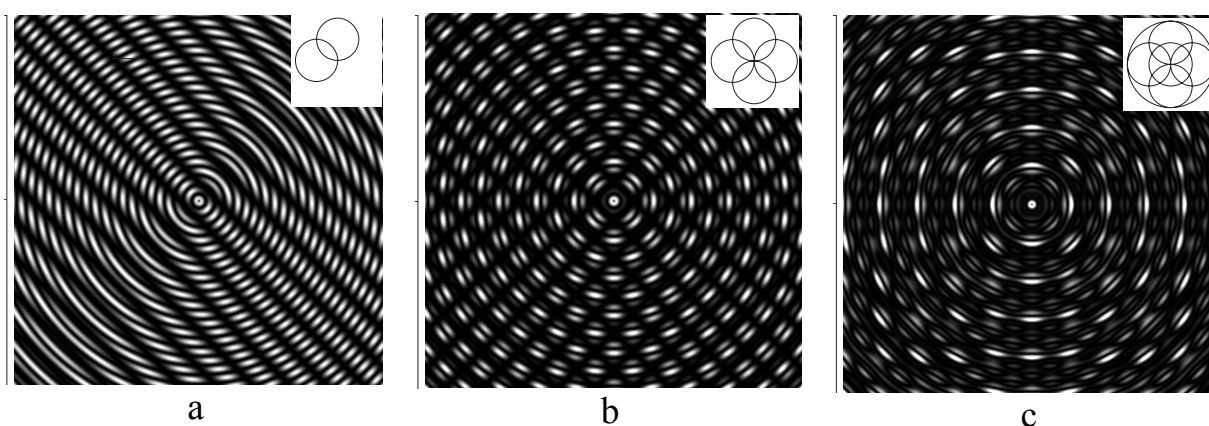


Рис. 4. а) ДК от двух колец; б) четырех колец; в) первого структурного элемента

Добавим еще два кольца. Такой элемент можно рассматривать как две пары колец. В структуре ДК возникает еще одна система полос Юнга, перпендикулярная уже

существующей, с тем же периодом. Две системы полос с равными периодами, наклоненные на углы $+45^0$ и -45^0 к вертикали, создают сетку, ячейками которой являются квадраты.

Добавление к получившейся структуре окружности радиуса α_0 , помещенной в центре узора, приводит к появлению еще одной сетки, образованной двумя системами полос Юнга, ориентированными горизонтально и вертикально. Эти системы полос возникают вследствие взаимодействия окружностей, смещенных от центра узора, с центральной окружностью. Последним этапом построения базового элемента узора с 4 направлениями является добавление окружности радиусом $2\alpha_0$ (рис. 4.с). Отличия структуры ДК от предыдущего варианта обусловлены появлением модуляции интенсивности колец в результате интерференции световых полей, дифрагированных кольцами разного диаметра.

При переходе ко второму и третьему уровням построения (клонам) все изменения структуры узора сводятся к тому, что увеличивается количество взаимодействующих элементов в каждом направлении. Новых направлений и новых пар взаимодействующих элементов не появляется. Периоды (минимальные расстояния между взаимодействующими одинаковыми элементами) не изменяются, поэтому и периоды модуляции ДК остаются прежними. Сохраняется и наличие двух наборов зон, структура поля в которых различна. Однако структура ДК становится более тонкой, и на третьем этапе построения ДК от всего узора представляет собой фактически набор изолированных точек.

Оценка фрактальной размерности узоров и их ДК

Наиболее распространенным подходом к определению фрактальной размерности узора является подсчет так называемой сеточной размерности [4]. С увеличением количества направлений в узоре рост фрактальной размерности замедляется. Если при переходе от 4 направлений к 8 дробная часть фрактальной размерности увеличивается приблизительно в два раза, то при переходе от 8 направлений к 16 дробная часть размерности увеличивается уже только приблизительно в 1,5 раза. При дальнейшем росте числа направлений фрактальная размерность, очевидно, должна стремиться к 2,0.

Фрактальная размерность узора, построенного по второй схеме, равна 1,89. ДК представляется в виде полутонового изображения. В трехмерном пространстве профилю интенсивности соответствует некая поверхность. Для объектов такого типа можно ожидать фрактальную размерность, находящуюся в интервале (2;3). Для определения фрактальной размерности поверхности использовался метод, предложенный в [5].

Количество направлений в узоре	Фрактальная размерность	
	узора	ДК
2	1,24	2,82
4	1,33	2,50
8	1,64	2,26
16	1,92	2,15

Таблица. Фрактальная размерность узоров и ДК от них

Периодические пространственные структуры аппликаторов и плоскости Тальбота

В структуре узоров, образованных путем радиальной трансляции базового элемента по четырем направлениям, можно выделить, по меньшей мере, три периодические структуры различного масштаба (рис. 4). Эти структуры состоят из окружностей, расположенных в узлах воображаемых решеток. Каждой из этих структур может соответствовать определенный набор плоскостей Тальбота, в которых происходит саморепродукция изображения структуры при освещении ее когерентной плоской волной.

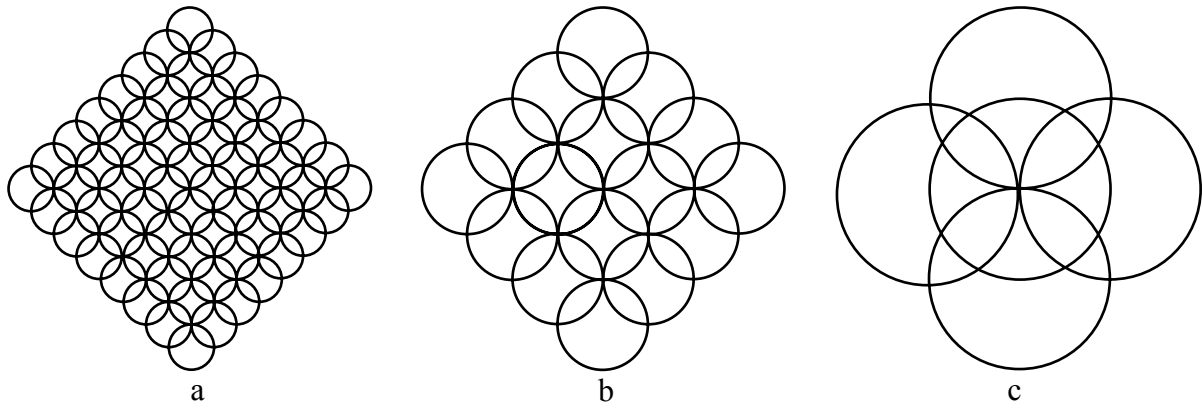


Рис. 5. Три периодические структуры различного масштаба для узора, образованного путем радиальной трансляции базового элемента по четырем направлениям

Структура первого уровня (рис. 4.а) состоит из 64 окружностей, выстроенных в 8 рядов по 8 окружностей. Радиус окружностей – минимальный в данном узоре – равняется α_0 . Период структуры $T_x = T_y = T = \alpha_0 \frac{\sqrt{2}}{2}$. Расстояние до n плоскости Тальбота $z_n^I = \frac{2T^2}{\lambda} n = \frac{\alpha_0^2}{\lambda} n$. Расстояние между плоскостями Тальбота $\Delta z^I = \frac{\alpha_0^2}{\lambda}$. Структура второго уровня (рис. 4.б) состоит из 16 окружностей, выстроенных в 4 ряда по 4 окружности. Радиус окружностей равняется $2\alpha_0$. Период структуры $T_x = T_y = T = \alpha_0 \sqrt{2}$. Расстояние до n плоскости Тальбота $z_n^{II} = \frac{2T^2}{\lambda} n = 4 \frac{\alpha_0^2}{\lambda} n$. Расстояние между плоскостями Тальбота $\Delta z^{II} = 4 \frac{\alpha_0^2}{\lambda}$. Структура третьего уровня (рис. 4.с) состоит из 4 окружностей, выстроенных в 2 ряда по 2 окружности. Радиус окружностей составляет $4\alpha_0$. Период структуры $T_x = T_y = T = \alpha_0 \cdot 2\sqrt{2}$. Расстояние до n плоскости Тальбота $z_n^{III} = \frac{2T^2}{\lambda} n = 16 \frac{\alpha_0^2}{\lambda} n$. Расстояние между плоскостями Тальбота $\Delta z^{III} = 16 \frac{\alpha_0^2}{\lambda}$.

Первая плоскость Тальбота для структуры второго уровня совпадает с четвертой плоскостью Тальбота для структуры первого уровня, а первая плоскость для структуры третьего уровня – с шестнадцатой плоскостью для первого уровня. Таким образом, в плоскостях Тальбота с номерами 16, 32, 48 и т. д. должны наблюдаться изображения всех трех периодических структур.

Детальный анализ рисунка показывает, что в структуре фрактального дифракционного элемента с уменьшением масштаба формируются две структуры: периодическая решетка и фрактальная структура, причем в узоре одновременно присутствуют структуры разных поколений.

Заключение

Формирование тонкой структуры дифракционных спектров обусловлено, в основном, двумя процессами – модуляцией интенсивности колец ДК из-за наличия элементов различного размера и модуляцией интенсивности в виде полос Юнга, обусловленной взаимным смещением окружностей. Установлено, что фрактальная размерность ДК тем меньше, чем больше фрактальная размерность узора, на котором происходит дифракция.

В структуре фрактальных узоров присутствуют периодические структуры различных периодов, что позволяет предположить существование нескольких наборов плоскостей Тальбота, в которых самовоспроизводятся различные компоненты узоров.

Литература

1. Физика лазерной биостимуляции / Ю. В. Аграонов [и др.]. М.: MeDia, 2000.
2. Коряковский А.С., Марченко В.М., Прохоров А.М. Дифракционная теория метода Тальбот-интерферометрии и диагностики широкоапертурных волновых фронтов. // Труды ИОФАН. 1987. Т. 7. С. 33–92.
3. Пат. 2200968 РФ. Оптический фрактально-матричный фильтр и применение оптического фрактально-матричного фильтра для защиты глаз / И. Н. Серов; опубл. 2003.03.20.
4. География и мониторинг биоразнообразия / Колл. авторов. М.: Изд. Научного и учебно-методического центра, 2002.
5. Xie H., Wang J. Direct fractal measurement of fracture surfaces // International Journal of Solids and Structures. 1999. V. 36. №20. P. 3073–3084.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСШИРЕННОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА

К.В. Кириллов, П.В. Лебедев

Разработана прикладная программа для восстановления нестационарных тепловых потоков с помощью различных типов тепломеров путем решения обратной задачи теплопроводности методом параметрической идентификации. Приведено описание программы и результаты экспериментальных исследований.

Определение нестационарных условий теплообмена является актуальной задачей при разработке, исследовании, мониторинге различных устройств и технологических процессов. В этих случаях возникает необходимость решения задач как прогноза температурного состояния (прямая задача), так и идентификации, диагностики, оптимального планирования экспериментов и проектирования (обратные задачи). Методология восстановления нестационарных тепловых потоков с помощью различных типов датчиков изложена в работах [1, 2]. Для ее реализации необходимо решение прямых (ПЗТ) и обратных задач теплопроводности (ОЗТ). Если методы решения ПЗТ достаточно хорошо разработаны, то при решении ОЗТ возникает ряд трудностей, связанных с некорректностью постановки задачи.

Основными требованиями, предъявляемыми к решению ОЗТ, являются его устойчивая сходимость, универсальность, помехозащищенность и вычислительная эффективность. Этим требованиям удовлетворяет выбранный нами метод параметрической идентификации [1, 2], сущность которого сводится к предварительной параметризации задачи и последующему нахождению оптимальной несмещенной оценки искомых параметров, дающей минимум нормы вектора невязки между измеренными в опыте температурами и прогнозами измерений температуры, рассчитанными по модели. Для получения этих оценок используется рекуррентная вычислительная процедура расширенного фильтра Калмана (ФК).

Обозначение	Название
$\hat{\vec{R}}$	Расширенный вектор оценок состояния
$\vec{U}$	Расширенный вектор управляющих воздействий
F_R	Расширенная матрица обратных связей
G_R	Расширенная матрица управления
$\vec{Y}$	Вектор выхода (вектор показаний тепломера)
$\vec{\epsilon}$	Вектор случайных погрешностей измерений
H_R	Расширенная матрица измерений
Φ	Расширенная переходная матрица
P	Ковариационная матрица ошибок оценок
N	Ковариационная матрица случайных погрешностей измерений
K	Весовая матрица
I	Единичная матрица

Таблица 1. Принятые обозначения

Ниже представлено описание программного комплекса, в котором принято обозначение матриц и векторов в соответствии с табл. 1.

Разработанный программный комплекс «Heat Identification» является 32-разрядным многопоточным приложением для операционной системы Windows. Программа была написана на языке C++ в интегрированной среде разработки Borland C++Builder 6.

Весь алгоритм программы состоит из трех основных частей:

- основная подпрограмма;
- подпрограмма решения ПЗТ;
- подпрограмма решения ОЗТ.

Основная подпрограмма выполняется в главном потоке, а выполнение подпрограмм решения ПЗТ и ОЗТ происходит в специально создаваемом вычислительном потоке, который можно контролировать из главной подпрограммы в любое время. Основная подпрограмма получает управление сразу же после запуска программного комплекса и выполняет следующие функции:

- управление работой всего проекта в целом;
- организация ввода данных пользователем;
- обработка введенных данных и передача их вычислительному потоку, внутри которого реализованы подпрограммы решения ПЗТ и ОЗТ;
- контроль над вычислительным потоком (принудительная остановка решения, установка приоритета потока);
- обработка и вывод на экран полученных результатов, сформированных в ходе работы вычислительного потока (подпрограмм решения ПЗТ и ОЗТ).

Алгоритм основной подпрограммы упрощенно может быть представлен в виде блок-схемы, приведенной на рис.1. На этой блок-схеме показано, что вычислительные процедуры выполнены в виде двух подпрограмм: первая решает прямую задачу теплопроводности по переданным исходным данным, формируя в результате матрицу показаний тепломера; вторая решает обратную задачу теплопроводности по переданным исходным данным, формируя в результате вектор значений восстанавливаемого граничного условия и вектор значений восстанавливаемых температур.

Блок-схемы алгоритма решения ОЗТ представлены на рис. 2 и 3.

Вначале весь временной интервал разбивается на равные промежутки - участки сплайн-аппроксимации (рис. 4). Затем 1-й участок разбивается на k шагов (на рис. 4 $k = 5$). Далее для 1-го шага (при $k = 1$) задаются исходные данные – это начальные значения расширенного вектора оценок состояния $\hat{K}_0$ и начальное значение ковариационной матрицы P_0 . По формуле (2) решается прямая задача теплопроводности (ПЗТ), в результате которой рассчитываются априорные значения расширенного вектора оценок состояния $\hat{K}_1(-)$. По формуле (3) определяются априорные значения ковариационной матрицы ошибок оценок $P_1(-)$. Затем по формуле (4) считается весовая матрица K_1 . Далее по формуле (5) происходит уточнение оценок расширенного вектора состояния $\hat{K}_1(+)$. Последним действием осуществляется корректировка ковариационной матрицы ошибок оценок $P_1(+)$ по формуле (6). Далее переходим к следующему шагу $k = 2$. Если же $k = 5$ (после 5-го шага), происходит переход к следующему участку сплайн-аппроксимации и т.д.

Далее приведены результаты модельных экспериментов. В качестве исследуемого датчика использовался тепломер типа «Вспомогательная стенка» со следующими геометрическими параметрами и физическими свойствами: высота датчика $h = 5 \cdot 10^{-3}$ м; количество элементов разбиения $n = 11$; температуропроводность материала $a = 3.8 \cdot 10^{-6}$ м²/с; теплопроводность материала $\lambda = 15$ Вт/(м·К); q_1 и q_2 – управляющие воздействия.

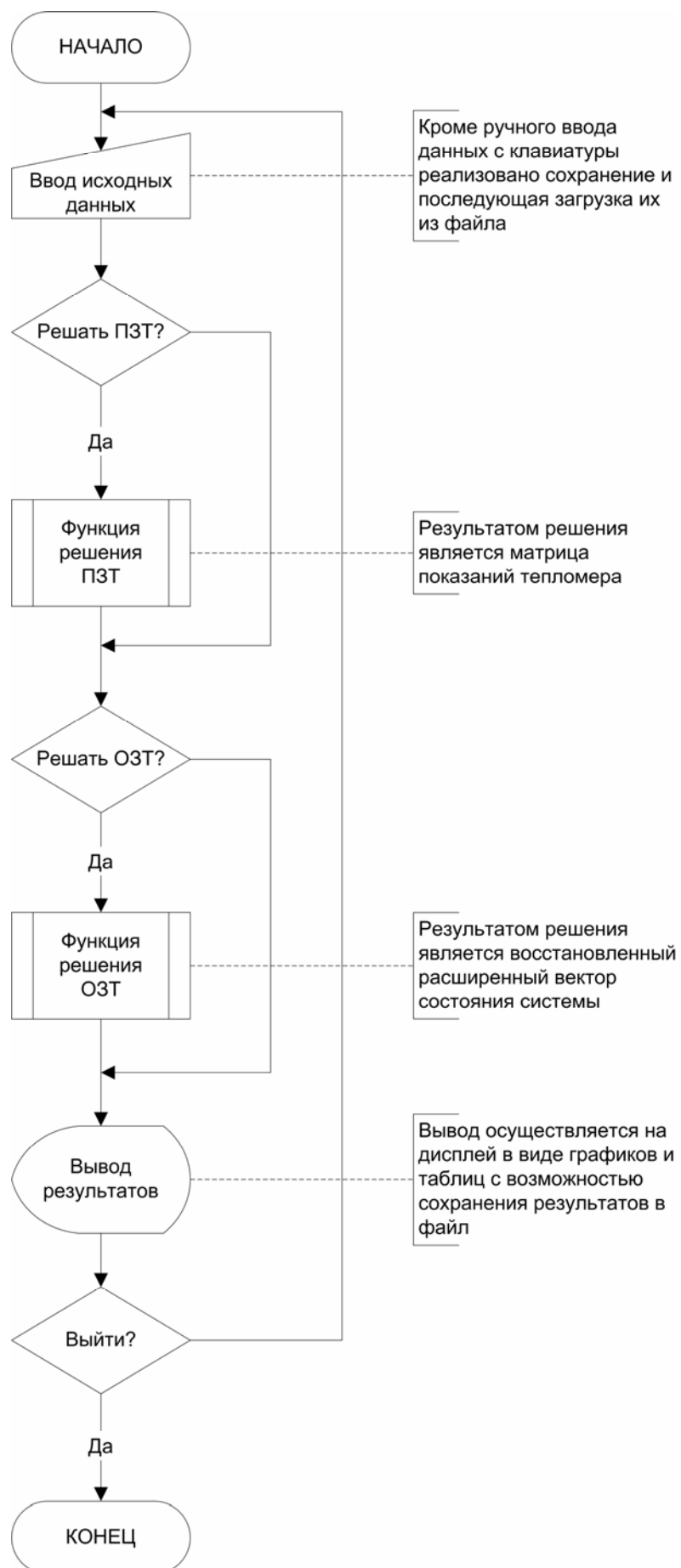


Рис 1. Блок-схема алгоритма основной подпрограммы

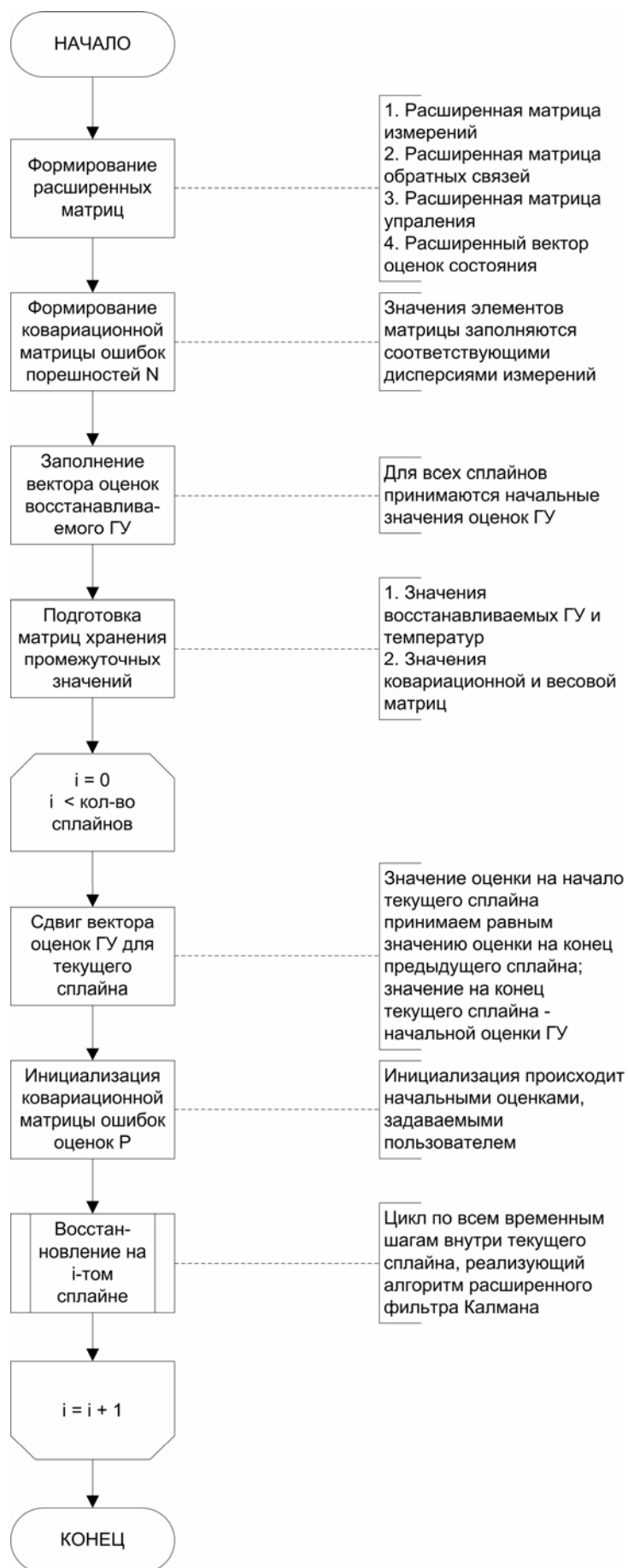


Рис 2. Блок-схема алгоритма подпрограммы решения ОЗТ

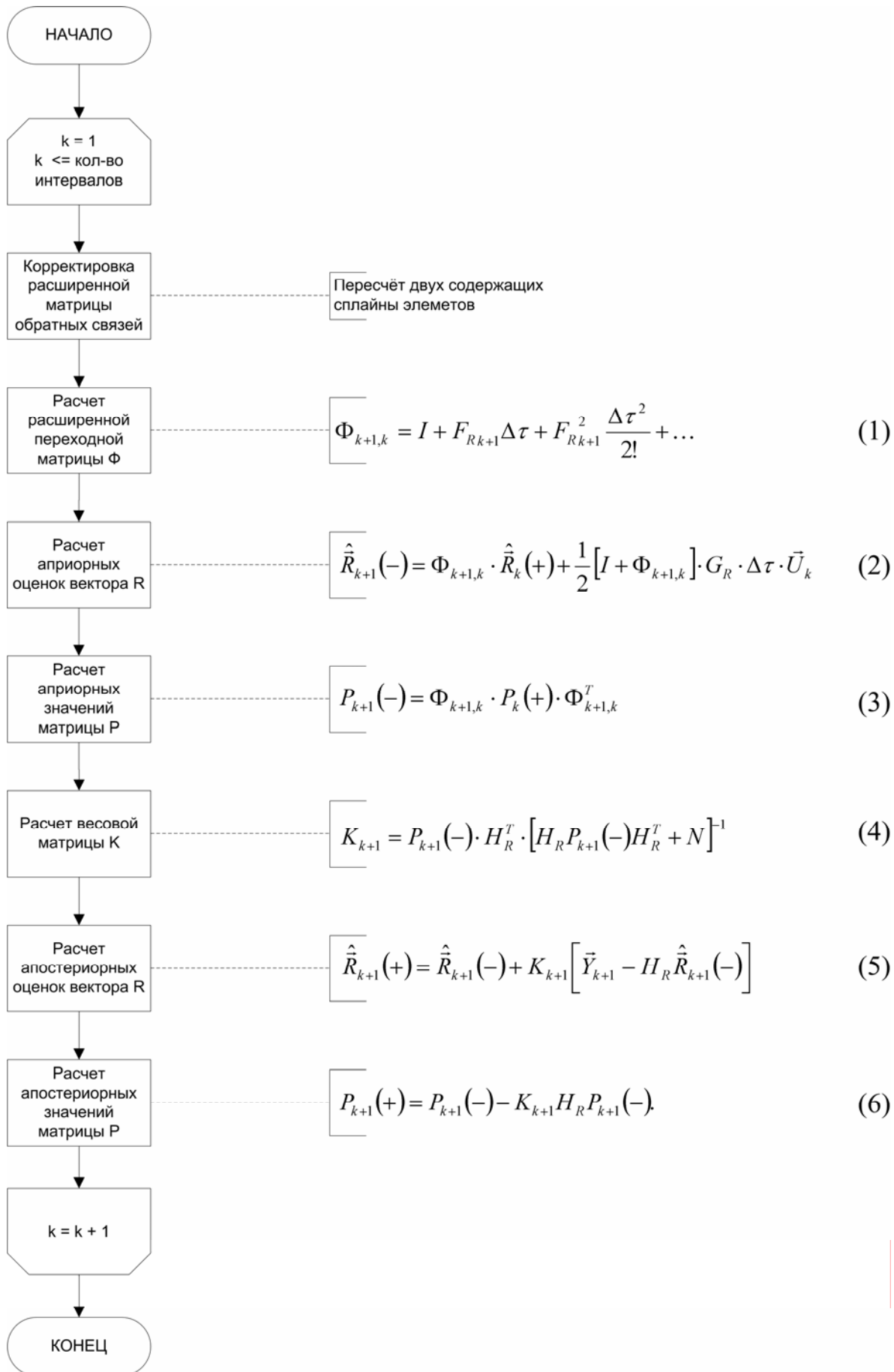


Рис 3. Блок-схема реализации ФК в цикле подпрограммы решения ОЗТ

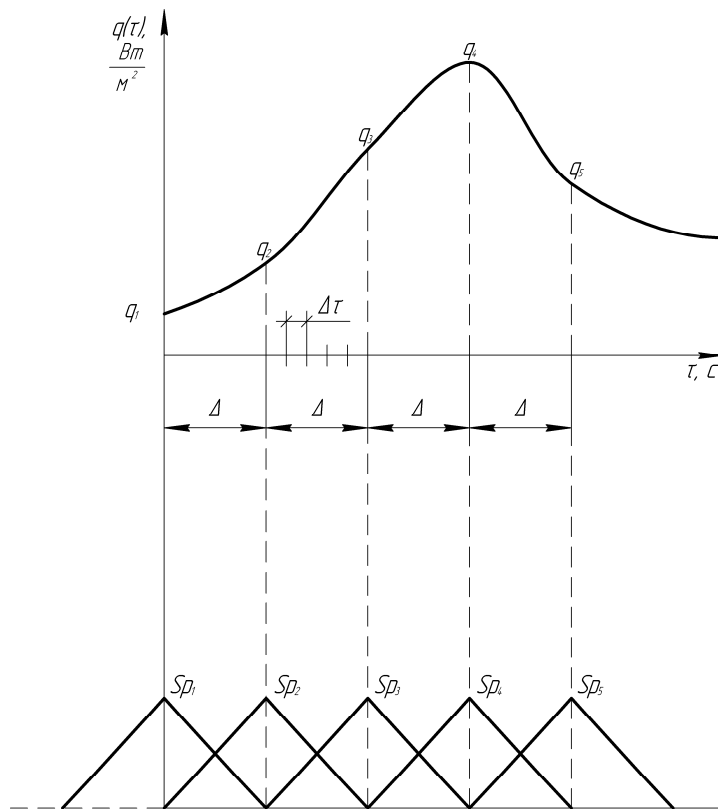


Рис 4. Сплайн-аппроксимация теплового потока

Сущность модельных испытаний заключается в том, что показания тепломера, используемые в ОЗТ, берутся не из предварительного эксперимента, а из ПЗТ, решаемой предварительно в этой же программе. Ниже рассмотрены два характерных случая, определяемые следующими условиями теплообмена:

$$q_1(\tau) = [50000 \sin(0,02k) + 50000] \frac{Bm}{M^2}; \quad q_2(\tau) = 0 \frac{Bm}{M^2}.$$

Восстановлению подлежит тепловой поток на верхней поверхности тепломера. В первом случае измеряется перепад температур с погрешностью измерительной аппаратуры, характеризующейся среднеквадратичным отклонением вектора случайной погрешности измерений $\sigma = 0,5K$. Во втором случае измеряются температуры верхней и нижней поверхностей, шумы измерений отсутствуют, но, в отличие от предыдущего случая, вектор начальных оценок распределения температур задается со значительными ошибками, а именно:

- $\vec{T}_0 = [-30 \ -30 \ -30 \ -30 \ -30 \ -30 \ -30 \ -30 \ -30 \ -30 \ -30]^T$;
- $\vec{f}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$.

На рис. 5–6 приведены графики восстановленных тепловых потоков и температурных полей датчика для обоих случаев.

Реализация метода параметрической идентификации с использованием расширенного фильтра Калмана в виде программы «Heat Identification» позволяет автоматизировать модельные исследования различных тепломеров, а также проводить обработку результатов реальных экспериментов. Основным достоинством программы является то, что существенные ошибки в задании начальных оценок распределения температур и оценки граничного условия уже после нескольких шагов процедуры идентификации не влияют на результаты решения ОЗТ. Также в ходе модельных испытаний было показано, что процедура восстановления может осуществляться в режиме реального времени.

При работе программы наблюдалась устойчивая сходимость процедуры идентификации и ее помехозащищенность.

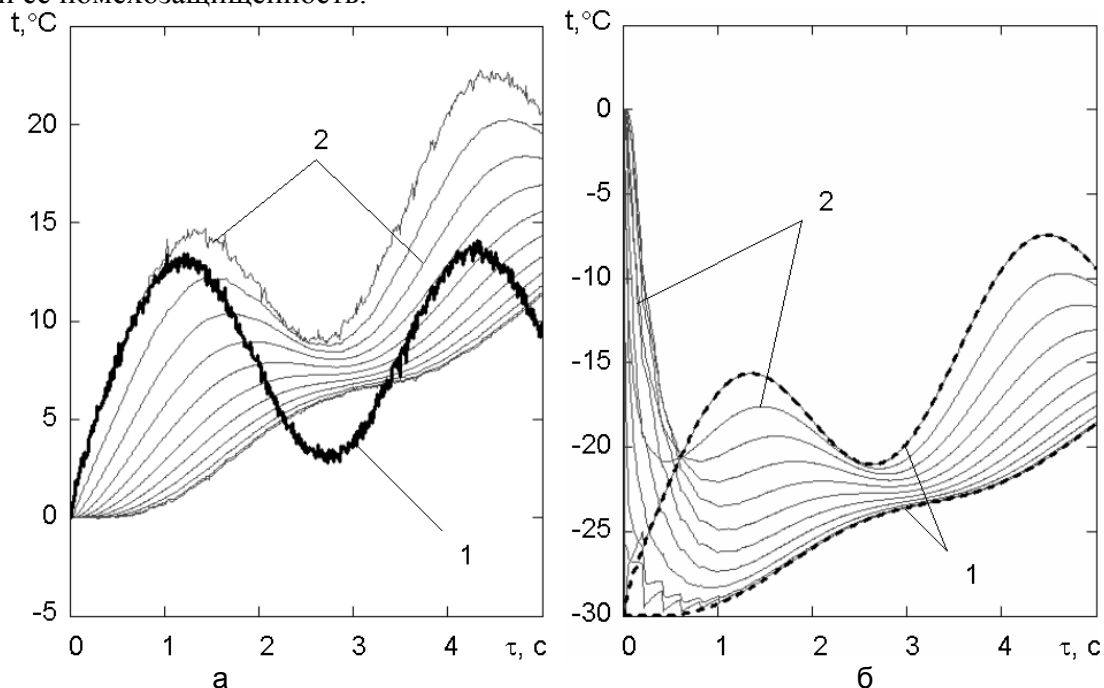


Рис 5. Измеренные (1) и восстановленные (2) температуры тепломера при наличии шумов (а) и при ошибках в задании начального распределения температур (б)

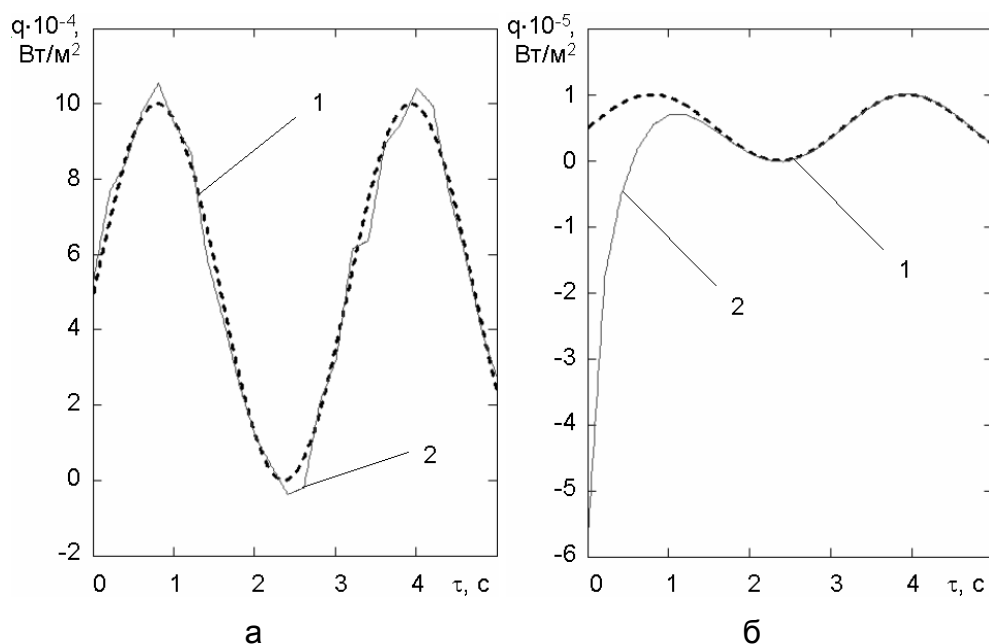


Рис 6. Эталонный (1) и восстановленный (2) тепловые потоки при наличии шумов (а) и при ошибках в задании начального распределения температур (б)

Литература

1. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотометрии (ч. 1). // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. №8. С. 50–54.
2. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотометрии (ч. 2). // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. №10. С. 67–71.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Н.В. Пилипенко, Н.В. Лазуренко

Важнейшим показателем энергоэффективности здания является сопротивление теплопередаче R_0 его ограждающих конструкций (ОК), значение которого, определенное при натурных измерениях, должно соответствовать проекту и строительным нормам для конкретного типа зданий. Традиционный способ определения R_0 путем осреднения показаний измерений имеет ряд существенных недостатков, поэтому предлагается метод восстановления теплового потока, проходящего через ОК, и уточнения теплотехнических свойств путем решения нестационарной граничной обратной задачи теплопроводности (ОЗТ) с использованием параметрической идентификации искомого параметра (теплового потока).

Введение

На этапе проектирования объектов строительства различного назначения преследуется цель снижения энергозатрат на отопление зданий при обеспечении комфортных условий пребывания в них людей путем использования архитектурных, строительных и инженерных решений, направленных на экономию энергетических ресурсов.

Однако на этапе строительства и после его завершения необходим контроль качества и соответствия теплозащиты здания и его отдельных элементов проекту и действующим строительным нормам. Для этого определяются теплотехнические и энергетические показатели эксплуатируемого здания, важнейшим из которых является сопротивление теплопередаче R_0 ограждающих конструкций (ОК) различного типа (наружных стен, окон, балконных и входных дверей и т.п.). Данная характеристика, определяемая в натурных условиях, позволяет количественно оценить теплотехнические свойства ограждений и их соответствие нормативным значениям, а также установить реальные потери тепла через наружные ОК здания.

Метод осреднения результатов измерений

Традиционным способом определения сопротивления теплопередаче ОК является метод, описанный в [1]. В соответствии с данным методом проводятся натурные измерения плотности теплового потока q и температур внутреннего t_v и наружного t_n воздуха на базовом участке конструкции. За базовый участок принимается термически однородная зона наружной ОК, имеющая линейные размеры не менее трех толщин ограждения. Для выявления термически однородных участков перед началом контактных измерений проводится обзорное тепловизионное обследование конструкций с соблюдением необходимых требований к оборудованию и климатическим условиям [2].

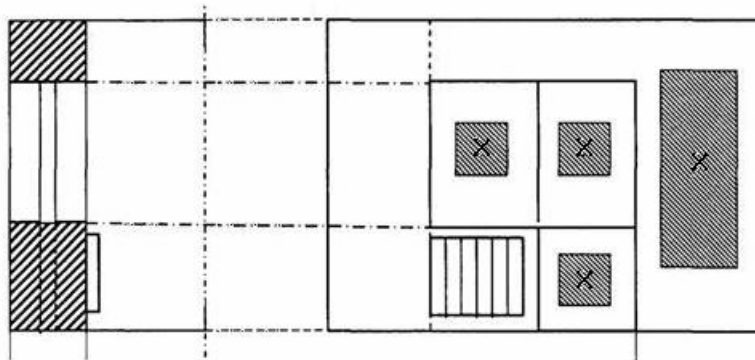


Рис. 1. Схема разбиения поверхности стены на базовые участки при измерении температуры внутреннего воздуха и плотности теплового потока

На рис. 1 приведена типичная конфигурация наружной стены, на которой заштрихованные области обычно являются однородными по теплофизическим свойствам участками, и, следовательно, на них могут быть размещены приборы для контактных измерений плотности теплового потока и температур. При этом измерительные приборы устанавливаются в центральных зонах заштрихованных участков стены, а с наружной стороны ОК термопреобразователи устанавливаются в точках, соответствующих местам измерений на внутренней поверхности. Продолжительность измерений, согласно [1], составляет 15 суток, однако методика, описанная в [4], позволяет проводить измерения в течение 1–2 суток, в зависимости от значения тепловой инерции ОК, причем регистрация значений q , t_v и t_n осуществляется с интервалом не более 20 мин.

При обработке результатов натурных испытаний строятся графики изменения во времени q , t_v и t_n , на которых выбираются временные промежутки с наиболее установившемся режимом – с отклонениями температуры наружного воздуха от среднего значения за этот период в пределах $\pm 2,5$ °С [4], и вычисляется среднее значение сопротивления теплопередаче базового участка ОК.

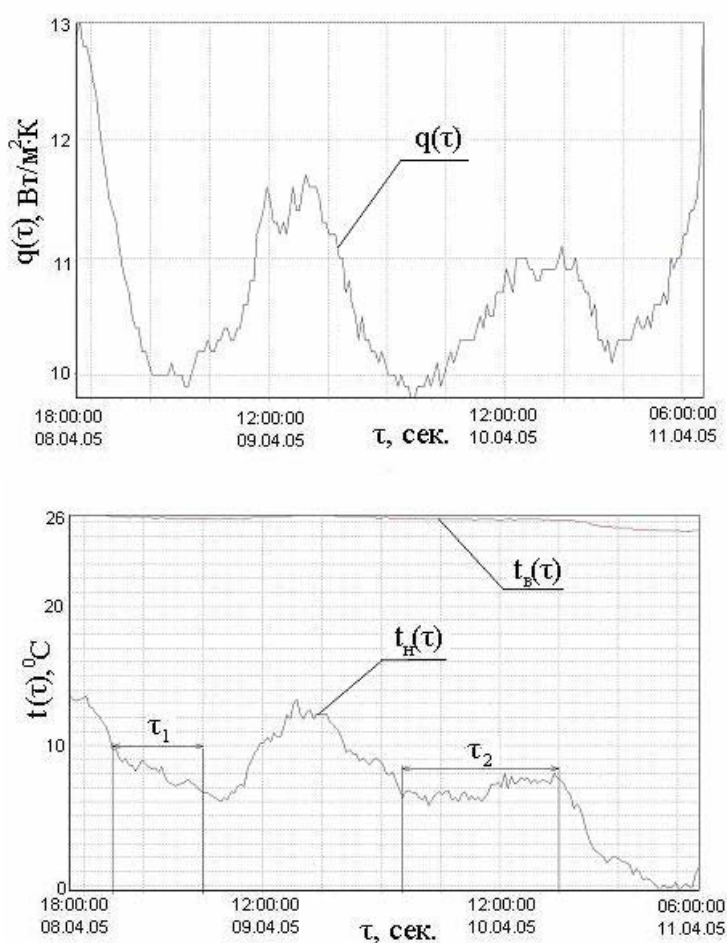


Рис. 2. Зависимости $q(\tau)$, $t_v(\tau)$ и $t_n(\tau)$ для типичной наружной стены жилого дома

На рис. 2 представлен результат измерения температур воздуха и теплового потока для наружной стены жилого здания, состоящей из железобетонных блоков толщиной 0,160 м (ДСК «БЛОК») с коэффициентом теплопроводности $\lambda=2,04$ Вт/(м·К), удельной теплоемкостью $c=840$ Дж/(кг·К), плотностью $\rho=2500$ кг/м³.

Для каждого выделенного периода с установившемся температурным режимом, например, τ_1 и τ_2 (см. рис. 2) рассчитываются средние значения q , t_v и t_n , а затем средняя за период измерений фактическая плотность теплового потока q_f определяется по фор-

муле [4]

$$q_{\phi} = \frac{q(t_{\text{вн}} - t_{\text{нн}})}{(t_{\text{нн}} - t_{\text{нн}}) - q(R_T - R_c)} = \frac{q(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) - q(R_T - R_c)}, \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

где q – средняя за расчетный период измеренная плотность теплового потока, Вт/м²; $t_{\text{в}}$ и $t_{\text{н}}$ – средние за расчетный период измерений значения температуры внутреннего и наружного воздуха, °C; $t_{\text{нн}}$ – температура поверхности преобразователя теплового потока, обращенной внутрь помещения, измеренная при испытаниях, °C; R_T – термическое сопротивление преобразователя теплового потока, определяемое по его паспортным данным, м²·К/Вт; R_c – термическое сопротивление слоя подложки, прикрепляющего преобразователь теплового потока к поверхности, определяемое расчетом, м²·К/Вт.

Сопротивление теплопередаче ОК вычисляется по общей формуле [1]:

$$R_o = R_{\text{в}} + R_{\text{к}} + R_{\text{н}} = \frac{t_{\text{в}} - \tau_{\text{в}}}{q_{\phi}} + \frac{\tau_{\text{в}} - \tau_{\text{н}}}{q_{\phi}} + \frac{\tau_{\text{н}} - t_{\text{н}}}{q_{\phi}}, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}, \quad (2)$$

где $R_{\text{в}}$ и $R_{\text{н}}$ – сопротивления теплопередаче внутренней и наружной поверхностей ОК, соответственно, м²·К/Вт; $R_{\text{к}}$ – термическое сопротивление однородной зоны ОК, м²·К/Вт; $\tau_{\text{в}}$ и $\tau_{\text{н}}$ – средние за расчетный период измерений значения температур соответственно внутренней и наружной поверхностей ОК, °C. При измерении температур внутреннего и наружного воздуха формула (2) упрощается:

$$R_o = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{q_{\phi}}, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}. \quad (3)$$

Абсолютная суммарная погрешность измерения ΔR_o определяется по формуле:

$$\Delta R_o = R_{o_{\text{изм}}} \left[\frac{(\Delta q)^2}{q_{\text{изм}}^2} + \frac{\Delta(\Delta t_{\text{изм}})^2}{\Delta t_{\text{изм}}^2} \right]^{1/2}, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}, \quad (4)$$

где Δq – абсолютная погрешность измерения плотности теплового потока, Вт/м²; $\Delta(\Delta t_{\text{изм}})$ – абсолютная погрешность измерения разности температур, °C.

Относительная погрешность определения R_o вычисляется по формуле

$$\delta R_o = \frac{\Delta R_o}{R_o} 100\%, \%. \quad (5)$$

Однако при более детальном анализе погрешности определения R_o следует учитывать объем выборки значений измеренных q , $t_{\text{в}}$ и $t_{\text{н}}$ и применять теорию погрешностей, описанную в [3], по которой сопротивление теплопередаче R_o является косвенно измеряемой величиной, и его абсолютная погрешность вычисляется по формуле:

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial t_{\text{в}}} \right)^2 (\Delta t_{\text{в}})^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial t_{\text{н}}} \right)^2 (\Delta t_{\text{н}})^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial q} \right)^2 (\Delta q)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{q} \right)^2 (\Delta t_{\text{в}})^2 + \left(-\frac{1}{q} \right)^2 (\Delta t_{\text{н}})^2 + \left(-\frac{(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{q^2} \right)^2 (\Delta q)^2}. \quad (6)$$

Здесь $\Delta t_{\text{в}}$, $\Delta t_{\text{н}}$ и Δq – границы доверительных интервалов температур внутреннего, наружного воздуха и теплового потока, соответственно, вычисленные с учетом инструментальной погрешности измерительных приборов по следующим формулам [3]:

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{в}} &= \sqrt{t_{\alpha}^2(m) \cdot \Delta S_{t_{\text{в}}}^2 + \left(\frac{k_{\alpha}}{3} \right)^2 \delta_{t_{\text{в}}}^2}, \\ \Delta t_{\text{н}} &= \sqrt{t_{\alpha}^2(m) \cdot \Delta S_{t_{\text{н}}}^2 + \left(\frac{k_{\alpha}}{3} \right)^2 \delta_{t_{\text{н}}}^2}, \\ \Delta q &= \sqrt{t_{\alpha}^2(m) \cdot \Delta S_q^2 + \left(\frac{k_{\alpha}}{3} \right)^2 \delta_q^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $t_{\alpha}(m)$ – коэффициент Стьюдента для заданной надежности α ($\alpha=0,95$) и числа измерений m ; $k_{\alpha} \equiv t_{\alpha}(\infty)$; δ – величина погрешности измерительного прибора; $\Delta S_{t_B}^-$, $\Delta S_{t_H}^-$, ΔS_q^- – среднеквадратические погрешности результата серии измерений соответственно температур внутреннего, наружного воздуха и теплового потока.

Погрешность данной методики не превышает 15%, что не противоречит требованиям современных строительных норм. Тем не менее, метод определения R_0 путем осреднения результатов измерений за выбранный промежуток времени [1, 4] имеет ряд существенных недостатков:

- длительный период проведения измерений;
- увеличение погрешности измерений за счет осреднения;
- трудоемкость расчета и анализа погрешности для конкретного частного случая натурных испытаний.

Метод определения сопротивления теплопередаче ОК путем параметрической идентификации тепловых потоков и теплофизических свойств

Параметрическая идентификация указанных величин подробно описана в работах [5–7] и сводится к решению прямой и обратной задач теплопроводности и использованию для получения оптимальных оценок параметров рекуррентного фильтра Калмана. При этом конструкция ограждения (например, наружной стены) разбивается по толщине на n блоков со средними температурами $t_1, t_2, \dots, t_n$, составляющими так называемый вектор состояния $\vec{T}(\tau)$. Для каждого из блоков записывается уравнение теплового баланса с учетом различных теплофизических свойств материалов слоев ОК и без учета контактного термического сопротивления между слоями.

Полная математическая модель стены представляется двумя уравнениям:

- моделью теплопереноса

$$\frac{d\vec{T}(\tau)}{d\tau} = F \cdot \vec{T}(\tau) + G \cdot \vec{U}(\tau); \quad (8)$$

- моделью измерений

$$\vec{Y}_k = H \cdot \vec{T}_k + \vec{\varepsilon}. \quad (9)$$

Здесь F – матрица обратных связей; G и $\vec{U}$ – матрица и вектор управления; $\vec{Y}_k$ и $\vec{\varepsilon}$ – векторы измерений и погрешностей; H – матрица измерений.

Метод позволяет определять распределение температур по толщине стены и восстанавливать потоки, входящие и выходящие из стены, в любой момент времени при различных граничных условиях – изменениях температуры и коэффициентов теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стены. При этом возможно одновременно и уточнение коэффициента эффективной теплопроводности ОК $\lambda_{эф}$.

Нами проведены экспериментальные исследования с целью определения вышеуказанных параметров ОК зданий различного назначения. В качестве примера рассмотрим неоднородную стенку со следующими характеристиками (рис. 3): $\delta_1=0,51$ м, $\lambda_1=0,52$ Вт/(м·К), $\delta_2=0,075$ м, $\lambda_2=0,081$ Вт/(м·К), $\delta_3=0,12$ м, $\lambda_3=0,056$ Вт/(м·К), у которой измеряется температура внутренней поверхности $t_6(\tau)$ и задаются температура среды $t_n(\tau)$ со стороны наружной поверхности и коэффициент теплоотдачи α_n .

В результате решения задачи методом параметрической идентификации определяются: тепловые потоки $q_1(\tau)$ и $q_2(\tau)$; распределение температуры по всей толщине δ_{Σ} , в том числе и на наружной поверхности; уточняется $\lambda_{эф}$ и рассчитывается сопротивление теплопередаче ОК по формуле

$$R_0 = \frac{t_{\text{в}}(\tau) - \tau_{\text{в}}(\tau)}{q_1(\tau)} + \frac{\delta_{\Sigma}}{\lambda'_{\text{эф}}} + \frac{\tau_{\text{н}}(\tau) - t_{\text{н}}(\tau)}{q_2(\tau)}, \quad (10)$$

где $t_{\text{в}}(\tau)$ и $t_{\text{н}}(\tau)$ – температуры внутреннего и наружного воздуха, соответственно, °C; $\tau_{\text{в}}(\tau)$ и $\tau_{\text{н}}(\tau)$ – температуры внутренней и наружной поверхностей ОК, °C; $q_1(\tau)$ – тепловой поток, идущий от внутренней среды к внутренней поверхности стены, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; $q_2(\tau)$ – тепловой поток, идущий от внешней поверхности стены в наружную среду, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

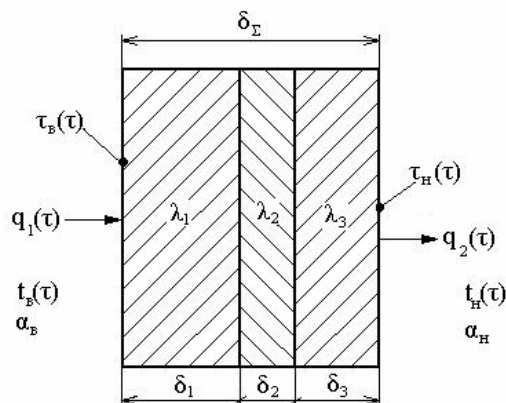


Рис. 3. Модель ОК

Результаты, полученные различными методами, практически не отличаются друг от друга и позволяют сделать вывод о предпочтении второго метода для определения сопротивления теплопередаче ОК.

В заключение отметим, что предлагаемый метод обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционным, а именно позволяет моделировать различные граничные условия на поверхностях ОК и определять распределение температуры $t(\tau)$ по толщине ОК и потоки $q(\tau)$ с различных сторон ОК, т.е. не требует длительного времени для проведения замеров и, в конечном счете, позволяет внедрять более эффективные энергосберегающие технологии.

Литература

1. ГОСТ 26254-84 Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, М., 1985.
2. ГОСТ 26629-85 Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций, М., 1985.
3. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений, М.: Наука, 1970.
4. Могутов В.А. Обобщение опыта натурных экспериментальных обследований объектов ЖКХ. / отчет НИИСФ РААСН. М., 2005.
5. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплометрии (ч. 1). // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т.46. №8.
6. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплометрии (ч. 2). // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т.46. №10.
7. Пилипенко Н.В., Лазуренко Н.В., Лебедев П.В. Параметрическая идентификация нестационарных потоков с помощью тепломеров типа "вспомогательная стенка". // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т.48. №9.
8. ТСН 23-340-2003 Санкт-Петербург «Энергетическая эффективность жилых и общественных зданий. Нормативы по энергопотреблению и теплозащите». Санкт-Петербург, 2003.

УТОЧНЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Н.В. Пилипенко, В.П. Афанасьев

Приводятся методика и основные результаты комплексных исследований особенностей и возможностей применяемых методов параметрической идентификации динамических систем для уточнения теплопроводности $\lambda(\tau)$ различных материалов в режиме монотонного нагрева.

В работах [1, 2] изложена методика параметрической идентификации в нестационарной теплотерии, сущность которой применительно к одномерному образцу кратко сводится к следующему. Образец по толщине разбиваем на n блоков с температурами $t_1, t_2, \dots, t_n$. Средние температуры блоков t_n , отнесенные к их центрам, составляют вектор состояния $\dot{T}(\tau)$. При известных граничных условиях записываем систему обыкновенных дифференциальных уравнений переноса, которая в векторно-матричной форме имеет вид [1]:

$$\frac{d\dot{T}(\tau)}{d\tau} = F \cdot \dot{T}(\tau) + G \cdot \dot{U}(\tau), \quad (1)$$

где $\dot{T}(\tau)$ и $\dot{U}(\tau)$ – векторы состояния и управления; F и G – матрицы обратных связей и управления.

К дифференциально-разностной модели (ДРМ) необходимо добавить модель измерений [1]:

$$\dot{Y}_k = H \cdot \dot{T}_k + \dot{\epsilon}_k, \quad (2)$$

где $\dot{Y}_k$ и $\dot{\epsilon}_k$ – векторы измерений и погрешностей, H – матрица измерений. Затем задаем ориентировочные значения параметров, характеризующих граничные условия и теплопроводность образца. Они могут быть выбраны произвольно, но в пределах тех же порядков, что и предполагаемые истинные. Далее решаем прямую задачу и определяем распределение температуры по толщине образца.

Для уточнения коэффициента теплопроводности образца решаем обратную задачу теплопроводности (ОЗТ) при известной температуре поверхности образца либо перепаду температуры по толщине. При решении ОЗТ вначале проводится параметризация задачи, при этом формируется вектор искомых параметров $\dot{Q}$, который включает, кроме теплового потока, и теплопроводность. Тогда параметрическая идентификация заключается в нахождении оптимальной оценки $\dot{Q}_k$, дающей минимум дискретной квадратичной функции невязок

$$\Phi(\dot{Q}) = \sum_{k=1}^N \left[\dot{Y}_k - \dot{Y}_k(\dot{Q}_k) \right]^T \cdot R^{-1} \left[\dot{Y}_k - \dot{Y}_k(\dot{Q}_k) \right], \quad (3)$$

где $\dot{Y}_k(\dot{Q}_k)$ – модельные (расчетные) значения векторы измерений; R – ковариационная матрица векторы погрешностей измерений $\dot{\epsilon}_k$; k – дискретное время, соответствующее определению $\Delta\tau_k = k \cdot \Delta\tau$.

Для получения оптимальных оценок $\dot{Q}_k$ используется рекуррентный алгоритм фильтра Калмана (ФК) по искомым параметрам[2].

$$K_{k+1} = P_k \dot{H}_k^T \left[\dot{H}_k P_k \dot{H}_k^T + R \right]^{-1}, \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{k+1} = \dot{Q}_k + K_{k+1} \left[\dot{Y}_{k+1} - \dot{Y}_{k+1}(\dot{Q}_k) \right], \quad (5)$$

$$P_{k+1} = P_k - K_{k+1} \dot{H}_k^T P_k, \quad (6)$$

где K_{k+1} - весовая матрица; $\hat{Y}_{k+1}(\hat{Q}_k)$ – модельные значения векторы измерений в $(k+1)$ -й момент времени, рассчитываемые по модели с использованием предыдущей оценки векторы параметров $\hat{Q}_k$; P_k и P_{k+1} – ковариационные матрицы ошибок оценок вектора параметров для моментов времени k и $(k+1)$, соответственно; $\hat{H}_k$ – матрица чувствительности, рассчитанная с использованием $\hat{Q}_k$;

Оценки точности результатов параметрической идентификации, а также оптимальный выбор регистрирующей аппаратуры, дискретности измерений во времени, уровня и режимов нагрева и других факторов выполняются путем количественных исследований совместных [по всем коэффициентам сплайн-аппроксимации $\lambda(\tau)$] доверительных интервалов (СДИ). СДИ определяются значениями элементов ковариационной матрицы ошибок полученных оценок $\hat{Q}_k$ искомого параметров $\hat{Q}_k$ ($k=1,2,3,\dots$ – количество моментов времени измерения температуры по толщине образца или ее перепадов). Элементы ковариационной матрицы являются комбинациями функций чувствительности измеряемых температур в образце ко всем перечисленным выше факторам эксперимента.

Для получения конкретных результатов была разработана оригинальная программа, с использованием которой проведены как модельные, так и натурные экспериментальные исследования. При этом выбирался образец толщиной $\delta = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ со следующими теплофизическими свойствами: теплоемкость $c = 485 \text{ Дж / кг} \cdot \text{с}$; теплопроводность $\lambda = 15 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$; плотность $\rho = 8000 \text{ кг / м}^3$. Начальное распределение температуры по толщине образца принималось известным. В модельных исследованиях поток меняется линейно: $q = 10^5 + 10^5 \tau$. В натурных исследованиях измерялась температура на рабочей поверхности или перепад температуры по толщине образца.

При решении обратной задачи принимались начальные оценки потока и теплопроводности в два раза меньше действительных, а именно: $q_0 = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$; $q_b = 1 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$; $\lambda = 7,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$.

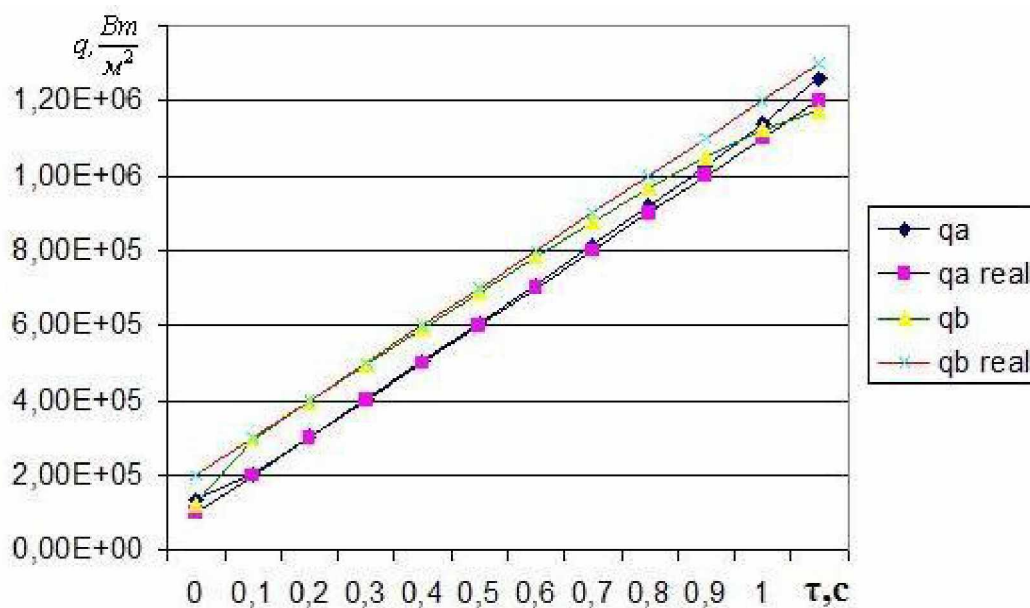


Рис. 1. Результаты восстановления теплового потока

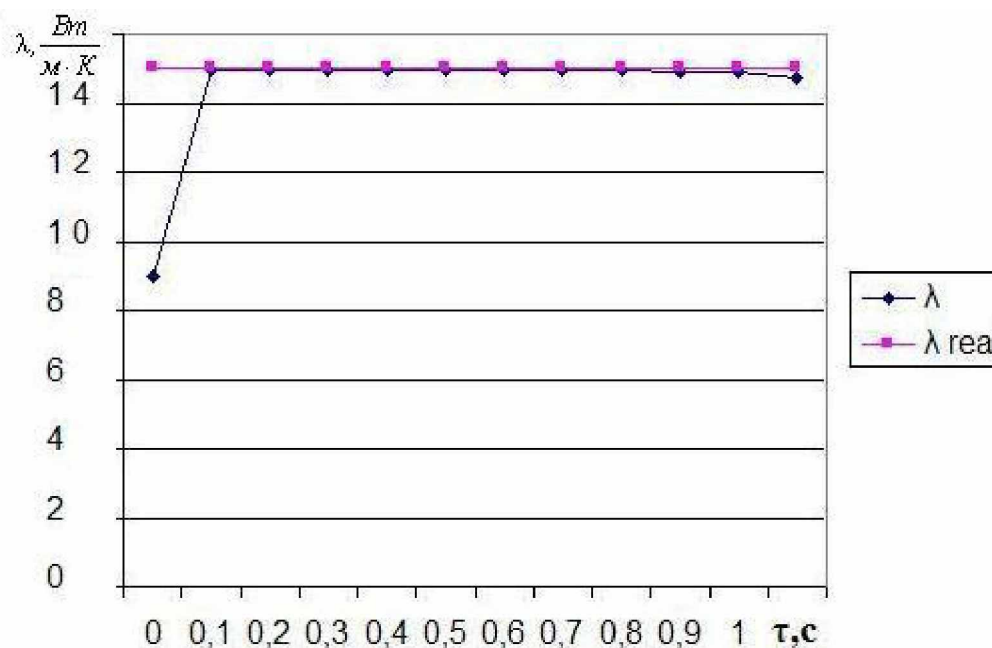


Рис. 2. Результаты восстановления коэффициента теплопроводности

Как видно из рис.1, 2, в результате решения задачи уже на первом участке сплайн-аппроксимации ($\kappa=10$, $\Delta\tau=0,01\text{с}$) коэффициент теплопроводности хорошо уточняется и равняется $15 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, а потоки при уровне шумов в измерениях температуры $\sigma = 0.9\text{К}$ практически не отличаются от истинных.

Таким образом, метод параметрической идентификации позволяет не только восстанавливать тепловой поток на рабочей поверхности образца по измеренной температуре поверхности и известных граничных условиях на тыльной стороне, но и уточнять теплофизические свойства, в частности, коэффициент теплопроводности.

Литература

1. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплометрии (ч. 1). // Изв. вузов. Приборостроение 2003. Т.46. №8. С.50–54.
2. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплометрии (ч. 2). // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т.46. №10. С.67–71.

МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА И КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ГАРДОНА

Н.В. Пилипенко, М.Г. Зеленская

Предложена унифицированная методология нестационарной теплотометрии на базе одномерных инерционных преобразователей теплового потока, в основе которой лежит параметрическая идентификация искомого параметра. Предлагаемый метод применен для восстановления нестационарного теплового потока и коэффициентов теплоотдачи с помощью датчика Гардона. Получены динамические характеристики датчика.

Для осуществления измерения переменных во времени или постоянных, но в динамическом режиме, основных тепловых параметров различных систем, таких как температура, тепловой поток от источников энергии различной природы, коэффициенты теплоотдачи, в нестационарной теплотометрии могут быть применены одномерные инерционные преобразователи теплового потока, когда они работают в неустановившихся тепловых режимах. В этом случае решается нестационарная граничная обратная задача теплопроводности (ОЗТ): определяются (восстанавливаются) различные теплофизические характеристики процесса нестационарного теплообмена между датчиком и средой по непосредственно измеренным температурам или их градиентам в отдельных точках датчика.

В настоящей работе представлена унифицированная методология решения нестационарных ОЗТ, адаптированная к особенностям известных датчиков, в частности, датчика Гардона. В качестве метода решения ОЗТ использован метод параметрической идентификации оцениваемых параметров, в нашем случае – теплового потока $q(\tau)$ и коэффициентов теплоотдачи. Метод параметрической идентификации подробно рассмотрен в работах [1, 2], и далее будут изложены основные этапы восстановления нестационарного теплового потока и коэффициентов теплоотдачи с помощью датчика Гардона.

Датчик Гардона является перспективным средством исследования нестационарных процессов в силу своей малой инерционности. Как известно, в отличие от большинства датчиков с поперечным градиентом температуры, в датчике Гардона измеряется продольный градиент. Принцип действия датчика Гардона основан на методе тонкого диска. Метод базируется на решении осесимметричной задачи теплопроводности о распространении температуры по радиусу диска с известными температурами в его центре и на максимальном радиусе. Конструктивная схема датчика Гардона, реализующего метод, представлена на рис. 1.

Датчик Гардона представляет собой тонкий константовый диск 1 радиусом R_0 и толщиной h , теплоизолированный с тыльной стороны и закрепленный по периметру на массивном медном корпусе 2. Измерению с помощью медь-константовой дифференциальной термопары подлежит перепад температуры Δt между центром и периферией. По величине Δt в любой момент времени судят об интенсивности воздействующего на датчик теплового потока q_0 .

Для описания процесса теплообмена датчика с окружающей средой требуется составить его тепловую и математическую модель, состоящую из моделей теплопереноса и измерений:

$$\frac{d\vec{T}(\tau)}{d\tau} = F\vec{T}(\tau) + G\vec{U}(\tau), \quad (1)$$

$$\vec{Y}_k = H\vec{T}_k + \vec{\varepsilon}, \quad (2)$$

где $\vec{T}(\tau)$ и $\vec{U}$ – векторы состояния и управления; F и G – матрицы обратных связей и управления; $\vec{Y}_k$ и $\vec{\varepsilon}$ – векторы измерений и погрешностей в измерениях, соответственно; H – матрица измерений. Достоинством такого представления является возможность использования разработанных в общей теории динамических систем методов пространства состояния для анализа динамических характеристик датчика.

Параметрическая идентификация искомых величин сводится к решению прямой и обратной задач теплопроводности.

Для решения задачи проводим построение ДРМ для датчика Гардона (см. рис. 2). Для этого диск разбиваем по радиусу на n блоков (в данном случае 11) с линейным размером l и температурами $t_1, t_2, \dots, t_{11}$. Первый блок имеет радиус $l/2$.

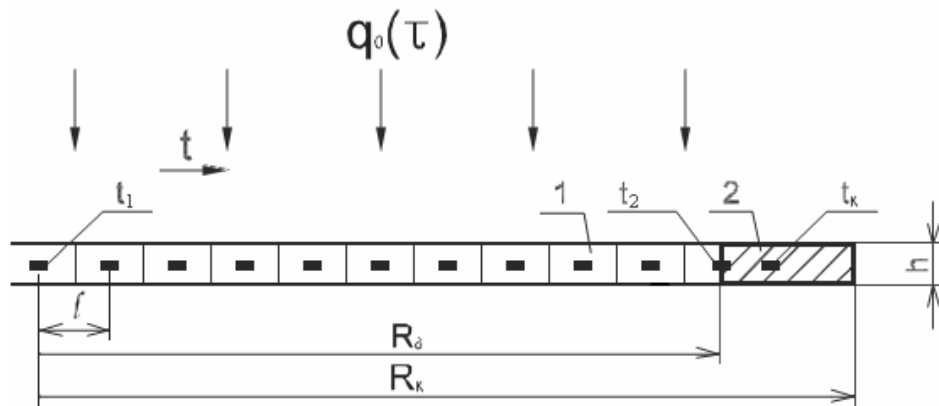


Рис. 2. Топология датчика Гардона для составления дифференциально-разностной модели: 1 – диск; 2 – корпус

Для каждого блока составляем уравнение теплового баланса. В уравнениях теплового баланса каждого из блоков учитываем действующий на датчик тепловой поток $q_0(\tau)$, а также кондуктивный теплообмен с соседними блоками или корпусом датчика (для граничного 11-го блока).

$$\left\{ \begin{array}{l} q_0(\tau)S_1 = C_1 \frac{dt_1}{d\tau} + \frac{\lambda S_{1-2}}{l}(t_1 - t_2) \\ \frac{\lambda S_{1-2}}{l}(t_1 - t_2) + q_0(\tau)S_2 = C_2 \frac{dt_2}{d\tau} + \frac{\lambda S_{2-3}}{l}(t_2 - t_3) \\ \frac{\lambda S_{2-3}}{l}(t_2 - t_3) + q_0(\tau)S_3 = C_3 \frac{dt_3}{d\tau} + \frac{\lambda S_{3-4}}{l}(t_3 - t_4) \\ \frac{\lambda S_{3-4}}{l}(t_3 - t_4) + q_0(\tau)S_4 = C_4 \frac{dt_4}{d\tau} + \frac{\lambda S_{4-5}}{l}(t_4 - t_5) \\ \frac{\lambda S_{4-5}}{l}(t_4 - t_5) + q_0(\tau)S_5 = C_5 \frac{dt_5}{d\tau} + \frac{\lambda S_{5-6}}{l}(t_5 - t_6) \\ \frac{\lambda S_{5-6}}{l}(t_5 - t_6) + q_0(\tau)S_6 = C_6 \frac{dt_6}{d\tau} + \frac{\lambda S_{6-7}}{l}(t_6 - t_7) \\ \frac{\lambda S_{6-7}}{l}(t_6 - t_7) + q_0(\tau)S_7 = C_7 \frac{dt_7}{d\tau} + \frac{\lambda S_{7-8}}{l}(t_7 - t_8) \\ \frac{\lambda S_{7-8}}{l}(t_7 - t_8) + q_0(\tau)S_8 = C_8 \frac{dt_8}{d\tau} + \frac{\lambda S_{7-8}}{l}(t_7 - t_8) \\ \frac{\lambda S_{8-9}}{l}(t_8 - t_9) + q_0(\tau)S_9 = C_9 \frac{dt_9}{d\tau} + \frac{\lambda S_{8-9}}{l}(t_8 - t_9) \\ \frac{\lambda S_{9-10}}{l}(t_9 - t_{10}) + q_0(\tau)S_{10} = C_{10} \frac{dt_{10}}{d\tau} + \frac{\lambda S_{9-10}}{l}(t_9 - t_{10}) , \\ \frac{\lambda S_{10-11}}{l}(t_{10} - t_{11}) + q_0(\tau)S_{11} = C_{11} \frac{dt_{11}}{d\tau} + \frac{t_{11} - t_{\kappa}}{R_{\text{конт}}} S_{11-\kappa} \end{array} \right. \quad (3)$$

где S_{i-n} – площадь на границе между соседними блоками; $S_{11-\kappa}$ – площадь между граничным 11-ым блоком и корпусом датчика; S_i – площадь сечения блока; λ – теплопроводность материала диска; $C_i = \bar{c}\rho h S_i$ – полная теплоемкость блока; $\bar{c}$ – удельная теплоемкость материала диска; ρ – плотность материала диска.

Выражаем из системы уравнений (3) $\frac{dt}{d\tau}$:

$$\begin{cases}
\frac{dt_1}{d\tau} = -\frac{4a}{l^2}t_1 + \frac{4a}{l^2}t_2 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_2}{d\tau} = \frac{a}{2l^2}t_1 - \frac{2a}{l^2}t_2 + \frac{3a}{2l^2}t_3 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_3}{d\tau} = \frac{3a}{4l^2}t_2 - \frac{2a}{l^2}t_3 + \frac{5a}{4l^2}t_4 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_4}{d\tau} = \frac{5a}{6l^2}t_3 - \frac{2a}{l^2}t_4 + \frac{7a}{6l^2}t_5 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_5}{d\tau} = \frac{7a}{8l^2}t_4 - \frac{2a}{l^2}t_5 + \frac{9a}{8l^2}t_6 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_6}{d\tau} = \frac{9a}{10l^2}t_5 - \frac{2a}{l^2}t_6 + \frac{11a}{10l^2}t_7 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_7}{d\tau} = \frac{11a}{12l^2}t_6 - \frac{2a}{l^2}t_7 + \frac{13a}{12l^2}t_8 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_8}{d\tau} = \frac{13a}{14l^2}t_7 - \frac{2a}{l^2}t_8 + \frac{15a}{14l^2}t_9 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_9}{d\tau} = \frac{15a}{16l^2}t_8 - \frac{2a}{l^2}t_9 + \frac{17a}{16l^2}t_{10} + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_{10}}{d\tau} = \frac{17a}{18l^2}t_9 - \frac{2a}{l^2}t_{10} + \frac{19a}{18l^2}t_{11} + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_{11}}{d\tau} = \frac{76a}{39l^2}t_{10} - \frac{76R_{\text{конт}}}{39R_{\text{конт}}}\frac{\lambda + 80l}{\bar{c}\rho l^2}t_{11} + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) + \frac{80t_k}{39R_{\text{конт}}\bar{c}\rho l}
\end{cases},$$

(4)

где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ — температуропроводность материала диска.

Таким образом, получаем математическую модель теплопереноса, которая в векторно-матричной форме для датчика Гардона имеет вид:

$$\frac{d\vec{T}}{d\tau} = \begin{pmatrix} -\frac{4a}{l^2} & \frac{4a}{l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{a}{2l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{3a}{2l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3a}{4l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{5a}{4l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{5a}{6l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{7a}{6l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{7a}{8l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{9a}{8l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{9a}{10l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{11a}{10l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{11a}{12l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{13a}{12l^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{13a}{14l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{15a}{14l^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{15a}{16l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{17a}{16l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{17a}{18l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{19a}{18l^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{76a}{39l^2} & -\frac{76R_{\text{конт}}\lambda + 80l}{39R_{\text{конт}}\bar{\rho}l^2} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \\ t_{10} \\ t_{11} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{\bar{\rho}h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{\rho}h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{\rho}h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{\rho}h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{\rho}h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{\rho}h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{\rho}h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{\rho}h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{\rho}h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{\rho}h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{\rho}h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{\rho}h} & 80 \\ \frac{1}{\bar{\rho}h} & 39R_{\text{конт}}\bar{\rho}l \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} q(\tau) \\ t_{\kappa}(\tau) \end{pmatrix},$$

(5)

ДРМ в виде (5) описывает процесс нестационарного теплопереноса в датчике Гардона. При этом измерению подлежит перепад температуры между центром диска и одиннадцатым блоком Δt_{1-11} . Эта информация, а также сведения о характере и величинах погрешностей в измерениях отражаются в математической модели измерений датчика (2).

В нашем случае матрица измерений H имеет вид:

$$H = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1). \quad (6)$$

Реализация решения прямой и обратной задач теплопроводности осуществляется в компьютерной программе Heat Stream.

Результатом решения прямой задачи теплопроводности является матрица показаний тепломера $T(\tau)$, которая при решении ОЗТ входит в исходные данные программы. Решение ОЗТ осуществляется методом параметрической идентификации. Конечным результатом выполнения программы при решении ОЗТ являются вектор значений восстанавливаемого параметра.

Для анализа процессов нестационарного теплопереноса в датчике Гардона были получены и исследованы все его динамические характеристики, а именно: переходная, импульсно-переходная, частотные характеристики, которые позволяют судить о реакции датчика на различные входные воздействия. Получение динамических характеристик датчика основывается на использовании разработанных в общей теории динамических систем методов пространства состояний применительно к линейным системам, для чего необходимо представить полную математическую модель датчика в области пространства состояний. Непосредственно численно-алгоритмический путь получения динамических характеристик программно реализован в программном комплексе MatLab. На рис. 3—5 приведены некоторые результаты исследования состояния датчика Гардона под воздействием нестационарных тепловых потоков $q(\tau)$.

Переходная характеристика датчика Гардона представлена на рис. 3.

Рис. 3. Переходная характеристика датчика Гардона.

Переходная характеристика описывает реакцию датчика на ступенчатое воздействие. Из рис. 3 видно, что датчик Гардона быстро реагирует на поток постоянной величины. Переходный процесс длится приблизительно 3,5 с. Таким образом, по переходной характеристике мы можем судить о длительности переходного процесса датчика при резком изменении воздействия.

Импульсно-переходная характеристика датчика Гардона представлена на рис. 4.

Рис. 4. Импульсно-переходная характеристика датчика Гардона.

Импульсно-переходная характеристика описывает реакцию датчика на импульсное воздействие. Из рис. 4 видно, что после него для возвращения в исходное состояние датчику Гардона требуется менее 3,5 с.

С помощью импульсной переходной матрицы можно получить выражения для нахождения амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик датчиков. Логарифмические амплитудно- и фазочастотная характеристики датчика Гардона представлены на рис. 5.

Рис. 5. Логарифмические амплитудно- и фазочастотная характеристики датчика Гардона.

Логарифмические амплитудно- и фазочастотные характеристики показывают реакцию датчика на сигнал гармонической частоты. Из рис. 5 видно, что при частоте 1 рад/с (0.16 Гц) выходной сигнал сдвигается по фазе относительно входного на 4^0 . Входной сигнал ослабляется на 63,5 дБ (в 63,5 раза). При частоте выше 1 рад/с наблюдается резкое возрастание ослабления сигнала.

В ходе исследований был успешно использован метод параметрической идентификации искомого параметра. По результатам исследований был сделан вывод о применимости предложенной унифицированной методологии нестационарной теплотометрии для восстановления

нестационарного теплового потока и коэффициентов теплоотдачи с помощью датчика Гардона, а также для получения его динамических характеристик еще на стадии проектирования.

Литература

1. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплометрии (ч. 1). Изв. вузов. Приборостроение. — 2003. — №8. — С. 50—54.
2. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплометрии (ч. 2). Изв. вузов. Приборостроение. — 2003. — №10. — С. 67—71.

МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА И КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОТДАЧИ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ГАРДОНА

Н.В. Пилипенко, М.Г. Зеленская

Предложена унифицированная методология нестационарной теплометрии на базе одномерных инерционных преобразователей теплового потока, в основе которой лежит параметрическая идентификация искомого параметра. Предлагаемый метод применен для восстановления нестационарного теплового потока и коэффициентов теплоотдачи с помощью датчика Гардона. Получены динамические характеристики датчика.

Для измерения переменных во времени или постоянных, но в динамическом режиме, основных тепловых параметров различных систем, таких как температура, тепловой поток от источников энергии различной природы, коэффициенты теплоотдачи, в нестационарной теплометрии могут быть применены одномерные инерционные преобразователи теплового потока, когда они работают в неустановившихся тепловых режимах. В этом случае решается нестационарная граничная обратная задача теплопроводности (ОЗТ): определяются (восстанавливаются) различные теплофизические характеристики процесса нестационарного теплообмена между датчиком и средой по непосредственно измеренным температурам или их градиентам в отдельных точках датчика.

В настоящей работе представлена унифицированная методология решения нестационарных ОЗТ, адаптированная к особенностям известных датчиков, в частности, датчика Гардона. В качестве метода решения ОЗТ использован метод параметрической идентификации оцениваемых параметров, в нашем случае – теплового потока $q(\tau)$ и коэффициентов теплоотдачи. Метод параметрической идентификации подробно рассмотрен в работах [1, 2], и далее будут изложены основные этапы восстановления нестационарного теплового потока и коэффициентов теплоотдачи с помощью датчика Гардона.

Датчик Гардона является перспективным средством исследования нестационарных процессов в силу своей малой инерционности. Как известно, в отличие от большинства датчиков с поперечным градиентом температуры, в датчике Гардона измеряется продольный градиент. Принцип действия датчика Гардона основан на методе тонкого диска. Метод базируется на решении осесимметричной задачи теплопроводности о распространении температуры по радиусу диска с известными температурами в его центре и на максимальном радиусе. Конструктивная схема датчика Гардона, реализующего метод, представлена на рис. 1.

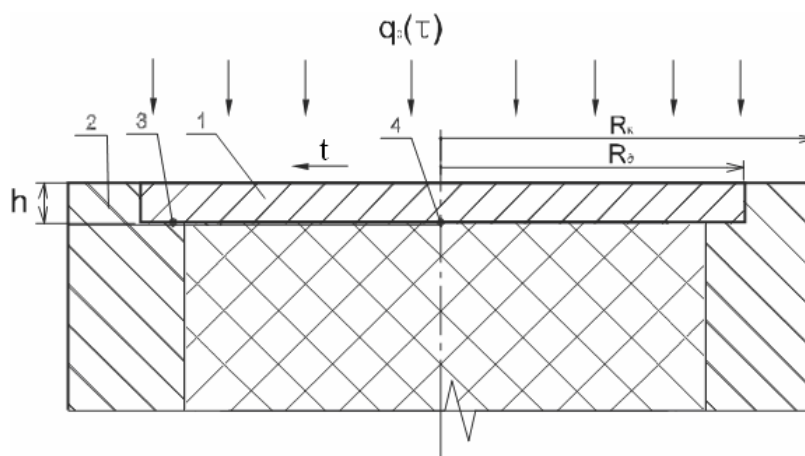


Рис. 1. Схема датчика Гардона: 1 – диск; 2 – корпус; 3, 4 — термоэлектроды

Датчик Гардона представляет собой тонкий константановый диск 1 радиусом R_0 и толщиной h , теплоизолированный с тыльной стороны и закрепленный по периметру на массивном медном корпусе 2. Измерению с помощью медь-константановой дифференциальной термопары подлежит перепад температуры Δt между центром и периферией. По величине Δt в любой момент времени судят об интенсивности воздействующего на датчик теплового потока q_0 .

Для описания процесса теплообмена датчика с окружающей средой требуется составить его тепловую и математическую модель, состоящую из моделей теплопереноса и измерений:

$$\frac{d\vec{T}(\tau)}{d\tau} = F\vec{T}(\tau) + G\vec{U}(\tau), \quad (1)$$

$$\vec{Y}_k = H\vec{T}_k + \vec{\varepsilon}, \quad (2)$$

где $\vec{T}(\tau)$ и $\vec{U}$ – векторы состояния и управления; F и G – матрицы обратных связей и управления; $\vec{Y}_k$ и $\vec{\varepsilon}$ – векторы измерений и погрешностей в измерениях, соответственно; H – матрица измерений. Достоинством такого представления является возможность использования разработанных в общей теории динамических систем методов пространства состояния для анализа динамических характеристик датчика.

Параметрическая идентификация искомых величин сводится к решению прямой и обратной задач теплопроводности.

Для решения задачи проводим построение ДРМ для датчика Гардона (см. рис. 2). Для этого диск разбиваем по радиусу на n блоков (в данном случае 11) с линейным размером l и температурами $t_1, t_2, \dots, t_{11}$. Первый блок имеет радиус $l/2$.

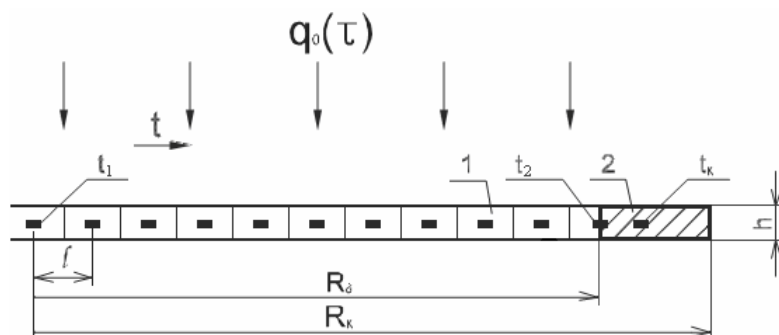


Рис. 2. Топология датчика Гардона для составления дифференциально-разностной модели: 1 – диск; 2 – корпус

Для каждого блока составляем уравнение теплового баланса, в которых S_{i-n} – площадь на границе между соседними блоками; S_{11-k} – площадь между граничным 11-ым блоком и корпусом датчика; S_i – площадь сечения блока; λ – теплопроводность материала диска; $C_i = \bar{c} \rho h S_i$ – полная теплоемкость блока; $\bar{c}$ – удельная теплоемкость материала диска; ρ – плотность материала диска. В уравнениях теплового баланса каждого из блоков учитываем воздействующий на датчик тепловой поток $q_0(\tau)$, а также кондуктивный теплообмен с соседними блоками или корпусом датчика (для граничного 11-го блока).

$$\left\{ \begin{aligned}
q_0(\tau)S_1 &= C_1 \frac{dt_1}{d\tau} + \frac{\lambda S_{1-2}}{l}(t_1 - t_2) \\
\frac{\lambda S_{1-2}}{l}(t_1 - t_2) + q_0(\tau)S_2 &= C_2 \frac{dt_2}{d\tau} + \frac{\lambda S_{2-3}}{l}(t_2 - t_3) \\
\frac{\lambda S_{2-3}}{l}(t_2 - t_3) + q_0(\tau)S_3 &= C_3 \frac{dt_3}{d\tau} + \frac{\lambda S_{3-4}}{l}(t_3 - t_4) \\
\frac{\lambda S_{3-4}}{l}(t_3 - t_4) + q_0(\tau)S_4 &= C_4 \frac{dt_4}{d\tau} + \frac{\lambda S_{4-5}}{l}(t_4 - t_5) \\
\frac{\lambda S_{4-5}}{l}(t_4 - t_5) + q_0(\tau)S_5 &= C_5 \frac{dt_5}{d\tau} + \frac{\lambda S_{5-6}}{l}(t_5 - t_6) \\
\frac{\lambda S_{5-6}}{l}(t_5 - t_6) + q_0(\tau)S_6 &= C_6 \frac{dt_6}{d\tau} + \frac{\lambda S_{6-7}}{l}(t_6 - t_7) \\
\frac{\lambda S_{6-7}}{l}(t_6 - t_7) + q_0(\tau)S_7 &= C_7 \frac{dt_7}{d\tau} + \frac{\lambda S_{7-8}}{l}(t_7 - t_8) \\
\frac{\lambda S_{7-8}}{l}(t_7 - t_8) + q_0(\tau)S_8 &= C_8 \frac{dt_8}{d\tau} + \frac{\lambda S_{7-8}}{l}(t_7 - t_8) \\
\frac{\lambda S_{8-9}}{l}(t_8 - t_9) + q_0(\tau)S_9 &= C_9 \frac{dt_9}{d\tau} + \frac{\lambda S_{8-9}}{l}(t_8 - t_9) \\
\frac{\lambda S_{9-10}}{l}(t_9 - t_{10}) + q_0(\tau)S_{10} &= C_{10} \frac{dt_{10}}{d\tau} + \frac{\lambda S_{9-10}}{l}(t_9 - t_{10}), \\
\frac{\lambda S_{10-11}}{l}(t_{10} - t_{11}) + q_0(\tau)S_{11} &= C_{11} \frac{dt_{11}}{d\tau} + \frac{t_{11} - t_{\kappa}}{R_{\text{конт}}} S_{11-\kappa}
\end{aligned} \right. \quad (3)$$

Выражаем из системы уравнений (3) $\frac{dt}{d\tau}$:

$$\left\{ \begin{aligned}
\frac{dt_1}{d\tau} &= -\frac{4a}{l^2}t_1 + \frac{4a}{l^2}t_2 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_2}{d\tau} &= \frac{a}{2l^2}t_1 - \frac{2a}{l^2}t_2 + \frac{3a}{2l^2}t_3 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_3}{d\tau} &= \frac{3a}{4l^2}t_2 - \frac{2a}{l^2}t_3 + \frac{5a}{4l^2}t_4 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_4}{d\tau} &= \frac{5a}{6l^2}t_3 - \frac{2a}{l^2}t_4 + \frac{7a}{6l^2}t_5 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_5}{d\tau} &= \frac{7a}{8l^2}t_4 - \frac{2a}{l^2}t_5 + \frac{9a}{8l^2}t_6 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_6}{d\tau} &= \frac{9a}{10l^2}t_5 - \frac{2a}{l^2}t_6 + \frac{11a}{10l^2}t_7 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_7}{d\tau} &= \frac{11a}{12l^2}t_6 - \frac{2a}{l^2}t_7 + \frac{13a}{12l^2}t_8 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_8}{d\tau} &= \frac{13a}{14l^2}t_7 - \frac{2a}{l^2}t_8 + \frac{15a}{14l^2}t_9 + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_9}{d\tau} &= \frac{15a}{16l^2}t_8 - \frac{2a}{l^2}t_9 + \frac{17a}{16l^2}t_{10} + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_{10}}{d\tau} &= \frac{17a}{18l^2}t_9 - \frac{2a}{l^2}t_{10} + \frac{19a}{18l^2}t_{11} + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) \\
\frac{dt_{11}}{d\tau} &= \frac{76a}{39l^2}t_{10} - \frac{76R_{\text{конт}}}{39R_{\text{конт}}}\frac{\lambda + 80l}{\bar{c}\rho l^2}t_{11} + \frac{1}{\bar{c}\rho h}q_0(\tau) + \frac{80t_{\kappa}}{39R_{\text{конт}}\bar{c}\rho l}
\end{aligned} \right. , \quad (4)$$

где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – температуропроводность материала диска.

Таким образом, получаем математическую модель теплопереноса, которая в векторно-матричной форме для датчика Гардона имеет вид

$$\frac{d\vec{T}}{d\tau} = \begin{pmatrix} -\frac{4a}{l^2} & \frac{4a}{l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{a}{2l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{3a}{2l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3a}{4l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{5a}{4l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{5a}{6l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{7a}{6l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{7a}{8l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{9a}{8l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{9a}{10l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{11a}{10l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{11a}{12l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{13a}{12l^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{13a}{14l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{15a}{14l^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{15a}{16l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{17a}{16l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{17a}{18l^2} & -\frac{2a}{l^2} & \frac{19a}{18l^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{76a}{39l^2} & -\frac{76R_{\text{конт}}\lambda + 80l}{39R_{\text{конт}}\bar{c}\rho l^2} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \\ t_{10} \\ t_{11} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{\bar{c}\rho h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{c}\rho h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{c}\rho h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{c}\rho h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{c}\rho h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{c}\rho h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{c}\rho h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{c}\rho h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{c}\rho h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{c}\rho h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{c}\rho h} & 0 \\ \frac{1}{\bar{c}\rho h} & 80 \\ \frac{1}{\bar{c}\rho h} & 39R_{\text{конт}}\bar{c}\rho l \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} q(\tau) \\ t_{\kappa}(\tau) \end{pmatrix} \quad (5)$$

ДРМ в виде (5) описывает процесс нестационарного теплопереноса в датчике Гардона. При этом измерению подлежит перепад температуры между центром диска и одиннадцатым блоком Δt_{1-11} . Эта информация, а также сведения о характере и величинах погрешностей в измерениях отражаются в математической модели измерений датчика (2).

В нашем случае матрица измерений H имеет вид:

$$H = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1). \quad (6)$$

Реализация решения прямой и обратной задач теплопроводности осуществляется в компьютерной программе Heat Stream.

Результатом решения прямой задачи теплопроводности является матрица показаний тепломера $T(\tau)$, которая при решении ОЗТ входит в исходные данные программы. Решение ОЗТ осуществляется методом параметрической идентификации. Конечным результатом выполнения программы при решении ОЗТ являются вектор значений восстанавливаемого параметра.

Для анализа процессов нестационарного теплопереноса в датчике Гардона были получены и исследованы все его динамические характеристики, а именно: переходная, импульсно-переходная, частотные характеристики, которые позволяют судить о реакции датчика на различные входные воздействия. Получение динамических характеристик датчика основывается на использовании разработанных в общей теории динамических систем методов пространства состояний применительно к линейным системам, для чего необходимо представить полную математическую модель датчика в области пространства состояний. Непосредственно численно-алгоритмический путь получения динамических характеристик программно реализован в программном комплексе Mat-Lab. На рис. 3–5 приведены некоторые результаты исследования состояния датчика Гардона под воздействием нестационарных тепловых потоков $q(\tau)$.

Переходная характеристика датчика Гардона представлена на рис. 3. Переходная характеристика описывает реакцию датчика на ступенчатое воздействие. Из рис. 3 видно, что датчик Гардона быстро реагирует на поток постоянной величины. Переходный процесс длится приблизительно 3,5 с. Таким образом, по переходной характеристике мы можем судить о длительности переходного процесса датчика при резком изменении воздействия.

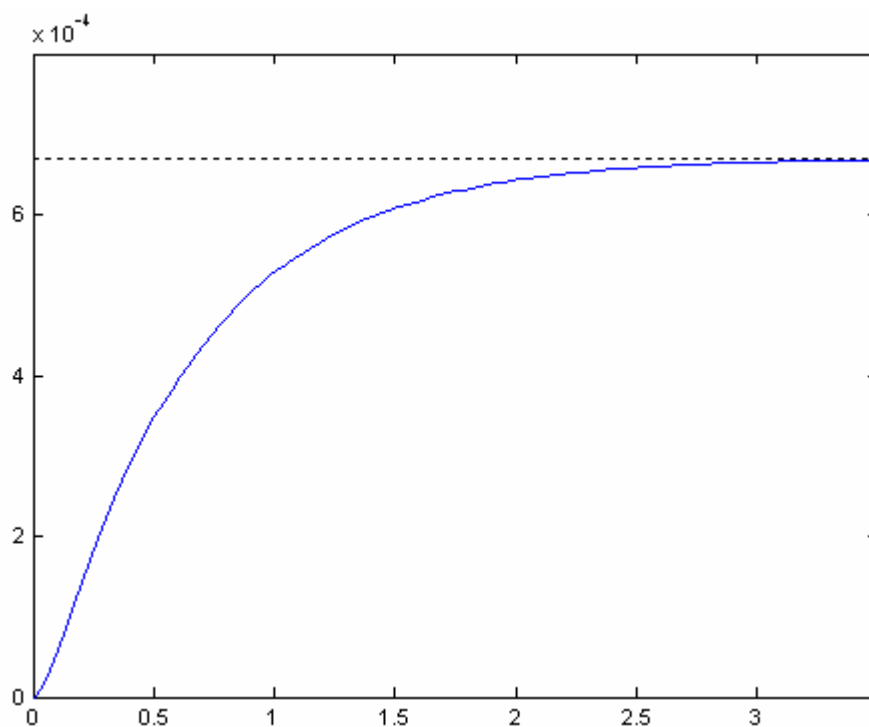


Рис. 3. Переходная характеристика датчика Гардона

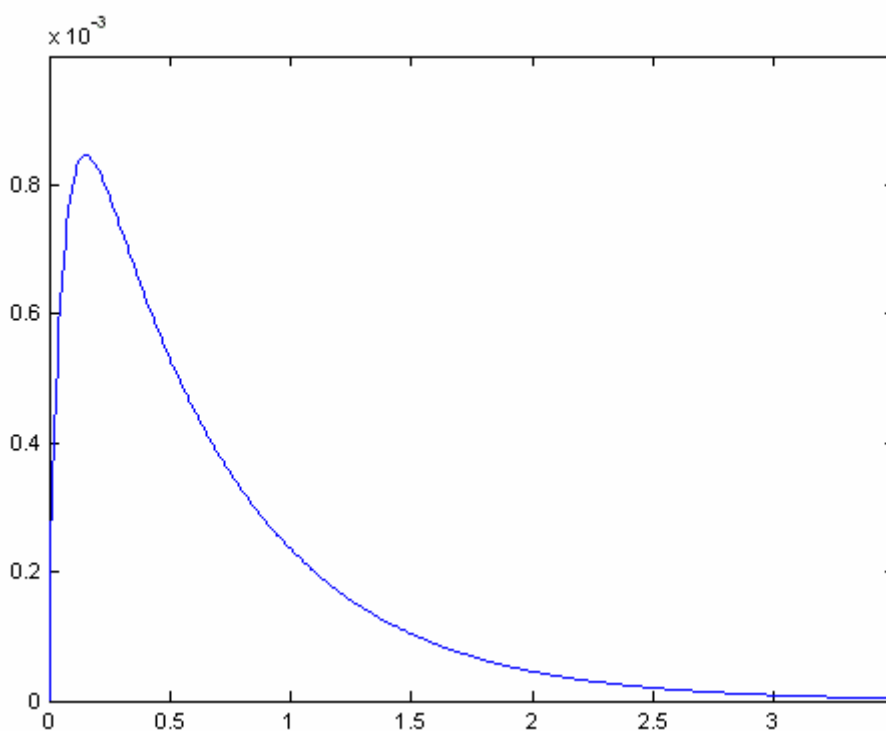


Рис. 4. Импульсно-переходная характеристика датчика Гардона

Импульсно-переходная характеристика датчика Гардона представлена на рис. 4. Импульсно-переходная характеристика описывает реакцию датчика на импульсное воздействие. Из рис. 4 видно, что после него для возвращения в исходное состояние датчику Гардона требуется менее 3,5 с.

С помощью импульсной переходной матрицы можно получить выражения для нахождения амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик датчиков. Логарифмические амплитудно- и фазочастотная характеристики датчика Гардона представлены на рис. 5.

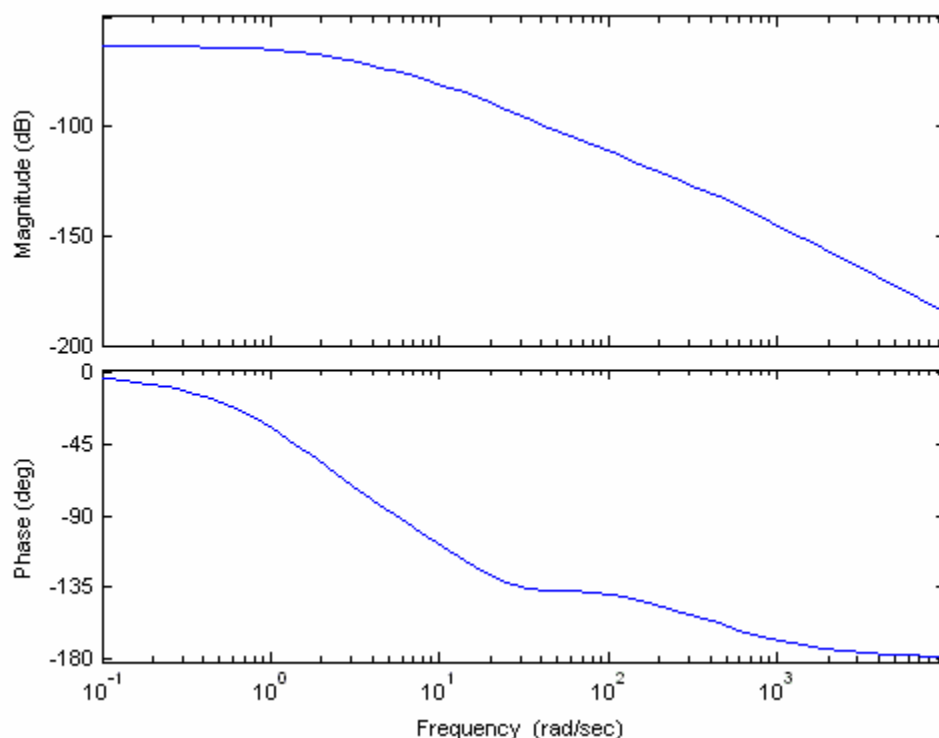


Рис. 5. Логарифмические амплитудно- и фазочастотная характеристики датчика Гардона

Логарифмические амплитудно- и фазочастотные характеристики показывают реакцию датчика на сигнал гармонической частоты. Из рис. 5 видно, что при частоте 1 рад/с (0,16 Гц) выходной сигнал сдвигается по фазе относительно входного на 4° . Входной сигнал ослабляется на 63,5 дБ (в 63,5 раза). При частоте выше 1 рад/с наблюдается резкое возрастание ослабления сигнала.

В ходе исследований был успешно использован метод параметрической идентификации искомого параметра. По результатам исследований был сделан вывод о применимости предложенной унифицированной методологии нестационарной теплотометрии для восстановления нестационарного теплового потока и коэффициентов теплоотдачи с помощью датчика Гардона, а также для получения его динамических характеристик еще на стадии проектирования.

Литература

1. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотометрии (ч. 1). // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. №8. С. 50–54.
2. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотометрии (ч. 2). // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. №10. С. 67–71.

АСТАТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Н.В. Пилипенко, Д.А. Гладских

Предложена и обоснована методология нестационарной теплотометрии с использованием астатических приемников тепловых потоков (ПТП), получены их динамические характеристики и даны рекомендации по области применения.

В настоящее время актуальными являются практические задачи определения переменных во времени или постоянных, но в динамическом режиме, тепловых потоков от источников энергии различной природы. Для решения данных задач применяются одномерные инерционные приемники теплового потока (ПТП), по показаниям которых решается нестационарная граничная обратная задача теплопроводности (ОЗТ) и восстанавливается тепловой поток $q(\tau)$, проходящий через датчик. Для использования ПТП в различных условиях необходимо знать динамические характеристики, по которым можно дать рекомендации по его области применения. В [1] рассмотрены различные способы получения динамических характеристик для простейших ПТП. Использование современных программных средств позволяет вычислять их для ПТП любой сложности.

Одним из типов астатических датчиков является пластина на полупространстве. Схематичное изображение данного ПТП представлено на рис. 1. Для решения задачи необходимо измерять температуру поверхности $t_1(\tau)$ и знать теплофизические характеристики (ТФХ) тел I и II, а именно такие как λ_1 и λ_2 , c_1 и c_2 , ρ_1 и ρ_2 – теплопроводности, удельные теплоемкости и плотности стенки и полупространства, соответственно; R_k – контактное тепловое сопротивление между стенкой и полупространством.

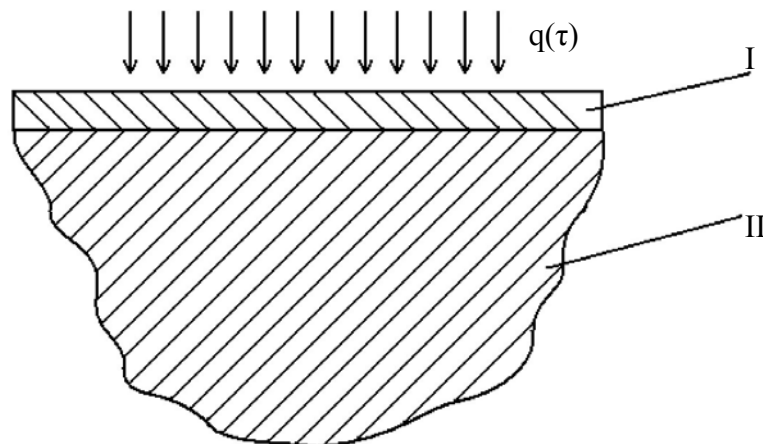


Рис. 1. Топология ПТП типа плоская стенка на полупространстве:
I – плоская стенка, II - полупространство

Для решения задачи воспользуемся дифференциально-разностной моделью (ДРМ) теплопереноса в ПТП, которая в векторно-матричной форме имеет вид [2,3]:

$$\frac{d}{d\tau} \vec{T}(\tau) = \mathbf{F} \vec{T}(\tau) + \mathbf{G} \vec{U}(\tau), \quad (1)$$

где $\vec{T}$ и $\vec{U}$ – векторы состояния и управления, $\mathbf{F}$ и $\mathbf{G}$ – матрицы обратных связей и управления.

Как указано в [2], полная математическая модель ПТП как динамической теплоизмерительной системы состоит из моделей теплопереноса (2) и измерений

$$\vec{Y}_K = \mathbf{H}\vec{T}_K + \vec{\varepsilon}_K, \quad (2)$$

где $\vec{Y}_K$ и $\vec{\varepsilon}_K$ – вектора измерений и погрешностей, $\mathbf{H}$ – матрица измерений.

Важными характеристиками любых датчиков для измерения тепловых потоков $q(\tau)$, в частности, астатических являются их динамические характеристики, а именно, переходная, импульсная, а также амплитудно- и фазо-частотные. Остановимся на некоторых из них.

Переходной характеристикой или переходной функцией ПТП называют его реакцию на единичное воздействие $l(t)$,

$$l(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } \tau \geq 0 \\ 0 & \text{при } \tau < 0 \end{cases}$$

обозначая ее как $h(t)$. По ней мы можем судить о длительности переходного процесса ПТП при резком изменении воздействия.

Временной или импульсной характеристикой ПТП называют его реакцию на функцию $\delta(t)$, обозначая ее как $w(t)$. Единичное импульсное воздействие – функция $\delta(t)$ – представляет собой импульс бесконечной величины в нулевой момент времени, т.е.

$$\delta(\tau) = \begin{cases} \infty, & \text{при } \tau = 0 \\ 0, & \text{при } \tau \neq 0. \end{cases}$$

Знание импульсной характеристики позволяет определить реакцию ПТП на сигнал любой формы.

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика ПТП показывает реакцию ПТП на гармоническое воздействие в широком спектре частот. По ней можно определить, насколько ослабит входной сигнал ПТП при той или иной частоте. Чем сильнее ослабление сигнала, тем ниже чувствительность тепломера на данной частоте.

Логарифмическая фазочастотная характеристика ПТП показывает, насколько при гармоническом изменении теплового потока фаза синусоиды, описывающей температуру (перепад температур), сдвинута относительно фазы синусоиды, описывающей тепловой поток, в широком спектре частот. Данная характеристика полезна, например, в случае, когда ПТП является датчиком в какой-нибудь системе регулирования (например, в устройстве термостатирования), когда надо поддерживать заданную температуру объекта, на который воздействует быстро меняющийся тепловой поток. Чем сильнее сдвиг по фазе температуры относительно потока, тем выше будет погрешность термостатирования.

Амплитудно-фазочастотная характеристика (АФЧХ) ПТП фактически объединяет в себе амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики, которые в АФЧХ изображены на комплексной плоскости в виде годографа.

Для получения динамических характеристик ПТП необходимо найти его передаточную функцию, которую получим путем преобразования выражений (1) и (2). Для этого применим к ним преобразование Лапласа. При нулевых начальных условиях, заменив оригиналы переменными изображениями по Лапласу, получим систему векторно-матричных операторных уравнений [1]

$$\begin{cases} s\vec{T}(s) = \mathbf{F}\vec{T}(s) + \mathbf{G}\vec{U}(s), \\ \vec{Y}(s) = \mathbf{H}\vec{T}(s). \end{cases} \quad (3)$$

Из первого уравнения системы (3) имеем:

$$\begin{aligned} s\vec{T}(s) - \mathbf{F}\vec{T}(s) &= \mathbf{G}\vec{U}(s), \\ (s\mathbf{I} - \mathbf{F})\vec{T}(s) &= \mathbf{G}\vec{U}(s). \end{aligned} \quad (4)$$

Если матрица $(s\mathbf{I} - \mathbf{F})$ не вырождена, т.е. $\det(s\mathbf{I} - \mathbf{F}) \neq 0$, то

$$\vec{X}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{F})^{-1} \mathbf{G}\vec{U}(s) = \mathbf{H}_{экв1}(s)\vec{U}(s), \quad (5)$$

откуда следует, что

$$\mathbf{H}_{\text{экв1}}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{F})^{-1} \mathbf{G}. \quad (6)$$

После подстановки выражения (6) в уравнение (3) запишем:

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{H}\vec{T}(s) = \mathbf{H}(s\mathbf{I} - \mathbf{F})^{-1} \mathbf{G}\vec{U}(s) = \mathbf{H}_{\text{экв2}}(s)\vec{U}(s) \quad (7)$$

и окончательно получим:

$$\mathbf{H}_{\text{экв2}}(s) = \mathbf{H}(s\mathbf{I} - \mathbf{F})^{-1} \mathbf{G}, \quad (8)$$

где $\mathbf{H}_{\text{экв1}}(s)$ и $\mathbf{H}_{\text{экв2}}(s)$ – передаточные матрицы или матрицы системы, компонентами которых будут передаточные функции, связывающие компоненты векторов входа и выхода системы. Следовательно, выражения (6) и (8) представляют собой универсальные формулы для вычисления всех необходимых для анализа передаточных функций приемника теплового потока, по которым могут быть получены структурные схемы и частотные характеристики.

Исходными параметрами для выражений (6) и (8) являются матрицы параметров уравнений состояния и выхода. Выполнить преобразования (6) и (8) можно с помощью компьютера, имеющего программы символьной математики, например, такие, как MatLab 7.0.1.

В качестве примера рассмотрим динамические характеристики конкретного ПТП, представляющего собой плоскую стенку на полупространстве, полученные при помощи программы MatLab 7.0.1. При расчете использованы следующие теплофизические свойства ПТП: $\lambda_1=15$ Вт/м·К, $c_1=490$ Дж/кг·К, $\rho_1=8000$ кг/м³; $\lambda_2=0,7$ Вт/м·К, $c_2=1600$ Дж/кг·К, $\rho_2=2000$ кг/м³; $R_k=0,001$ К/(Вт·м²), $\Delta=0.0002$ м.

Как показывают расчеты, динамические характеристики ПТП сильно зависят от измерения температуры.

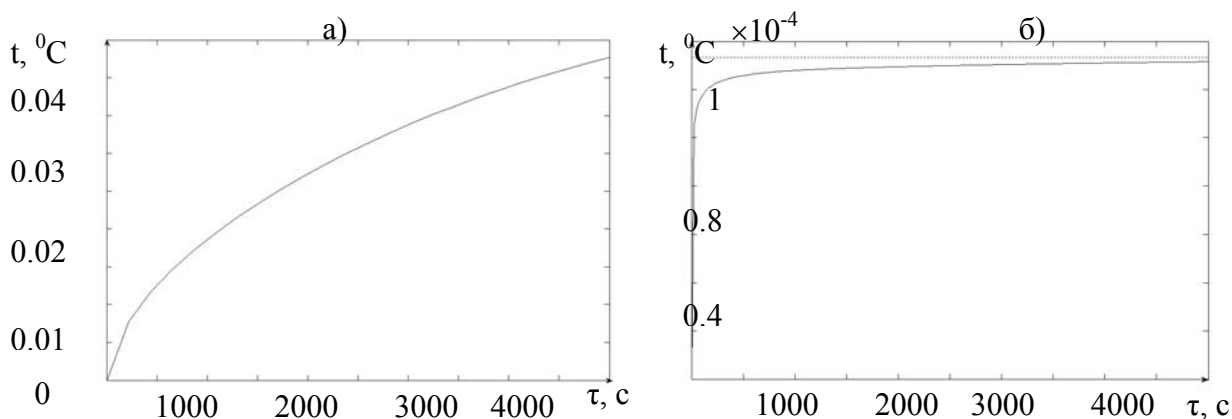


Рис. 2. Переходные характеристики ПТП

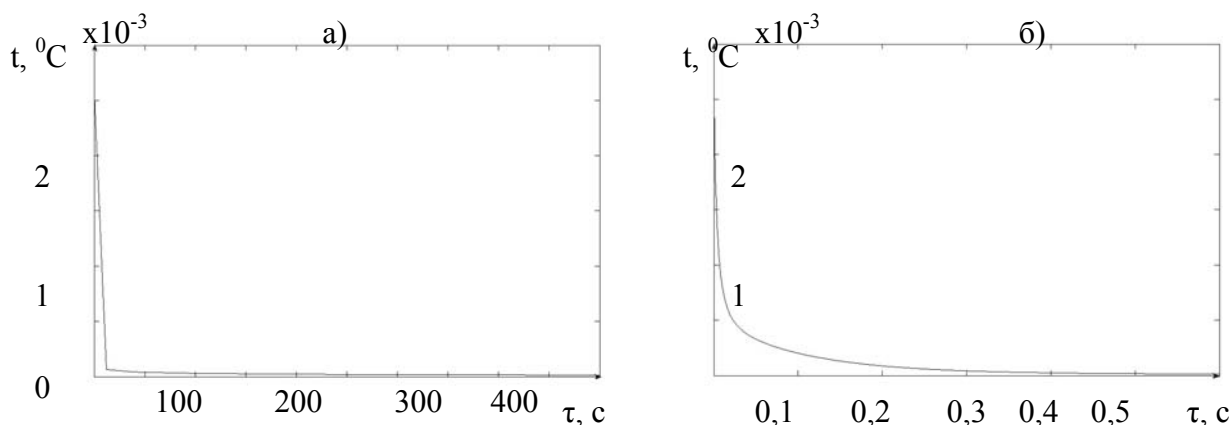


Рис. 3. Импульсные характеристики ПТП

Как видно из рис. 2 и 3, переходная и импульсная характеристики ПТП сильно зависят от места расположения датчиков температуры. На рис. 2,а и 3,а показаны переходная и импульсная характеристики при измерении температуры поверхности ПТП, а на рис. 2,б и 3,б – перепада температур по толщине ПТП.

Из анализа результатов следует:

1. при измерении перепада температур $\Delta t(\tau)$ по толщине ПТП он быстрее реагирует на ступенчатое воздействие;
2. в результате импульсного воздействия и измерении температуры поверхности $t(\tau)$ ПТП быстрее возвращается в исходное состояние, чем при измерении перепада температур $\Delta t(\tau)$.

С учетом сказанного можно дать рекомендации для использования подобных ПТП: при определении быстроменяющихся тепловых потоков высокой интенсивности для улучшения динамических качеств ПТП необходимо измерять перепад температур по толщине пластины $\Delta t(\tau)$; если требуется чувствительность при средней интенсивности, то можно измерять только температуру поверхности.

Литература

1. Симбирский Д.Ф. Температурная диагностика двигателей. Киев: Техніка, 1979.
2. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплометрии (ч. 1). // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. №8.
3. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплометрии (ч. 2). // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. №10.

УСТРОЙСТВО ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ПРОБ ГАЗА
В ГАЗОАНАЛИЗАТОРАХ

В.А. Кораблев, Д.С. Макаров

Описана методика расчета теплового режима и выбора закона регулирования температуры проб газа в газоанализаторе.

Введение

Современные газоанализаторы позволяют проводить непрерывный мониторинг атмосферы (окружающей среды) и быстро выявлять наличие фракций очень небольшой концентрации, однако точность их работы существенно зависит от температуры проб газа.

Исследования воздушной среды могут проводиться при температурах от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$, поэтому принято решение термостатировать поток газа, непрерывно отбираемый из среды на уровне 60°C с погрешностью не более $\pm 1\text{ K}$. Применявшееся ранее устройство [1] позволяет решить эту задачу путем прокачки газа через термостатированный объем, однако, при этом теряется оперативность измерений, так как на выходе этого устройства уменьшается концентрация исследуемых фракций из-за разбавления пробы воздухом, находящимся в этом объеме. В результате этого есть риск не зафиксировать локальное резкое изменение концентрации какой-либо газовой составляющей.

Описание прибора

Для устранения этого недостатка разработано устройство, схема которого представлена на рис. 1.

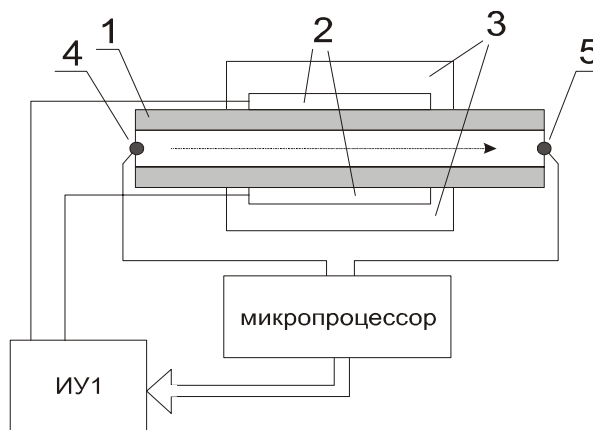


Рис. 1. Устройство для термостатирования проб газа

Воздух прокачивается, как показано стрелкой, по тонкостенной трубке, выполненной из нержавеющей стали. На внешней поверхности трубки 1 установлен электрический нагреватель 2 и теплоизоляция 3. Температура воздуха на входе трубки измеряется датчиком 4, а на выходе — датчиком 5. Нагреватель 2 выполнен из нихромовой проволоки в кремнеземной изоляции, а теплоизоляция выполнена из базальтовой ваты и закреплена кремнеземным волокном. Толщина теплоизоляции выбрана таким обра-

зом, чтобы при засорении входного отверстия и отсутствии потока воздуха не происходило перегорания устройства.

Датчики температуры 4 и 5 подключены к регулятору температуры, который управляет работой нагревателя 2. В качестве датчиков температуры использованы полупроводниковые термометры сопротивления ТР-2.

Методика расчета

Для регулирования температуры воздуха в таких устройствах обычно применяются двухпозиционный и пропорциональный законы [1, 2]. Опыты показали, что при двухпозиционном регулировании возникает недопустимо большая динамическая погрешность, а при пропорциональном регулировании – значительная статическая погрешность, величина которой зависит от температуры и скорости воздуха на входе. Устранить эти недостатки возможно, если применить комбинированный закон регулирования температуры [3], в котором мощность тепловыделений в нагревателе будет зависеть от температур воздуха на входе T_4 и выходе T_5 трубки:

$$\Phi_n = k_1(T_n - T_4) + k_2(T_n - T_5) \quad (1)$$

где T_n – температура настройки регулятора, k_1 и k_2 – коэффициенты, значения которых можно обосновать с помощью тепловой модели, описывающей теплообмен между трубкой 1, воздухом в трубке и средой в устройстве термостатирования.

При протекании через трубку воздуха мощность нагревателя идет на нагрев трубки, нагрев потока воздуха, а также частично уходит в окружающую среду. В общем виде можно записать

$$\Phi_n = c_1 \frac{dT_1}{d\tau} + \sigma_{1в}(T_1 - \bar{T}_в) + \sigma_{из}(T_1 - T_4) \quad (2)$$

где c_1 – теплоемкость трубки, $\sigma_{1в}$ и $\sigma_{из}$ – тепловые проводимости к воздуху в трубке и к среде через изоляцию на внешней поверхности.

Нагрев воздуха в трубке можно описать выражением

$$cG(T_5 - T_4) = \sigma_{1в}(T_1 - \bar{T}_в) \quad (3)$$

где c и G – удельная теплоемкость и массовый расход воздуха в трубке, соответственно, $\bar{T}_в$ – средняя температура воздуха в трубке, которую можно определить как

$$\bar{T}_в = \frac{1}{2}(T_4 + T_5) \quad (4)$$

Решая систему уравнений (2), (3) и (4) с учетом закона регулирования (1) при постоянной температуре среды T_4 , можно получить стационарное значение температуры воздуха на выходе из трубки:

$$T_5 = \frac{\sigma_{1в}[k_1 T_n + (0,5\sigma_{1в} + \sigma_{из} - k_1)T_4] - (\sigma_{1в} + \sigma_{из})(0,5\sigma_{1в} - cG)}{(\sigma_{1в} + \sigma_{из})(0,5\sigma_{1в} + cG) + \sigma_{1в}(k_2 - 0,5\sigma_{1в})}. \quad (5)$$

Статическая погрешность δT_{cm} определяется как разность температур воздуха на выходе T_5 при максимальной $T_4^{\max}$ и минимальной $T_4^{\min}$ температурах среды:

$$\delta T_{cm} = T_5^{\max} - T_5^{\min} \quad (6)$$

С учетом выражения (5) можно получить зависимость для δT_{cm}

$$\delta T_{cm} = \frac{\sigma_{1\theta}(0,5\sigma_{1\theta} + \sigma_{u3} - k_1)}{(\sigma_{1\theta} + \sigma_{u3})(0,5\sigma_{1\theta} + cG) + \sigma_{1\theta}(k_2 - 0,5\sigma_{1\theta})} (T_4^{\max} - T_4^{\min}). \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что δT_{cm} равна нулю при

$$k_1 = 0,5\sigma_{1\theta} + \sigma_{u3} \quad (8)$$

Величина k_2 в законе регулирования температуры (1) может быть обоснована заданием времени выхода системы на стационарный тепловой режим $\tau_{зад}^c$ от момента включения при постоянной температуре среды T_4 .

Если считать режим стационарным при недогреве трубки до стационарного значения на величину менее $\delta T_1 = 0,05(T_1 - T_4)$, то, решая систему уравнений (1), (2), (3) и (4) относительно k_2 , можно получить

$$k_2 = \frac{3c_1(2cG + \sigma_{1\theta}) - (\sigma_{1\theta} + \sigma_{u3})(2cG + \sigma_{u3})\tau_{зад} + \frac{\sigma_{1\theta}}{2}}{\sigma_{1\theta}\tau_{зад}}. \quad (9)$$

Заключение

Практическая реализация закона регулирования (1) с учетом зависимостей (8) и (9) выполнена с использованием широтно-импульсной модуляции. Реализация устройства термостатирования позволила существенно повысить точность работы газоанализатора.

Литература

1. Ярышев Н.А., Андреева Л.Б. Тепловой расчет термостатов. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 176 с.
2. Кондратьев Г.П., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.В. Прикладная физика. Теплообмен в приборостроении. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2003. 560 с.
3. Мирошник И.В. Теория автоматического управления: Линейные системы: Учебное пособие для вузов. СПб: Питер, 2005. 333 с.

ЭЛЕКТРОННЫЙ МАНОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

В.А. Кораблев, Д.С. Макаров

Приводятся основные характеристики цифрового манометра для лабораторных исследований и настройки пневматических устройств.

Введение

Приборостроительная промышленность производит большое количество устройств для измерения давления жидкостей и газов от 10^{-6} до 10^8 Па. Большинство этих приборов позволяет проводить измерения только абсолютного или относительного давления, результаты измерений представлены во внесистемных единицах, отсутствует преобразование измеряемой физической величины в электрический цифровой сигнал [1]. С целью устранения этих недостатков авторами статьи на кафедре КТФиЭМ СПб ГУ ИТМО был разработан портативный цифровой манометр МакС, предназначенный для измерения абсолютного давления в диапазоне от 10 до $1,2 \cdot 10^5$ Па, а также разрежения и избыточного давления в пределах от -10^5 до $+0,25 \cdot 10^5$ Па.

Описание прибора

В качестве чувствительного элемента используются полупроводниковые датчики давления ДДА, преобразующие давление с помощью мембраны и полупроводниковых сенсоров в электрический сигнал постоянного тока. Входной дифференциальный сигнал усиливается операционным усилителем ОУ, после чего подается на вход АЦП микроконтроллера. Для дифференциального усиления слабого сигнала можно воспользоваться схемой, приведенной на рис. 1. Использование прецизионных резисторов R1, R2 позволяет подавлять сетевые наводки даже значительной амплитуды до приемлемых уровней [2].

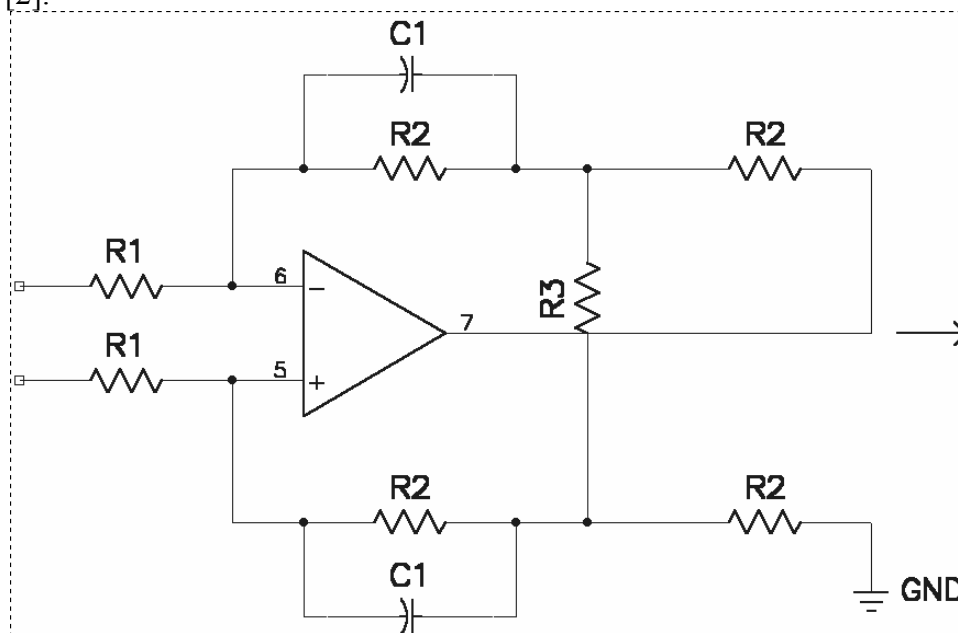


Рис. 1. Схема Т-образного дифференциального усилителя.

Простейшие портативные приборы обычно разрабатываются на основе одноканального АЦП со встроенным дешифратором для отображения измеренных значений

(например, ICL7106), но для получения многофункционального прибора данный подход неприемлем, и рекомендуется использование микроконтроллера.

Для решения поставленной задачи был выбран микроконтроллер PIC16F874A фирмы Microchip, содержащий в себе аппаратную реализацию 10-ти битного АЦП, 8/16-битного таймера, а также программную реализацию дешифратора жидкокристаллического индикатора (ЖКИ). Многоканальный АЦП позволил одновременно подключить 2 датчика давления, давая, таким образом, возможность, переключая каналы, менять вид измерения. К дополнительным функциям, реализованным в микроконтроллере, можно отнести режим энергосбережения за счет отключения ОУ и датчика давления, пересчет единиц измерения давления (кПа/мм рт. ст.), а также измерение и индикацию уровня разряда элемента питания.

Программный пересчет измеренного значения в единицы давления, как правило, повышает точность измерения, так как возможна статистическая обработка результатов измерения, исключение случайных измерений, осреднение значений за некоторый интервал времени и т.п., т.е. основным источником погрешности является собственно чувствительный элемент. В настоящем приборе использовался датчик, имеющий заявленную максимальную погрешность измерения $\pm 2,5$ кПа, однако реальная измеренная погрешность не превышает $\pm 0,27$ кПа (± 2 мм рт. ст.). Для повышения точности измерения следует использовать более точный (и более дорогой) датчик.

Внешний вид манометра представлен на рис. 2. Устройство может отображать полученные значения в двух единицах измерения: в атмосферах или в миллиметрах ртутного столба (на рисунке представлен вариант с отключенной возможностью выбора единиц измерения). Выбор требуемого вида измерения, а также единиц измерения программируются соответствующим переключателем на корпусе прибора.



Рис. 2. Электронный манометр МакС.

Прибор рассчитан на применение в газовых неагрессивных средах, также допускается использовать устройство для измерения давления дистиллированной воды.

Питание манометра осуществляется от батареи типа “Крона”. Для замены разряженной батареи следует вытащить защитную крышку с тыльной стороны корпуса. Устройство также снабжено индикатором разряда батареи, при разряде элемента питания ниже определенного уровня загорается сегмент “LB”.

Так как портативные приборы очень часто по ошибке оставляют включенными, что приводит к заметному уменьшению срока службы элемента питания, в настоящем приборе предусмотрен режим автоматического отключения при отсутствии изменения давления/разрежения на входе прибора в течение 1 минуты.

Основные характеристики прибора представлены в таблице.

Питание	Батарея типа “Крона”, 9 В
Время непрерывной работы	≈300 ч
Максимально допустимый диапазон давления	–100..+100 кПа
Диапазон измеряемого давления	–100..+25 кПа
Точность измерения	±0,3 кПа
Вид измерения	абсолютное/относительное
Единицы измерения	кПа/мм рт. ст.
Длительность задержки перед отключением	1 мин
Габаритные размеры	75х120х30 мм
Вес	160 г

Таблица. Основные характеристики прибора

Заключение

Разработанное устройство может применяться при термовакуумных испытаниях авиационной и космической техники, при настройке и контроле аспирационных хирургических приборов микрохирургии глаза, для исследований процессов конвективного теплообмена в условиях пониженного давления газообразной среды, при ремонте систем управления впрыском двигателей внутреннего сгорания и в других областях.

Литература

1. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы: Учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов». / 3-е изд., перераб. М.: Энергия, 1978. 704 с., ил.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир, 2003. 704с.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Ю.П. Заричняк, Л.С. Платунова

Рассматривается метод определения теплопроводности анизотропных однонаправленных волокноармированных композитов на основе существующего нестационарного метода и с использованием устройства ИТЛ-1 [1].

В настоящее время интенсивно развиваются классы новых композиционных материалов с резкой анизотропией теплофизических свойств, в том числе и волокноармированные микро- и нанокомпозиты. Поверочные аналитические оценки показывают, что их теплопроводность существенно изменяется в зависимости от направления теплового потока (вдоль и поперек волокон) в диапазоне от 0,10 до 10^3 Вт/(м·К).

Исследование теплопроводности материалов с резкой анизотропией требует разработки нового метода и устройства для измерения теплопроводности образцов.

Нестационарный метод и устройство ИТЛ-1 для измерения теплопроводности анизотропных пластин и дисков разработан на кафедре физики ГУНиПТ. ИТЛ-1 предназначен для исследования теплопроводности макрооднородных и мелкозернистых изотропных или слабо анизотропных теплоизоляционных материалов (плотные и вспененные полимеры, ткани, войлоки, пленки, порошки), а также разнообразных промышленных неметаллических материалов, образцы которых могут иметь форму пластинок и пленок. Анализ конструкции рассмотренной тепловой ячейки ИТЛ-1 показал, что она может служить прототипом при разработке методов определения теплопроводности материалов, обладающих двумерной анизотропией в декартовой системе координат. Однако для решения этой задачи следует частично изменить тепловую схему ячейки. В частности, ячейка должна обеспечивать одномерные тепловые потоки по осям анизотропии образца

Автоматика прибора позволяет на регулярной стадии разогрева получать параметры стационарного состояния, что значительно сокращает время опыта [2]. Для измерений в каждом из направлений требуется разработка индивидуальных тепловых ячеек.

Измерение теплопроводности тонких низкотеплопроводных материалов производится на образцах в виде дисков. Чтобы обеспечить разогрев образца одномерным тепловым потоком, ему придается форма диска (толщиной 1 мм и диаметром 20 мм), диаметр которого совпадает с диаметром диска-нагревателя. Условие одномерности предполагается обеспеченным, так как теплопроводность воздушной прослойки, окружающей образец, в десятки раз ниже ожидаемой теплопроводности образца.

Тепловой поток при этом направлен перпендикулярно плоскости диска. Образец разогревается тепловым потоком постоянной мощности. В стационарной стадии опыта тепловой поток нагревателя уходит в блок и основание ячейки в виде двух составляющих. Одна часть потока проникает в блок через образец, а другая часть уходит в основание через тепловую изоляцию нагревателя. Стационарный перегрев нагревателя по отношению к массивному блоку с температурой, практически не изменяющейся за время эксперимента, определяется автоматически и является основным измеряемым параметром. Для калибровки прибора в качестве эталонных материалов с хорошо известными свойствами использовались образцы из полиметилметакрилата. Расчетная формула имеет вид:

$$k = \frac{1}{S} \left(\frac{W}{\Theta} - K_{из} \right), \quad \lambda = \frac{h}{\frac{1}{k} - p_k}, \quad (1)$$

где $K_{из}$, p_k – постоянные прибора, h – толщина образца, W – мощность, Θ – стационарный перегрев, $K_{из}$ – сопротивление изоляции, p_k – контактное сопротивление, S – площадь поперечного сечения образца.

Измерения теплопроводности высокотеплопроводных материалов проводятся на образцах в виде ленточной полоски. Образец своими концами касается диска нагревателя и основания ячейки. Верхняя поверхность образца теплоизолируется от блока пластиной пенопласта. В процессе опыта образец (полоска) плотно прижимается к основанию и нагревателю верхним блоком. Благодаря указанным мерам тепловой поток нагревателя, как и в предыдущем варианте ячейки, делится на две составляющие. Одна часть потока рассеивается в основание через тепловую изоляцию, другая часть потока попадает от нагревателя к основанию, проходя вдоль волокон образца. Благодаря высокой теплопроводности образца теплообмен его рабочего (среднего) участка с окружающим сверху и снизу пенопластом оказывает слабое влияние. Поэтому можно принять, что на всей длине образца в опыте формируется одномерное температурное поле, зависящее только от продольной координаты.

В стационарной стадии опыта в образце по всей длине устанавливается достаточно сложное одномерное температурное поле, так как температурное поле концов образца формируется под воздействием интенсивного контактного теплообмена с нагревательным диском и основанием.

Чтобы найти температурное поле образца, выделим три участка образца. На первом участке образец своим концом контактирует с диском нагревателя, который в стационарной стадии имеет температуру перегрева Θ . На третьем участке образец находится в контакте с основанием. Его температура принимается равной нулю, так как от нее определяется перегрев Θ . На втором, рабочем, участке боковые поверхности образца теплоизолированы от внешней среды, поэтому его температурное поле остается близким к линейному. Теплопроводность образца определяется выражением [2]

$$\lambda = \frac{l_0}{bh} \left(\frac{W}{\Theta} - K_{из} \right) \frac{\left[\frac{\text{th}\beta_0 l_0}{\beta_0 l_0} + \frac{1}{\beta_k l_0} (1 + \text{cth}\beta_k l_k) + \frac{\beta_0^2}{\beta_k^2} \frac{\text{th}\beta_0 l_0}{\beta_0 l_0} \text{cth}\beta_k l_k \right]}{\left(1 + \frac{\beta_0}{\beta_k} \text{th}\beta_0 l_0 \right)},$$

$$\beta_k = \sqrt{\frac{1}{\lambda h p_k}}, \quad \beta_0 = \frac{\alpha_{из}}{\alpha h}, \quad (2)$$

где l_0 – длина рабочего участка, b – ширина образца, α – коэффициент теплопередачи образца, $\alpha_{из}$ – коэффициент теплопередачи изоляции. Расчетная формула учитывает влияние поправок на контактные тепловые сопротивления и на боковой теплообмен среднего участка образца.

Представляют самостоятельный интерес два частных варианта общей формулы (2). Так, если в опытах удастся пренебречь влиянием бокового теплообмена образца, формула приобретает гораздо более простой вид:

$$\lambda = \frac{l_0}{bh} \left(\frac{W}{\Theta} - K_{из} \right) \left[1 + \frac{1}{\beta_k l_0} (1 + \text{cth}\beta_k l_k) \right]. \quad (3)$$

Если же в опытах удастся пренебречь влиянием контактных тепловых сопротивлений, формула (2) предельно упрощается:

$$\lambda = \frac{l_0}{bh} \left(\frac{W}{\Theta} - K_{из} \right) /. \quad (4)$$

Для калибровки прибора в качестве эталонных материалов с хорошо известными свойствами использовались образцы из меди, молибдена, латуни и стали. Толщина пластинок изменялась в пределах от 0,05 до 1 мм, ширина пластинок изменялась в пределах 5–15 мм. Длина концов равнялась 20 мм. Длина рабочего участка составляла 25 мм. Мощность нагревателя поддерживалась на уровне 0,30 Вт. Основным экспериментальным параметром является стационарный перегрев Θ .

Случайная погрешность измерения теплопроводности в пределах 1Вт/(м·К) составляет 1,5%. Систематическая погрешность достигает 5%. Случайная погрешность измерения теплопроводности в пределах 10–400 Вт/(м·К) составляет 1,5%. Систематическая погрешность достигает 15%.

Рассмотренный метод может использоваться для определения теплопроводности анизотропных однонаправленных волокноармированных композитов.

Литература

1. Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А. Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2003. 560 с.
2. Платунов Е.С., Буравой С.Е., Курепин В.В., Петров Г.С. Теплофизические измерения и приборы. / Под общ. ред. Платунова Е.С. Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1986. 256 с.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ЭРГОНОМИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ

В.И. Егоров, Т.Ю. Иванова, В.А. Кораблев, А.В. Шарков

Описываются особенности тепловой модели пультов управления для конструкторских расчетов элементов системы термостабилизации. Рассматривается проблема обеспечения функционирования пультов управления техническими средствами различных корабельных комплексов. Для этого анализируются источники теплоты и способы эффективного отвода тепла от наиболее термочувствительных элементов; проводится оценка влияния боковых перфорационных отверстий, выполненных в виде жалюзи.

Современные пульты управления являются сложными электронными приборами, содержащими дисплей, процессоры, накопители информации, источники электропитания, элементы индикации, органы управления и многое другое [1]. Большинство этих элементов являются высокоинтенсивными источниками тепловыделений, поэтому задача обеспечения теплового режима этих приборов является актуальной. Эта проблема усложняется тем, что в непосредственном контакте с пультом находится оператор, несущий вахту в течение длительного времени. Основными факторами, которые могут создать дискомфорт оператору и снизить эффективность его работы, являются радиационное воздействие передней поверхности пульта, контактное термическое воздействие панели управления на руки оператора и акустическое воздействие вентиляторов охлаждения.

Радиационное воздействие заключается в инфракрасном излучении нагретых поверхностей прибора, попадающем на оператора, и определяется законом Стефана-Больцмана для двух тел, разделенных прозрачной средой [2]. Если температура передней панели прибора достигает 60–70°C, то плотность теплового потока, падающего на открытые участки тела, может составить 200 Вт/м². Избыточная энергия от лица и рук может отводиться обильным потоотделением и конвективным теплообменом в воздух. Для создания комфортных условий можно понижать температуру окружающего воздуха путем его кондиционирования, однако этот метод требует использования энергоемких и громоздких установок и отрицательно сказывается на самочувствии операторов, вызывая, например, простуды.

В связи с расширением функций управления и улучшением эксплуатационных показателей, а также повышением требований к эргономическим характеристикам некоторые отечественные предприятия судостроительной промышленности ведут разработки в области создания пультов управления (ПУ) нового поколения. Для обеспечения нормального теплового режима данного электронного устройства используется, в частности, естественное воздушное охлаждение как наиболее простое, надежное и экономичное. Вместе с этим предъявляются повышенные требования по пыле- и влагозащитности, поэтому при проектировании пультов управления необходимо уделять особое внимание форме и расположению вентиляционных отверстий, что должно быть адекватно учтено при тепловом моделировании. Поэтому для данного класса электронных устройств необходимо разрабатывать методику расчета теплового режима, так как имеющаяся литература по тепловым режимам электронной аппаратуры в состоянии ответить лишь на небольшую часть вопросов, выдвигаемых практикой сегодня [1–4].

В работе рассматривается пульт управления, общий вид которого представлен на рис. 1. В приборном блоке (15) и блоке сигнализации (12) установлены мониторы МПМ-18 с локальными теплостоками на задней поверхности.

Для монтажа элементов в пульте управления применены стойка передняя (1) и стойка электромонтажная (2). В нижней части ПУ, на уровне углового каркаса (3), располагается крейт (5). Под крейтом может находиться блок вентиляторов (6). На этом же уровне, на передней стенке устанавливается крышка с жалюзи (4). Внутри ПУ рас-

полагаются соединители (9). Блок сигнализации (12) и блок приборный (15), с мониторами (13, 16) на передних стенках, также могут содержать крейты (10, 14). Под крейтом (10) блока сигнализации, кроме этого, при необходимости ставится блок вентиляторов (11). На задней стенке блока приборного находится крышка с жалюзи (17). Они могут ставиться также по всей высоте ПУ (8).

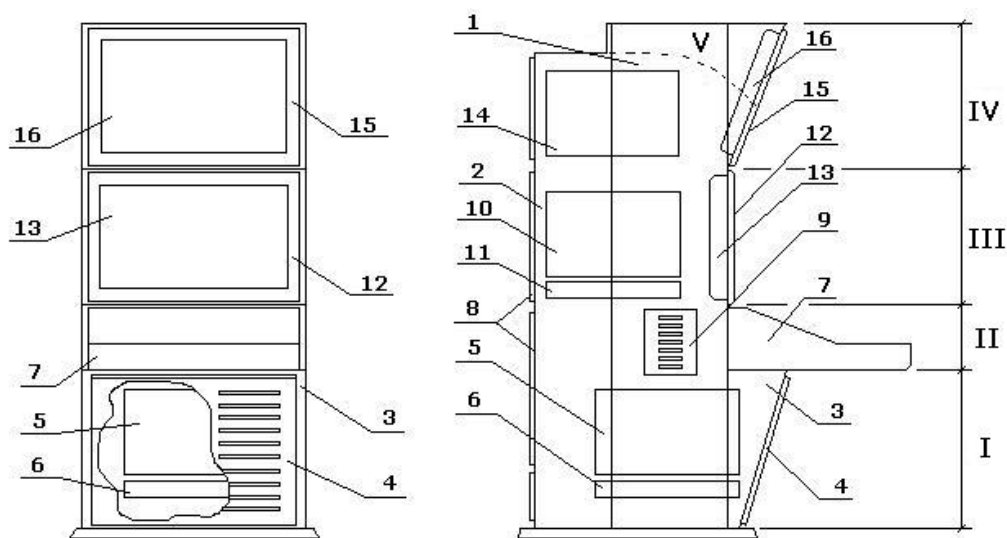


Рис. 1. Общий вид пульта управления

Исследуемый пульт управления можно представить в виде системы нескольких областей (этажей) сложной конфигурации с источниками и стоками теплоты и потоков теплоносителя (воздуха). Разделим ПУ условно на этажи, как показано на рис. 1. На каждом этаже имеется ряд теплонагруженных элементов:

I этаж – модули крейта (5);

II этаж – тепловыделяющие элементы соединителей (9);

III этаж – модули крейта (10), монитор (13);

IV этаж – модули крейта (14), монитор (16) наклонный (7) с панелью управления.

Полное математическое описание теплового режима такого объекта представляет собой систему дифференциальных уравнений теплопроводности для твердых тел и уравнений энергии для потоков теплоносителя с соответствующими краевыми условиями [5, 6]. Точное решение такой задачи затруднительно, поэтому для определения теплового режима электронных аппаратов применяется метод поэтапного моделирования [5]. Так как наибольший перегрев элементов наблюдается в стационарном режиме, то в работе динамика процесса не рассматривается.

На первом этапе сложные пространственные распределения источников теплоты заменяются более простыми, в форме параллелепипеда. Пространственные распределения величин, описывающих теплообмен на границах областей, заменим их средними значениями. В результате можно получить информацию о средних поверхностных температурах греющих элементов $T_{эл}$, корпуса ПУ T_k , а также среднюю температуру воздуха внутри аппарата U_i при температуре окружающей среды T_c . Для этого необходимо ввести ряд допущений:

- ПУ условно разделим на этажи (как показано на рис. 1);
- средняя по объему температура воздуха на этаже – среднее арифметическое между температурами входа на этаж и выхода из него;
- теплообмен между этажами ПУ осуществляется только конвекцией, считая, что связь по радиационной составляющей теплообмена незначительна, и ею можно пренебречь;

- кондуктивные связи элементов с корпусом незначительны, и при анализе процессов переноса тепла их можно не учитывать;
- средняя температура воздуха на выходе с одного этажа считается температурой входа для следующего этажа;
- расход воздуха равномерно распределен по объему ПУ.

Задача определения температурного поля блока кассетной конструкции излагается в [6, 7]. Основное отличие тепловой модели исследуемого пульты от широко применяемых моделей для стоек с этажами кассетного типа [7, 8] заключается в том, что тепло-выделяющий элемент (монитор) рассеивает тепло как во внешнюю, так и во внутреннюю воздушную среду. Кроме того, этажи имеют различные габариты, и нет упорядоченности в расположении тепловыделяющих модулей по этажам.

С учетом принятой тепловой модели математическая модель представляет собой систему алгебраических уравнений теплового баланса для корпуса, тепловыделяющих элементов, воздуха на каждом этаже и для расхода воздуха, протекающего через перфорационные отверстия.

В общем виде составим систему уравнений теплового баланса для: тепловыделяющего элемента

$$P_{эл i} = \sigma_{эл,с i}^{л+к} (T_{эл i} - T_c) + \sigma_{эл,к i}^л (T_{эл i} - T_{к i}) + \sigma_{эл,в i}^к (T_{эл i} - U_i), \quad (1)$$

корпуса

$$\sigma_{к,с i}^{л+к} (T_{к i} - T_c) + \sigma_{эл,к i}^л (T_{к i} - T_{эл i}) + \sigma_{к,в i}^к (T_{к i} - U_i) + \sigma_{к i,о} (T_{к i} - T_o) = 0, \quad (2)$$

воздуха

$$\sigma_{эл,в i}^к (T_{эл} - U_i) + \sigma_{к,в i}^к (T_{к i} - U_i) + \Delta P_{i-1} = 2 c_i G_i (U_{i+1} - U_i), \quad (3)$$

расхода воздуха

$$\sigma_{эл,в i}^к (T_{эл} - U_i) + \sigma_{к,в i}^к (T_{к i} - U_i) + \Delta P_{i-1} = 2 c_i G_i (U_{i+1} - U_i), \quad (4)$$

оператора

$$\sigma_{0,с} (T_0 - T_c) + \sum_{i=1}^n \sigma_{к i,0} (T_0 - T_{к i}) + \frac{dm}{d\tau} \gamma = \Phi_0, \quad (5)$$

где $P_{эл i}$ – мощность тепловыделений на i -ом этаже ($i = 1, 2, 3, 4$), Вт; $\sigma_{эл,с i}^{л+к}$, $\sigma_{к,с i}^{л+к}$ – суммарные тепловые проводимости от корпуса и от тепловыделяющего элемента в среду на i -ом этаже, Вт/К; $\sigma_{эл,к i}^л$ – лучистая тепловая проводимость между тепловыделяющим элементом на этаже и корпусом ПУ, Вт/К; $\sigma_{эл,в i}^к$, $\sigma_{к,в i}^к$ – конвективные тепловые проводимости между элементом и воздухом, между корпусом и воздухом на этаже, Вт/К; ΔP_{i-1} – тепловой поток, перешедший с i -ого этажа, Вт; G_i – массовый расход воздуха на рассматриваемом этаже при его высоте h_i , кг/с; c_i , β_i , ρ_i – теплоемкость (Дж/кг К), коэффициент объемного расширения (1/К) и плотность воздуха на этаже (кг/м³); $S_{отв i}$ – площадь перфорационных отверстий, м²; $\xi^{вх}$, $\xi^{вых}$ – коэффициенты гидравлических сопротивлений жалюзийной решетки ПУ на входе и выходе из аппарата, g – коэффициент свободного падения, м/с², σ_{oc} – лучисто-конвективная проводимость между оператором и средой, включая и потери теплоты дыханием, $dm/d\tau$ – скорость потери массы оператором за счет потоотделения, γ – теплота испарения воды, Φ_0 – мощность метаболических процессов в организме оператора.

По данным работы [4], оператор в процессе работы выделяет тепловую мощность 175 Вт. В комфортных условиях человек испаряет 30–40 г воды в час, но при мощном

лучистом потоке от пульта потоотделение существенно повышается, и это отрицательно сказывается на его субъективных ощущениях и составе газовой среды.

Для облегчения комфортных условий оператора и нормального теплового режима пульта в процессе теплового проектирования при реализации математической модели (1–5) необходимо подбирать такие значения T_{ki} и T_e , чтобы обеспечить комфортные условия оператору.

Все тепловые проводимости вычисляются на основе формул вида $\sigma_j = \alpha_j S_j$, где α_j – коэффициент теплоотдачи, соответствующий определенному механизму передачи тепла, Вт/м² К; S_j – площадь поверхности, на которой происходит теплообмен. Для каждого случая расчет коэффициента теплоотдачи осуществлялся на основе зависимостей, приведенных в [5].

Результаты сопоставления полученных экспериментальных данных теплового режима ПУ с расчетом по разработанной методике показали, что относительная погрешность расчета не превышает 15%.

Проведенные экспериментальные исследования и расчеты по разработанной методике показали, что она может быть положена в основу анализа теплового режима пультов управления, выбора параметров системы обеспечения теплового режима и улучшения условий работы операторов.

Литература

1. Войтецкий В.В., Корчанов В.М., Немакаев Ю.С. Интеграция систем управления техническими средствами надводных кораблей. // Военных парад. 2002. №5(51). С.38–42.
2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416с.
3. Малоземов В.В., Рожков В.Ф., Правецкий В.Н. Системы жизнеобеспечения экипажей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1986. 584 с.
4. Банхиди Л. Тепловой микроклимат помещений. Расчет комфортных параметров по теплоощущениям человека. М.: Стройздат, 1981. 248 с.
5. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа, 1984. 248 с, ил.
6. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с, ил.
7. Дульнев Г.Н., Тарновский Н.Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. М: Энергия”, 1971. 248 с, ил.

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРУНТА НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ЕГО ПОВЕРХНОСТИ

В.И. Егоров, Ю.Ю. Попов, И.А. Самохина, А.В. Шарков

Известно, что регистрация инфракрасных (ИК) изображений позволяет обнаруживать источники собственного теплового излучения, выявлять подземные коммуникации и пустоты, заглубленные в грунт объекты, обнаруживать нарушенные и затем вновь восстановленные участки почвы [1].

Успешное решение проблемы дистанционного обнаружения заглубленных в грунт инородных объектов связывают с авиационными многоспектральными приборами, обладающими высоким геометрическим разрешением и повышенной температурной чувствительностью инфракрасного канала оптико-электронной аппаратуры данного типа. Несомненный интерес представляют данные о закономерностях поведения температурных аномалий, обусловленных заглубленными объектами, наблюдаемых в разных условиях естественного теплообмена.

В данной работе предполагается, что грунт является однородным, лишенным растительности. Теплофизические свойства объекта отличаются от свойств грунта, что приводит к локальной неравномерности нестационарных температурных полей в глубине и на поверхности грунта. На поверхность грунта воздействуют солнечное излучение и температура воздушной среды, изменяющиеся в течение суток. Целью работы является исследование неравномерности температурного поля поверхности над объектом и в зоне, удаленной от объекта.

Задача решается в линейной постановке, т.е. зависимость теплофизических параметров от температуры не учитывается. Объект имеет массу 9,5 кг, из них масса металла – 2,5 кг, а масса вещества – 7 кг. Принимаем, что форма объекта – диск равной высоты. Радиус объекта 16 см, а высота основного объема 8 см. Толщина стальной оболочки – 2 мм. Эскиз вертикального сечения грунта по оси объекта представлен на рис. 1.

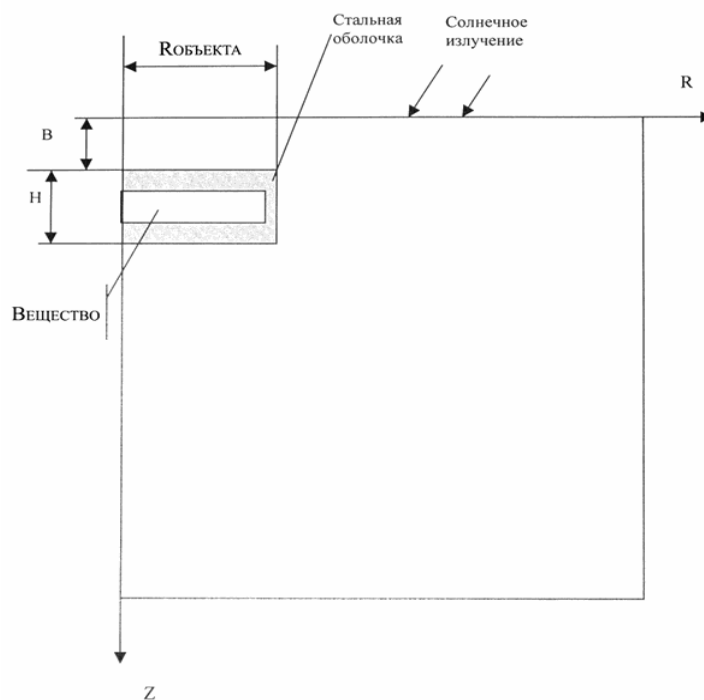


Рис. 1. Эскиз вертикального сечения грунта по оси объекта

Математической моделью нестационарных процессов теплообмена является краевая задача теплопроводности для полупространства с осью Z [3], проходящей через ось

объекта. Температурное поле зависит от времени и координат R, Z . В полупространстве имеются три области с различными теплофизическими свойствами (грунт, металл, вещество). Глубина объекта может варьироваться.

На оси объекта задаются условия симметрии. При R и Z , стремящихся к бесконечности, производные температуры по соответствующей координате равны нулю. На поверхности грунта задаются условия конвективного и лучистого теплообмена грунта с воздушной средой. Коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена принимаются постоянными. Температура воздуха и плотность потока солнечного излучения зависят от времени суток. Для оценочных расчетов выбраны зависимости, изображенные на рис. 2 и рис. 3. Данные зависимости обобщают реальные данные.

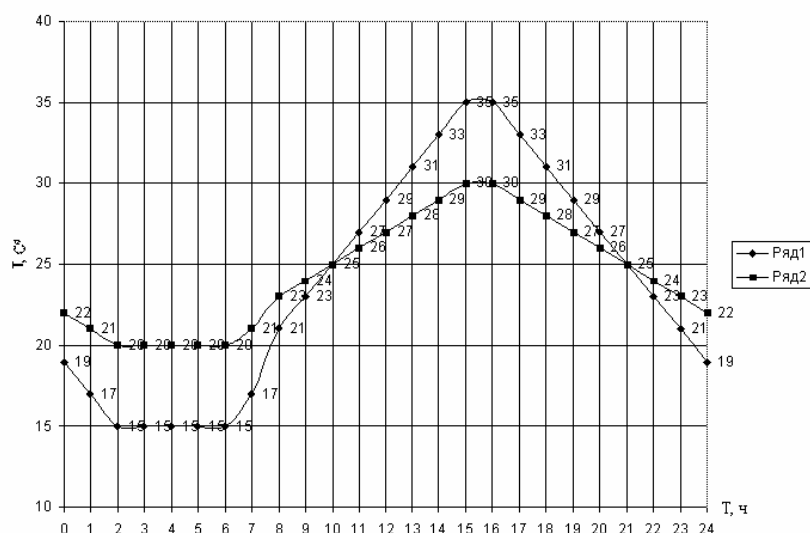


Рис. 2. Температура воздуха

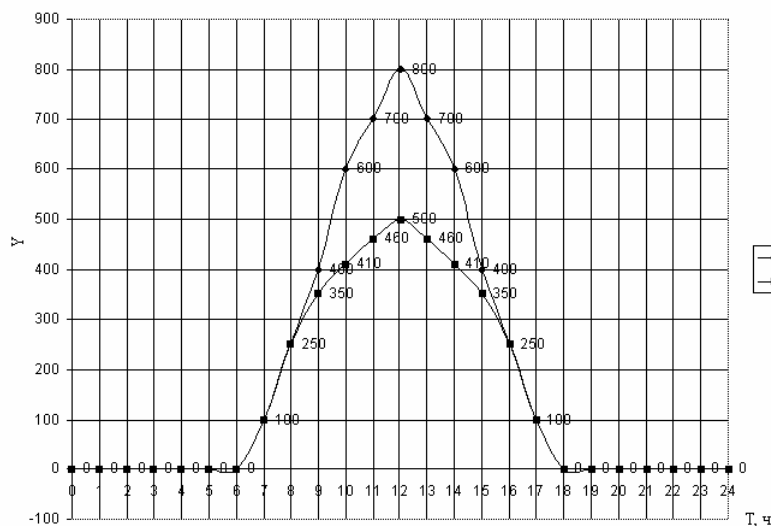


Рис. 3. Плотность потока солнечного излучения

Если решать задачу только в течение одних суток, то необходимо знать начальное распределение температуры в каждой точке полупространства. Такую информацию получить невозможно, поэтому для получения искомого суточных распределений температуры необходимо проводить итерационную процедуру по решению задачи в течение нескольких суток до тех пор, пока распределения температур в один и тот же момент в различные сутки будут одинаковы.

Аналитическое решение этой задачи получить невозможно, поэтому задача решается численным методом (методом конечных разностей) [2]. Используется равномерная

сетка по времени и неравномерная сетка по координатам R и Z . Учитывая принцип местного влияния, задача решается в ограниченном цилиндре, а не в полупространстве. Радиус и глубина области решения выбираются так, чтобы распределение температур на границах было бы такое же, как если бы в области отсутствовал объект. В расчетах принимается радиус области, равный 1,1 м, и глубина, равная 0,8 м.

В качестве грунта выбран песок, имеющий следующие теплофизические свойства: теплопроводность – 0,5 Вт/(м К); плотность – 1500 кг/м³; удельная теплоемкость – 900 Дж/(кг К). Оболочка объекта изготовлена из стали: теплопроводность – 40 Вт/(м К); плотность – 7800 кг/м³; удельная теплоемкость – 430 Дж/(кг К). Вещество имеет следующие теплофизические свойства: теплопроводность – 0,5 Вт/(м К); плотность – 1200 кг/м³; удельная теплоемкость – 1500 Дж/(кг К). В расчетах варьировались следующие параметры:

- толщина слоя песка над объектом (5; 10; 15 см);
- суточная плотность потока солнечного излучения (см. рис. 3);
- суточная зависимость температуры воздуха (см. рис.2).

В результате численного решения получены значения разницы температур поверхности между точкой над центром объекта ($R=0$) и точкой на наибольшем удалении от оси ($R=1,1$ м) для различных вариантов исходных данных в 12 часов дня, сведенные в таблицу 1.

Глубина слоя, см	$q_{\max}=500 \text{ Вт/м}^2$ $T_{\text{ср}}$ от 20 до 30°C	$q_{\max}=800 \text{ Вт/м}^2$ $T_{\text{ср}}$ от 20 до 30°C	$q_{\max}=800 \text{ Вт/м}^2$ $T_{\text{ср}}$ от 15 до 35 °C
5	0,19	0,28	0,28
10	0,04	0,04	0,08 (15час)
15	0	0	0.02 (15 час)

Таблица 1. Разница температур поверхности, К

На рис. 4. приведены для варианта расчета при $q_{\max}=500 \text{ Вт/м}^2$ и суточного перепада температур воздуха от 20 до 30 °C в зависимости от времени суток разницы температур поверхности:

- между точкой над центром объекта ($R=0$) и точкой на наибольшем удалении от оси ($R=1,1$ м)
- между точкой над краем объекта ($R=0,16$ м) и точкой на наибольшем удалении от оси ($R=1,1$ м).

В таблице 2 для этого же варианта расчета приведены значения температуры на поверхности в центральной ($R=0$) и крайней ($R=1,1$ м) точках.

час	центр	край	перепад
6	23,86	23,79	0,07
7	27,41	27,37	0,04
8	35,11	35,11	0
9	42,75	42,81	-0,06
10	48,88	48,99	-0,11
11	54,07	54,23	-0,16
12	58,61	58,8	-0,19
13	60,13	60,32	-0,19
14	59,71	59,89	-0,18
15	58,11	58,26	-0,15

16	54,14	54,25	-0,11
17	46,81	46,86	-0,05
18	39,43	39,42	0,01
19	35,54	35,47	0,07
20	33,32	33,23	0,09

Таблица 2. Температура на поверхности в точках при наибольшей плотности солнечного излучения 500 Вт/м². Глубина 5 см, температура среды изменяется от 20 до 30 С°

Как следует из проведенных предварительных расчетов, объект, расположенный в грунте, может вызывать отклонение от равномерности температурного поля последнего. Это отклонение может достигать нескольких десятых долей градусов Кельвина и зависит от многих факторов. В связи с этим необходимо провести дальнейшие исследования с уточненными исходными данными об объекте, грунте, интенсивности солнечного излучения, изменении температуры воздушной среды, глубине залегания объекта. Кроме того, необходимо создать более строгую (с меньшим числом допущений и ограничений) тепловую модель процесса.

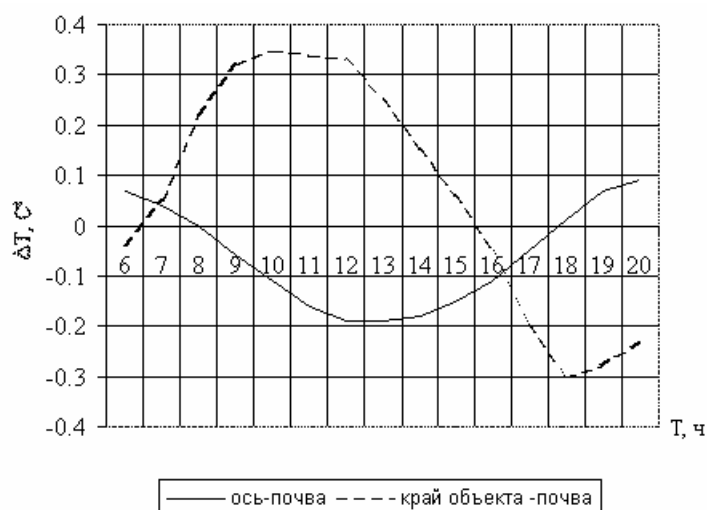


Рис. 4. Перепады при солнечном потоке 500 Вт/м², заглублении объекта на 5 см при температуре среды, изменяющейся от 20 до 30 С°

Литература

1. Варенышев Б.В. и др. Военно-инженерная подготовка / Учебник. М.: Военное издательство МО СССР. 1982.
2. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. М.: Высш. шк., 1990. 207с.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача / Учебник для вузов. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

РАСЧЕТ БЛОКОВ ПИТАНИЯ СУДОВОЙ АППАРАТУРЫ

В.И. Егоров, К.В. Трушков, А.В. Шарков

В статье рассмотрена методика расчета тепловых режимов многоэтажных приборов питания судовой аппаратуры, характеризующихся большими мощностями тепловыделений и имеющих радиаторы на задних стенках.

Введение

По мере усложнения электронной аппаратуры кораблей требуются все большие мощности питания, что, в свою очередь, приводит к повышению тепловой нагрузки на приборы питания. При этом корабельные блоки питания (БП) представляют собой изделия, к которым предъявляются высокие требования по влагозащищенности, что делает особо актуальной проблему съема тепла. При высоком КПД и хорошем отводе тепла от тепловыделяющих элементов существующая элементная база позволяет создавать БП с высокими ресурсными характеристиками, тогда как ухудшение теплового режима работы элементной базы приведет к резкому снижению этих характеристик.

Существующее программное обеспечение для расчета тепловых режимов электронной аппаратуры предназначено для конструкций, у которых печатные узлы, модули и кассеты ориентированы вертикально [1]. Предполагалось, что температура корпуса модуля равномерна. В новых перспективных конструкциях в качестве стенки модуля используется ребристый радиатор, выходящий наружу прибора, поэтому актуальна задача определения тепловых режимов БП, модули которых имеют стенки различных конструкций, а их корпус не обладает равномерным температурным полем.

В данной работе рассматриваются герметичные многоэтажные приборы питания (рис. 1), представляющие собой расположенные друг над другом БП, особенностью которых является наличие радиаторов, на которые монтируются теплонагруженные элементы. Радиаторы выведены сквозь корпус блока в окружающую среду. Межэтажные перегородки не позволяют воздуху перетекать с этажа на этаж.

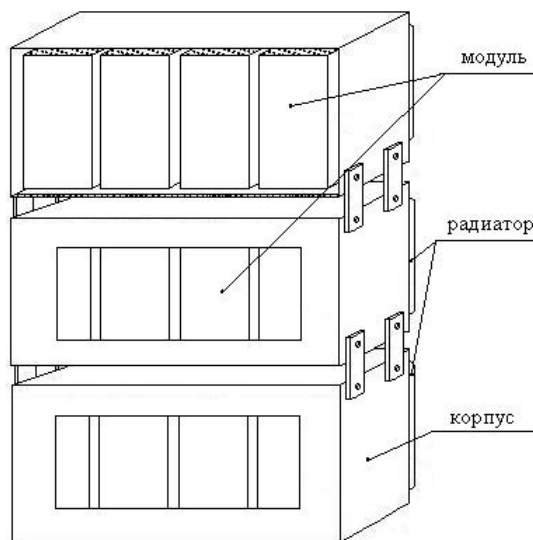


Рис. 1 Прибор питания

Прибор состоит из герметичных модулей, вводимых внутрь корпуса по направляющим, причем между модулями практически не остается свободного пространства. Данный вид монтажа не позволяет рассчитывать тепловые режимы приборов такого

класса по методикам, созданным для аппаратов кассетной конструкции, ввиду того, что отсутствуют ярко выраженные каналы для воздушной конвекции.

Предлагаемое решение данной задачи основывается на допущении, что конвекция внутри прибора не вносит существенный вклад в теплообмен, а отвод тепла с элементов, не контактирующих с радиатором, осуществляется лишь путем теплового излучения стенок модуля на корпус блока. Теплоотдача с корпуса блока в окружающую среду идет за счет естественной конвекции и теплового излучения.

Взаимный подогрев блоков учитывается путем суммирования лучистой и конвективной проводимостей между верхними и нижними стенками корпусов блоков.

Основные допущения

- кондуктивные тепловые связи модулей с корпусом отсутствуют;
- переток тепла с корпуса модуля на радиатор осуществляется только за счет излучения;
- корпус блока и модуля имеет равномерное температурное поле;
- электро-радиоэлементы, расположенные на внутренних стенках модуля, имеют небольшие размеры и тем самым не препятствуют тепловому излучению от внутренней стенки радиатора к стенкам модуля;
- радиатор имеет равномерное температурное поле;
- отток тепла с корпуса прибора по элементам конструкции и подводящим кабелям отсутствует;
- тепловая связь радиатора с корпусом блока пренебрежимо мала.

Математическая постановка задачи

Рассмотрим эквивалентную схему тепловых связей внутри и снаружи блока, изображенную на рис. 2.

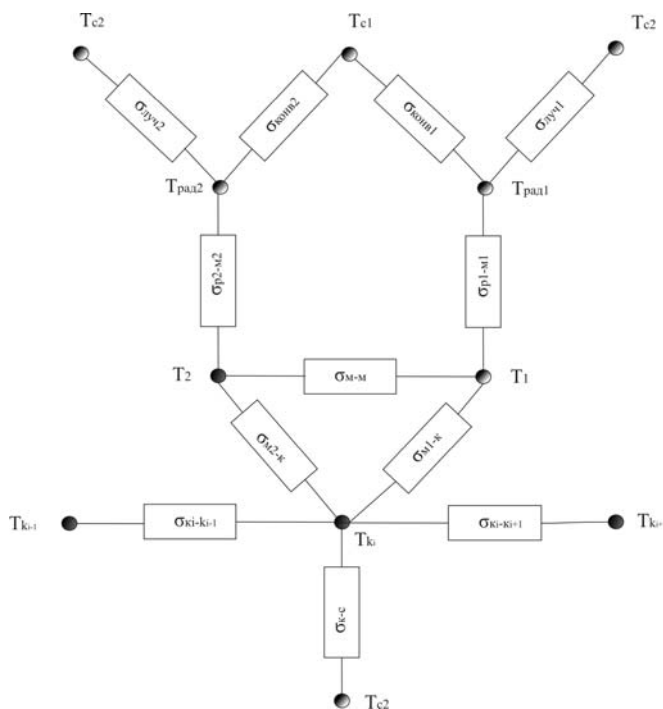


Рис. 2. Тепловая схема блока питания

На данной схеме рассматриваются два расположенных рядом модуля, имеющих среднеповерхностные температуры стенок корпуса t_1 и t_2 , соответственно. Радиатор первого модуля имеет температуру t_{rad1} , второго – t_{rad2} . Среднеповерхностная температура корпуса блока обозначается t_k . Воздух, с которым происходит лучистый теплообмен радиатора модуля, имеет температуру t_{c2} ; воздух, входящий в радиатор с нижележащего этажа, нагревается и имеет температуру t_{c1} . Теплообмен корпуса блока происходит с воздухом, нагретым до t_{c2} , и с корпусами ниже- и вышележащих блоков.

Конструктивной особенностью рассматриваемого модуля, показанного на рис. 3, является то, что тепловыделяющие элементы, расположенные на радиаторе, отделены от внутреннего объема модуля печатной платой для уменьшения оттока тепла внутрь прибора.

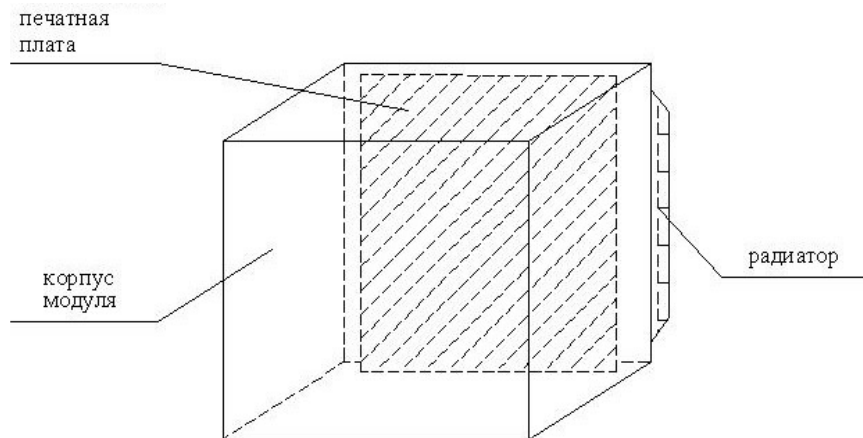


Рис. 3. Схематичное изображение модуля

Определение тепловых проводимостей

Все тепловые проводимости определяются из соотношения (1):

$$\sigma_i = \alpha_i \cdot S_i, \quad (1)$$

где α_i – соответствующий коэффициент теплоотдачи, S_i – площадь теплоотдающей поверхности.

Лучистый коэффициент теплоотдачи корпус–среда вычисляется следующим образом:

$$\alpha_{k-c} = \alpha_l + \alpha_k, \quad \alpha_l = 5.67 \cdot 10^{-8} \varepsilon \frac{T_k^4 - T_c^4}{t_k - t_c},$$

где ε – коэффициент черноты корпуса, T_k , T_c , t_k , t_c – температуры корпуса и среды в [K] и [°C] соответственно.

Конвективный коэффициент теплоотдачи от корпуса блока в окружающую среду определяется из [2]:

$$\alpha_k = (1.42 - 0.0014t_m) \sqrt[4]{\frac{t_k - t_{cp}}{L_y}}$$

при $(t - t_{cp}) < (840 / (L_y \cdot 10^3))^3$. При невыполнении этого условия

$\alpha_k = (1.67 - 0.0036t_m) \sqrt[3]{(t_k - t_{cp})}$, причем $t_m = \frac{t_k + t_c}{2}$, а L_y – глубина корпуса блока.

Лучистый коэффициент теплоотдачи между корпусом модуля и корпусом блока определяется из выражения (2):

$$\alpha_{m-k} = 5.67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{np} \frac{T_m^4 - T_k^4}{t_m - t_k}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_m} + \frac{1}{\varepsilon_k} - 1}$ - приведенный коэффициент черноты, ε_m - коэффициент черноты

внешней поверхности корпуса модуля, ε_k - коэффициент черноты внутренней поверхности корпуса блока.

Коэффициент лучистого теплообмена между модулями определяется аналогично коэффициенту теплообмена модуль-корпус из формулы (2), куда вместо температур модуля и корпуса следует подставлять температуры рядом стоящих модулей t_1 и t_2 .

Проводимость радиатор-модуль определяется следующим образом:

$$\sigma_{p-m} = \left(\frac{1}{\alpha_{л1} S} + \frac{\delta}{\lambda_m S} + \frac{1}{\alpha_{л2} S} \right)^{-1},$$

где $\alpha_{л1}$ и $\alpha_{л2}$ - лучистые коэффициенты теплоотдачи задняя панель радиатора - текстолитовая печатная плата и плата - стенки модуля, соответственно, S - площадь поверхности задней панели радиатора, δ и λ_m - толщина и коэффициент теплопроводности текстолитовой платы.

Конвективная тепловая связь радиатора с внешней средой определяется тепловой проводимостью [2]:

$$\sigma_{p-k} = N \cdot \lambda \cdot f \cdot b \cdot th(b \cdot h'),$$

где $b^2 = \alpha \cdot U / (\lambda \cdot f)$, $h' = h + \frac{f}{U}$, U - периметр сечения ребра, h - высота ребра, f - площадь сечения ребра, N - количество ребер, λ - коэффициент теплопроводности ребра, α - конвективный коэффициент теплоотдачи от ребер радиатора, который находится из выражения $\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_g}{s'}$.

Безразмерный критерий Нуссельта для одиночного ребра радиатора равен $Nu = 0.112 \left(\frac{s' \cdot Ra}{L} \right)^{0.534} \cdot \left[1 - \exp \left(-129 \frac{s' \cdot Ra}{L} \right) \right]^{0.284}$, критерий Релея $Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \theta \cdot (s')^3 \cdot Pr}{\nu^2}$, где Pr - критерий Прандтля для воздуха, β - коэффициент объемного расширения воздуха, θ - перепад температур между радиатором и средой, s' - шаг оребрения радиатора (расстояние между ребрами), ν - коэффициент кинематической вязкости воздуха, L - высота радиатора, g - ускорение свободного падения. Лучистая связь радиатора со средой определяется проводимостью

$$\sigma_{p-l} = \alpha_{p-l} \cdot S_{луч},$$

где $S_{луч}$ - площадь излучающей поверхности радиатора;

$$S_{луч} = 2hL + N \cdot b(L + 2h) + \left[(N-1) \frac{L1-b \cdot N}{N-1} \cdot L + 2(N-1)hL \right] \cdot \frac{\frac{L1-b \cdot N}{N-1}}{\frac{L1-b \cdot N}{N-1} + 2h}.$$

Здесь h - высота ребра, $L1$ - ширина радиатора, b - толщина ребра. Проводимость между корпусами соседних блоков рассчитывается в зависимости от величины зазора между этажами и температур верхних и нижних стенок корпуса этажей.

Лучистый коэффициент теплопередачи между стенками этажей рассчитывается следующим образом:

$$\alpha_{\kappa-\kappa} = 5.67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{np} \cdot \varphi \cdot \frac{T_{k_i}^4 - T_{\kappa_i+1}^4}{t_{k_i} - t_{i+1}},$$

где t_{k_i} – температура верхней стенки i -го этажа, t_{k_i+1} – температура нижней стенки $(i+1)$ -го этажа, ε_{np} – приведенный коэффициент черноты корпуса блока, φ – коэффициент взаимной облученности соседних этажей, определяемый как

$$\varphi = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\frac{\sqrt{a^2 + h^2} \cdot \arctg \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}}}{a} + \frac{\sqrt{b^2 + h^2} \cdot \arctg \frac{a}{\sqrt{b^2 + h^2}}}{b} - \frac{h \cdot \arctg \frac{b}{h}}{a} - \frac{h \cdot \arctg \frac{a}{h}}{b} + \frac{h^2 \cdot \ln \frac{(a^2 + h^2) \cdot (b^2 + h^2)}{(a^2 + b^2 + h^2) \cdot h^2}}{2 \cdot a \cdot b} \right],$$

a и b – ширина и глубина корпуса этажа, h – величина зазора между этажами..

Если верхняя грань корпуса i -го этажа горячее нижней грани корпуса $(i+1)$ -го, определяется критерий Релея для воздушного зазора между этажами:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (t_{k_i} - t_{k_i+1}) \cdot h^3 \cdot Pr}{\nu^2}.$$

а) $Ra > 1000$, конвекция в зазоре есть. Определяется коэффициент конвекции в зазоре ε_k и эквивалентная теплопроводность зазора $\lambda_{\text{экв}}$: $\varepsilon_k = 0.18 \cdot Ra^{0.25}$, $\lambda_{\text{экв}} = \varepsilon_k \cdot \lambda_{\text{возд}}$. Суммарная проводимость через воздушный зазор σ_3 находится как

$$\sigma_3 = \left(\alpha_{\kappa-\kappa} + \frac{\lambda_{\text{экв}}}{h} \right) \cdot a \cdot b.$$

б) $Ra < 1000$, конвекция в зазоре отсутствует. Суммарная проводимость через воздушный зазор $\sigma_3 = \left(\alpha_{\kappa-\kappa} + \frac{\lambda_{\text{возд}}}{h} \right) \cdot a \cdot b$.

Если верхняя грань корпуса i -го этажа холоднее нижней грани корпуса $(i+1)$ -го этажа, проводимость между этажами определяется в соответствии с б).

Последовательность расчета

Для определения температур составных частей прибора решается система нелинейных уравнений (3):

для первого модуля:

$$P_1 = (t_1 - t_2) \cdot \sigma_{m_1-m_2} + (t_1 - t_{p_1}) \cdot \sigma_{m_1-p_1} + (t_1 - t_{\kappa}) \cdot \sigma_{m_1-\kappa}$$

для средних модулей:

$$P_i = (t_i - t_{i-1}) \cdot \sigma_{m_i-m_{i-1}} + (t_i - t_{i+1}) \cdot \sigma_{m_i-m_{i+1}} + (t_i - t_{p_i}) \cdot \sigma_{m_i-p_i} + (t_i - t_{\kappa}) \cdot \sigma_{m_i-\kappa}$$

для последнего модуля:

$$P_N = (t_N - t_{N-1}) \cdot \sigma_{m_N-m_{N-1}} + (t_N - t_{p_N}) \cdot \sigma_{m_N-p_N} + (t_N - t_{\kappa}) \cdot \sigma_{m_N-\kappa}$$

$$\sum_{i=1}^N (t_i - t_{k_j}) \cdot \sigma_{m_i-k} = (t_{k_j} - t_{c2}) \cdot \sigma_{k-c} + (t_{k_j} - t_{k_{j-1}}) \cdot \sigma_{k_j-k_{j-1}} + (t_{k_j} - t_{k_{j+1}}) \cdot \sigma_{k_j-k_{j+1}}$$

для радиаторов:

$$(t_{p_1} - t_{m_i}) \cdot \sigma_{m_i-p_i} + (t_{p_i} - t_{c_1}) \cdot \sigma_{p_k} + (t_{p_i} - t_{c_2}) \cdot \sigma_{p_l} = P_{p_i}.$$

Для первоначального расчета примем, что 60 % мощности тепловыделений модуля уходит через радиатор (в системе уравнений она обозначена как P_{p_i}), а остальные 40 %- внутрь блока. После каждой итерации значения мощности, рассеиваемой радиа-

тором, равно и проводимости внутри и снаружи блока пересчитываются исходя из найденных температур. Тепловой поток с внешней поверхности радиатора определяется как $P_p = (t_p - t_{c1}) \cdot \sigma_{p_k} + (t_p - t_{c2}) \cdot \sigma_{p_l}$.

Омывающий радиаторы i -го этажа воздух имеет температуру [3]

$$t_{c1} = 0.7 \cdot \sum_{j=1}^Z t_{p_j} / Z, \text{ где } Z - \text{количество радиаторов на нижележащем } (i-1)\text{-м этаже.}$$

Матрица системы уравнений (3), решаемая методом последовательного исключения Гаусса, представлена в таблице 1 для случая двух модулей в блоке.

	радиатор1	радиатор 2	модуль 1	модуль 2	корпус	среда t_{c2}	среда t_{c1}
радиатор1	-	-	$\sigma_{m_1-p_1}$	-	-	σ_{p1_l}	σ_{p1_k}
радиатор2	-	-	-	$\sigma_{m_2-p_2}$	-	σ_{p2_l}	σ_{p2_k}
модуль 1	$\sigma_{m_1-p_1}$	-	-	$\sigma_{m_1-m_2}$	σ_{m_1-k}	-	-
модуль 2	-	$\sigma_{m_2-p_2}$	$\sigma_{m_1-m_2}$	-	σ_{m_2-k}	-	-
корпус	-	-	σ_{m_1-k}	σ_{m_2-k}	-	σ_{k-c}	-

Таблица 1. Матрица системы уравнений

Пересчет значений искомых температур продолжается до тех пор, пока расхождение значений, найденных на предыдущей и последующей итерациях, не достигнет заданной величины точности расчета.

Результаты расчета и сравнение их с экспериментальными данными

Для расчета зададимся следующими исходными данными: одноэтажный прибор питания имеет высоту 0.35 м, ширину 0.5 м и глубину 0.25 м. Коэффициент черноты корпуса и модулей 0.9. В приборе расположены два модуля с мощностью тепловыделений 88 Вт каждый. Высота модулей 0.28 м, ширина 0.2 м, глубина 0.19 м. Окружающая среда имеет температуру 24,4 °С. Вследствие симметричности тепловыделений и условий теплообмена температуры модулей одинаковы.

Результаты расчета и эксперимента сведены в таблицу 2.

	Температура расчетная, °С	Температура экспериментальная, °С	Перегрев расчетный, °С	Перегрев экспериментальный, °С	Относительная погрешность расчета, %
Радиатор	70.4	70.1	46	45.7	0.7
Стенки модуля	69.4	67.5	45	43.1	4.4
Корпус блока	42.8	43	18.4	18.2	0.6

Таблица 2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Заключение

Сравнение экспериментальных данных и значений, полученных путем расчета, показывает достаточно высокую точность определения температур составных частей прибора. Хорошее совпадение расчета с экспериментом также демонстрирует обоснованность допущений о незначительном влиянии на теплообмен конвекции внутри при-

бора. Таким образом, предложенная авторами методика расчета тепловых режимов приборов питания может использоваться на стадии проектирования для предотвращения при дальнейшей эксплуатации избыточных перегревов составных частей приборов.

В дальнейшем на базе полученных расчетных значений будут разрабатываться методики расчета температур электрорадиоэлементов, расположенных внутри модулей.

Литература

1. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. / М.: Радио и связь, 1990. 312 с.
2. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в РЭА М.: Высшая школа, 1984. 247с.
3. Быченко М.В. Теплоотдача радиаторов в канале / Магистерская диссертация. СПб ГУИТМО, 2005. 62 с.

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ МИКРОСБОРОК

Г.В. Бирюлин, В.И. Егоров, Ю.Ю. Попов, Л.А. Савинцева

К разрабатываемым объектам электронной аппаратуры предъявляются разнообразные требования, среди которых важную роль играют точность, надежность и стабильность их работы. Круг задач, решаемых электронными устройствами (ЭУ), предполагает их использование в широком интервале тепловых воздействий.

К числу основных факторов, дестабилизирующих оптимальные режимы функционирования ЭУ и приводящих к отклонению выходных характеристик от номинальных значений, относятся различного рода тепловые воздействия: температура окружающей среды, внешние тепловые потоки, мощность внутренних источников энергии. Характерной особенностью ЭУ является превращение значительной части (до 10%) подводимой энергии в тепловую. Выделяющаяся тепловая энергия приводит к повышению температуры элементов и уменьшению их надежности, к искажению полезного сигнала или даже выходу устройства из строя.

Повышение температуры с 20°C до 80°C приводит к увеличению интенсивности отказов полупроводниковых приборов в 3–4 раза, резисторов в 2–3 раза, конденсаторов в 6–8 раз, интегральных микросхем в 6–10 раз [3].

При создании современных микроэлектронных устройств, характеризующихся высокой локальной удельной плотностью мощности, необходимо учитывать теплофизические процессы. Поэтому при создании современной аппаратуры необходима тщательная проработка конструкции, которая обеспечивает рациональную компоновку узлов, нужную интенсивность теплообмена и возможность термостабилизации деталей, элементов и узлов изделия, наиболее чувствительных к температуре. В задачу конструктора входит определение и конкретизация метода обеспечения требуемого теплового режима прибора, выбор необходимых материалов. На разных этапах конструирования требуется расчетным путем оценивать эффективность выбранных мер, а также производить экспериментальные исследования и климатические испытания с измерением фактического нагрева деталей.

Рассмотрим тепловой режим микросборки (МСБ), схематично изображенной на рис. 1. Корпус МСБ изготовлен из ковара и имеет размеры $60 \times 40 \times 5$ мм. На основание корпуса толщиной 1,2 мм приклеивается подложка из поликора (углепластика) толщиной 0,8 мм. На подложке устанавливаются функциональные элементы, наиболее тепловыделяющими из которых являются транзисторы размером основания 2×3 мм. Необходимо рассчитать стационарный тепловой режим МСБ. Для решения этой задачи была разработана методика расчетов, учитывающая взаимное влияние элементов МСБ и условия ее теплообмена с воздушной окружающей средой при свободной и вынужденной конвекции.

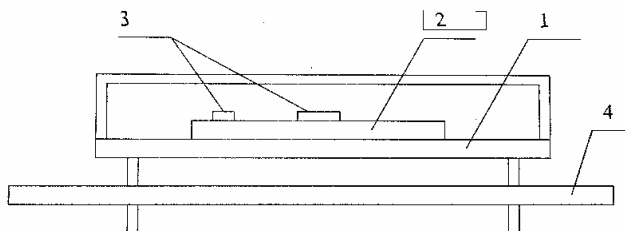


Рис.1. Схематичное изображение микросборки: 1-основание микросборки, 2 – подложка, 3 – транзисторы, 4 – печатная плата.

На рис. 2 представлены результаты расчетов распределения температуры от центра к периферии в подложке из различных материалов для одиночного транзистора, расположенного в центре подложки, при мощности его тепловыделений 4 Вт и пере-

грев площадки под транзистором при использовании подложки из высокотеплопроводного материала, например, углепластика (теплопроводность 500 Вт/м К).

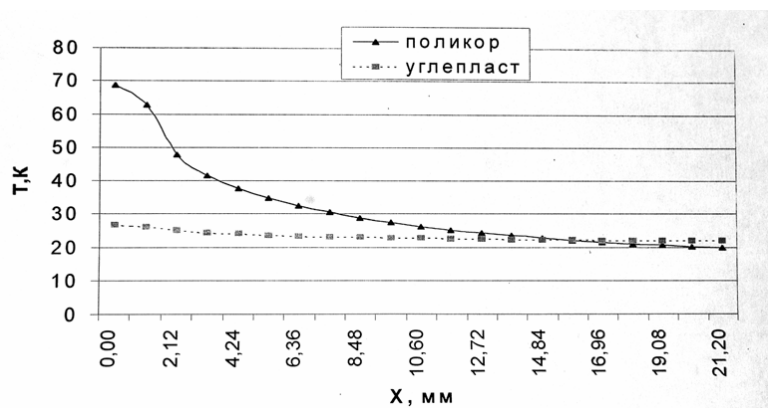


Рис.2. Распределение температуры от центра к периферии в подложках из различных материалов при мощности 4 Вт и обдуве воздухом со скоростью 5 м/с при температуре среды 0°C.

Рассмотрим другой вариант расположения источников на подложке (источники расположены в углу на расстоянии 3 и 9 мм от углов подложки) (рис. 3). Всего на подложке расположено 4 источника по 1Вт. Общая мощность тепловыделений в МСБ – 4 Вт. В таблице 1 приведены результаты расчета температур в точках подложки при температуре среды 0°C. Места расположения расчетных точек: 1 – центр источника, 2 – угол подложки, 3 – центр подложки. Корпус МСБ обдувается воздухом, имеющим температуру 0°C, со скоростью 5 м/с. Результаты расчетов показывают, что наибольший перепад температур на поликоровой подложке составляет 14,8 К, а на углепластиковой – 5,1 К. Эти перепады меньше, чем при размещении транзистора в центре подложки.

№ точки	Поликор	Углепластик
1	42,6	35,1
2	32,6	31,9
3	27,8	30

Таблица 1. Результаты расчета температур в точках подложки

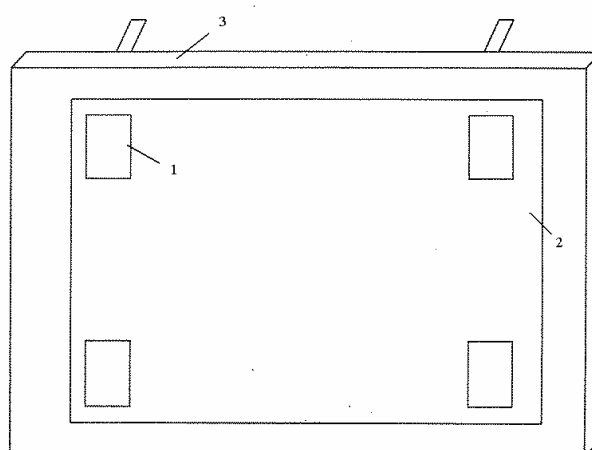


Рис. 3. Размещение источников теплоты на подложке (микросборка со снятой крышкой): 1-транзистор, 2 – подложка, 3 – корпус

Расчеты проводились по программе, реализующей трехмерную конечно-разностную локально-одномерную схему для составных тел. Применение высокотеплопроводного материала подложки позволяет существенно снизить перегрев тепловы-

деляющих элементов. Одним из таких новых конструкционных материалов является высокотеплопроводный углепластик. В проблемной лаборатории был разработан метод и создана установка для измерения теплопроводности листовых высокотеплопроводных материалов. Результаты измерений показали, что теплопроводность вдоль волокон таких материалов может достигать до 550 Вт/мК. Следует отметить, что такие материалы также могут с успехом быть использованы в кондуктивных системах охлаждения. Разработанная программа позволяет учитывать неравномерность расположения источников, анизотропию свойств, различные граничные условия [1, 2].

Литература

1. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. М.: Высш. шк., 1990. 207 с.
2. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312с.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов М.:Энергоиздат, 1981. 416 с.

ВЫЯВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ХАОТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДЫХАНИИ

Г.Н. Лукьянов, А.А. Рассадина

Введение

При диагностике заболеваний дыхания большое значение имеет оценка флуктуаций скорости воздушного потока, давления и температуры. Диагностирование этих параметров осуществляется в специальных трубках, подводимых к дыхательной системе, что приводит к значительному усреднению исходных данных. Диагностирование по таким усредненным параметрам является необъективным и требует большого опыта и высокой квалификации врача. Поэтому улучшение современных диагностических возможностей осуществляется на основе наблюдения за потоками воздуха непосредственно внутри дыхательной системы без использования дополнительных трубок [1].

Анализ флуктуаций температуры, скорости воздушного потока и давления внутри полостей носа человека, при наличии периодичности процессов дыхания, позволил определить значительную долю хаотичности в этих процессах [1]. Перед нами детерминированный хаотический процесс, идентификация которого может быть осуществлена методами нелинейной динамики и спектрального анализа.

В обзоре представлено исследование хаотических закономерностей процессов дыхания при диагностике и лечении некоторых заболеваний носа.

Метод

Метод заключается в реконструкции трехмерной фазовой траектории наблюдаемых флуктуаций скорости воздушного потока в трехмерном фазовом пространстве [2], построении для фазовых траекторий сечения Пуанкаре [2], которое дает дополнительную информацию о характеристиках процесса дыхания. Преобразование, приводящее точку при построении сечения Пуанкаре в следующую, является непрерывным отображением плоскости выбранного сечения на себя и определяется: как

$$P_{k+1} = T(P_k) = T(T(P_{k-1})) = T^2(P_{k-1}) = \dots, \quad (1)$$

где точка P_{k-1} однозначно определяет точку P_k , которая, в свою очередь, определяет P_{k+1} , и т. д.

Спектральный анализ [3] также является неотъемлемой частью предложенного метода, так как позволяет выявить основные частоты колебательного процесса. Зависимость наблюдаемого процесса x от частоты определяют через преобразование Фурье:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (2)$$

Тогда спектральную плотность мощности (СПМ) можно определить как отношение

$$S_{xx}(\omega) = |X(\omega)|^2. \quad (3)$$

По графику СПМ и по величине скорости воздушного потока можно определить длину распространяющейся при дыхании волны по формуле

$$\lambda = V \cdot t, \quad t = \frac{1}{f}. \quad (4)$$

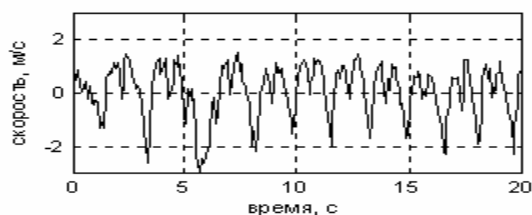
Здесь λ – длина волны, V – скорость, t – время, f – частота пика на графике.

Реализация

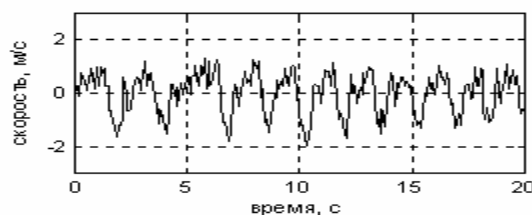
Рассмотрим характер флуктуаций скорости воздушного потока больного, прошедшего остеопатическое лечение, до и после лечебных процедур (рис. 1). Видно, что при дыхании на периодический процесс накладывается некоторая хаотическая составляющая. Внешний вид графиков флуктуаций скорости до и после лечения различается мало, что затрудняет суждение о положительном или отрицательном эффекте лечебного воздействия.

До лечения

Левая полость

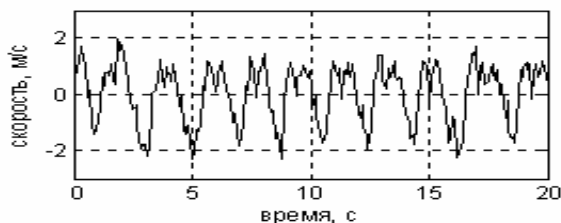


Правая полость



После лечения

Левая полость



Правая полость

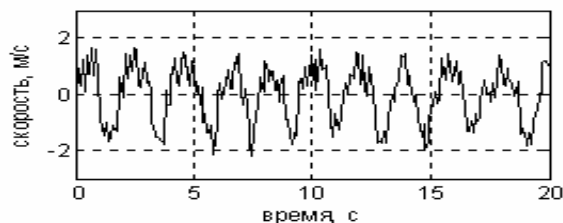
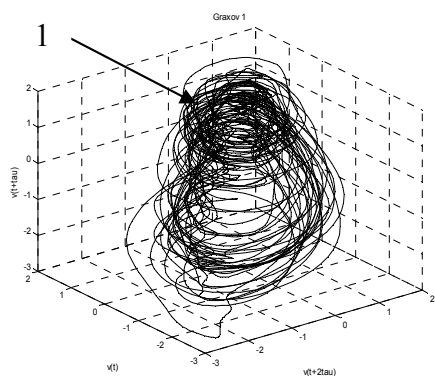


Рис. 1. Флуктуации скорости воздуха при дыхании больного до и после лечения

Для флуктуаций скорости до и после лечения в левой полости носа методом задержек Такенса реконструируем фазовое пространство (рис. 2). После лечения уровень колебаний в верхней области графика несколько уменьшился (область 1 рис. 2). Эта область соответствует хаотической составляющей колебаний рис. 1.

До лечения



После лечения

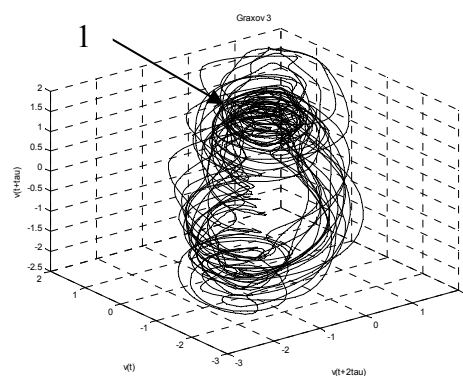


Рис. 2. Реконструированное фазовое пространство для больного, прошедшего остеопатическое лечение

Проведем анализ полученных графиков через сечение Пуанкаре (рис. 3). Видно, что после лечения сечение Пуанкаре напоминает сечение тора, по которому можно идентифицировать квазипериодический режим. Более хаотическая структура сечения Пуанкаре до лечения, говорит об аperiодическом (т. е. хаотическом) режиме.

До лечения

После лечения

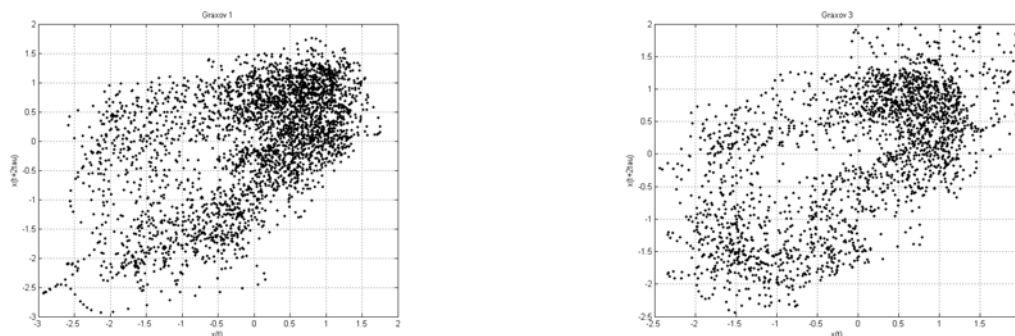


Рис. 3. Сечение Пуанкаре

Для графиков флуктуации скорости были построены СПМ (рис. 4) и проведен их анализ.

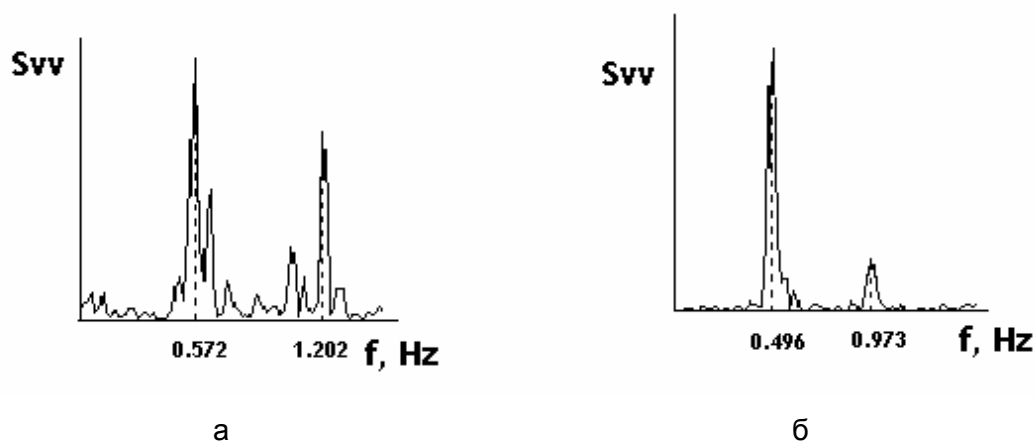


Рис. 4. Спектральная плотность мощности для скорости воздушного потока в левой полости носа до (а) и после (б) лечения

Было замечено, что у здорового человека наблюдаются два основных пика СПМ. Первый пик соответствует колебаниям, лежащим на низкой частоте. Эта частота определяет общий период колебаний воздуха при дыхании, т.е. цикл вдох-выдох. Второй, меньший по величине пик, соответствует дополнительным колебаниям воздуха при вдохе и при выдохе и также относится к функционированию легких. При заболеваниях дыхательной системы график СПМ усложняется и выглядит, как показано на рис. 4а.

Согласно средней частоте этих пиков и соответствующей им скорости 2 м/с, по формуле (4) оценена длина волны наблюдаемых колебаний. Величина ее оказалась порядка 1 м, что в принципе может соответствовать пути воздуха до легких и из легких в нос. Так как примерно в этой области наблюдаются сразу несколько пиков, то можно предположить, что общий ритм дыхания сбивается, так как в легкие поступает недостаточно воздуха. Второму по высоте пику соответствует скорость 0,5 м/с (колебания на гребне волны флуктуаций скорости рис. 1), следовательно, длина волны будет порядка 0,5 м – путь воздуха до легких. Воздуха может не хватать, так как возникающий вихревой шлейф при огибании дополнительных препятствий в носу (например, гребни и шипы) затрудняет движение воздуха.

Общая частота колебаний цикла вдох–выдох, согласно рис. 4, после лечения составляет около 0,5 Гц. Однако до лечения первый максимальный пик СПМ лежал на частоте около 0,57 Гц. Так как после лечения частота наблюдения первого максимума СПМ уменьшилась, можно предположить, что дыхание стало более легким, легкие быстрее насыщаются воздухом.

Отношение частот f_1/f_2 иррационально и стремится к двум. Так как это соотношение иррационально, перед нами квазипериодический процесс, для которого выполняется переход к хаосу по сценарию Рюэля – Такенса [2]. Согласно этой теории, как только в спектре появляется третья частота, возникает характерная для хаоса широкополосная шумовая компонента, что мы и наблюдаем на рис. 4а.

Заметим, что при риноскопии (осмотре оториноларинголога) у больного было диагностировано наличие S-образного искривления.

Так как остеопатическое воздействие предполагает изменение положения костей черепа, что позволяет выпрямлять искривленные перегородки, то можно предположить удачное выпрямление. По СПМ после лечения видно исчезновение дополнительных, обусловленных искривлением перегородки резонансов.

Заключение

Современное диагностирование заболеваний дыхательной системы может быть осуществлено по анализу состояния хаотических инвариант дыхания, например скорости воздушного потока.

Метод заключается в реконструкции фазовой траектории наблюдаемых флуктуаций скорости воздушного потока в трехмерном фазовом пространстве [2], построении сечения Пуанкаре [2] и СПМ [3]. По графикам сечения Пуанкаре и СПМ видно, что возникающие внутри полостей носа дополнительные препятствия приводят к хаотизации, а, следовательно, затруднению дыхания.

Предложенный метод более полно отражает состояние диагностируемой дыхательной системы, так как позволяет полностью учитывать всю получаемую информацию, не ограничиваясь обработкой сглаженных, усредненных параметров.

Литература

1. G. Lukjanov, A. Rassadina, Comparison and the analysis of the processes of the movement of air through the human breathing system and its natural model. // 2005 International Conference Physics and control Proceedings “PhysCon 2005”, IEEE Catalog Number : 05EX1099C, August 24-26, 2005, St. Petersburg, Russia, p. 872-875
2. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе: о детерминистском подходе к турбулентности. М.: Мир, 1991
3. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. М.: Мир, 1990, 584 с.

АБСОРБЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКРИЛАТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ДВОЙНЫМ НАПОЛНЕНИЕМ

М.В.Успенская, Н.В. Сиротинкин, В.А. Горский

Получены новые влагопоглощающие композиции на основе акрилового полимера с бинарными наполнителями – алюмосиликатными стеклосферами и фуллереном C_{60} . Исследованы сорбционные характеристики гидрогелевых композиций в зависимости от условий синтеза материала.

Введение

Акриловые супервлагоабсорбенты являются широко известным и используемым материалом во многих отраслях промышленности и хозяйства [1–3]. При этом следует заметить, что применение акриловых гидрогелей заметно ограничено существенными недостатками материалов, получаемых на их основе [4,5]. К наиболее значимым недостаткам относятся:

- высокая чувствительность к изменению ионного состава и pH растворов (до 2000 г/г в дистиллированной воде, при переходе к водным растворам солей одновалентных металлов – до 100 г/г в зависимости от условий синтеза и условий хранения образца);
- малая прочность материалов и отсутствие возможности изготовления изделий заданной формы;
- низкая скорость набухания.

Включение в состав сополимеров различных наполнителей резко расширяет потенциальные возможности применения акриловых супервлагоабсорбентов за счет улучшения физико-химических свойств материалов.

Ранее было показано [6], что использование стеклянных аппретированных наполнителей в акрилатных влагоабсорбентах позволяет получать материалы с высокими прочностными характеристиками, а введение фуллеренов в состав композиций увеличивает сорбционные характеристики [7]. Именно поэтому объектами наших исследований явились сшитые полимеры акриловой кислоты с бинарными наполнителями, такими как, алюмосиликатные стеклосферы и фуллерен – C_{60} .

Экспериментальная часть

Композиции на основе акрилатных полимеров и наполнителей: фуллерена (Ф) и алюмосиликатных стеклосфер (СФ) были синтезированы в виде пленок путем радикальной полимеризации в водных средах при температуре 20–60 °С. В качестве инициатора была использована окислительно-восстановительная система: персульфат аммония (ПСА) – тетраметилэтилендиамин, а N,N' – метиленбисакриламид (МБАА) в качестве сшивающего агента. Степень нейтрализации акриловой кислоты (АК) варьировалась в интервале $\alpha=0.0$ –0.9. Полимеризацию проводили при начальной концентрации мономера 10–40 масс.%, концентрации сшивающего агента – 0–0.5 масс.% от массы АК. Характеристика и способы очистки остальных реагентов, а также методики проведения процесса и исследования сорбционных характеристик материалов приведены в работе [8]. Время синтеза композиций в водной среде 0.5–10 ч.

Фуллерен (C_{60}) предоставлен ЗАО «Илип» и вводился в реакционную смесь без предварительного растворения на начальной стадии синтеза при перемешивании. По-

скольку композиция являлась гетерогенной, то определение доли модификатора, не вошедшего в композицию, проводили гравиметрическим методом после набухания композиции в дистиллированной воде в течение 5–7 дней.

СФ были предоставлены ООО «Стекловолокно» (г. Новгород) и представляли собой стеклянные частицы с диаметром 50–200 мкм и плотностью 300 кг/м³.

Обсуждение результатов

Как известно, физико-механические характеристики получаемых материалов зависят от условий синтеза, таких как температуры и времени реакции, концентрации исходных реагентов и инициатора в исходной смеси и т.д. Именно поэтому достаточно важно исследовать влияние вышеуказанных факторов на свойства полученных акриловых гидрогелевых композиций.

В зависимости от соотношения доли сшивающего агента – МБАА, свойства полученных композиционных влагопоглощающих материалов значительно различаются, что и представлено на рис.1.

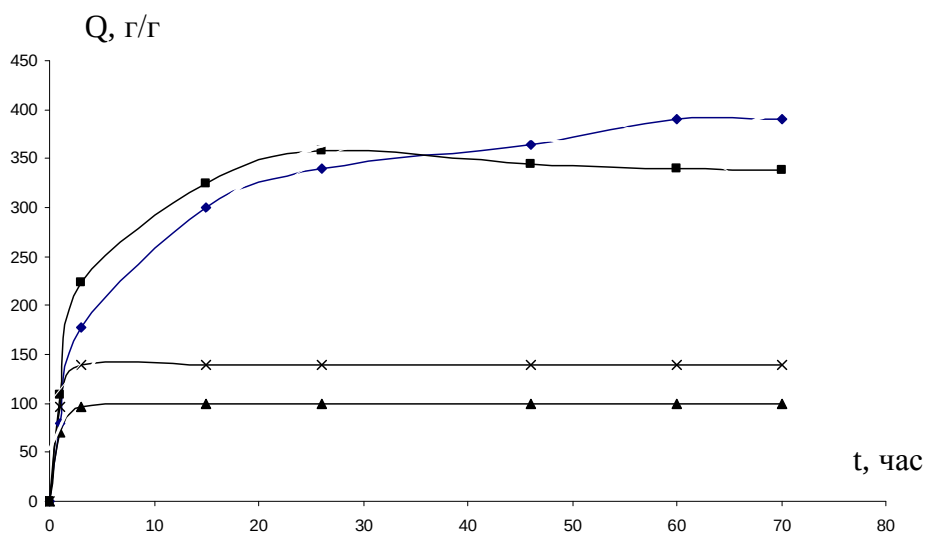


Рис. 1. Зависимость равновесной степени набухания композиций от концентрации сшивающего агента [МБАА] (масс.%) в дистиллированной воде при 18 °С. Условия синтеза композиции следующие: [АК] = 22 масс.%, время синтеза = 1,5 ч, температура реакции = 50 °С, [ПСА] = 2 масс.%, [Ф] = 0.1 масс.%, [СФ] = 10 масс.%, $\alpha = 0.9$. Концентрация МБАА (масс.%) : 1 – 0.2; 2 – 0.1; 3 – 0.3; 4 – 0.5

Из кинетических кривых следует, что при увеличении доли сшивающего агента значение равновесной степени набухания уменьшается. Это связано с уменьшением длины полимерной цепи между узлами сетки, что сказывается на уменьшении вклада эластической составляющей в общее осмотическое давление набухания. Также при увеличении доли сшивающего агента время достижения равновесной степени набухания композиционного материала уменьшается до 1,5–3 часов.

Следует заметить, что полученные материалы обладают повышенной прочностью и сохраняют геометрическую форму в набухом состоянии, в отличие от ненаполненных акрилатных влагоабсорбентов.

При свободном набухании гель не испытывает действия внешних сил, способных ограничить его объем (гидростатические силы к ним не относятся, а поскольку плотность набухшего геля практически совпадает с плотностью среды, то влиянием силы тяжести можно пренебречь). Важнейшим фактором в этом случае является концентрация подвижных ионов в окружающем растворе.

При добавлении во внешнюю среду электролита в системе возникает неравенство концентраций подвижных ионов. Эта концентрация выше в геле, чем во внешней среде. В соответствии с уравнением $i_1 = RT \ln a_1$, активность растворителя, зависящая от концентрации вещества, следовательно, и химический потенциал растворителя в студне оказывается более низким, чем во внешней среде. Вследствие этого растворитель диффундирует в сетку до полного выравнивания химических потенциалов в обеих фазах.

Растяжение отрезков цепи полиэлектролитов, закрепленных между узлами, вызванное эффектом Доннана, компенсируется возвратной силой, которая возникает в результате снижения энтропии растянутых цепей. Когда обе силы (набухания и эластического сопротивления набуханию) оказываются взаимно скомпенсированными, устанавливается равновесная степень набухания. Приближенно степень набухания может быть выражена следующим уравнением:

$$Q^{5/3} \approx V_0 / V \left[(1/2 - \chi) \left(V_1 + \frac{\alpha z}{2V_1 I} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где α – степень нейтрализации ионогенных групп; z – валентность иона, присоединенного к ионогенной группе; V_1 – молярный объем основного звена полиэлектролита; I – ионная сила раствора; V_0 – объем полимера; χ – параметр взаимодействия полимер-растворитель.

На рис. 2 представлены кинетические зависимости равновесной степени набухания влагопоглощающих композиций с бинарным наполнением при различной доли сшивающего агента в физиологическом растворе.

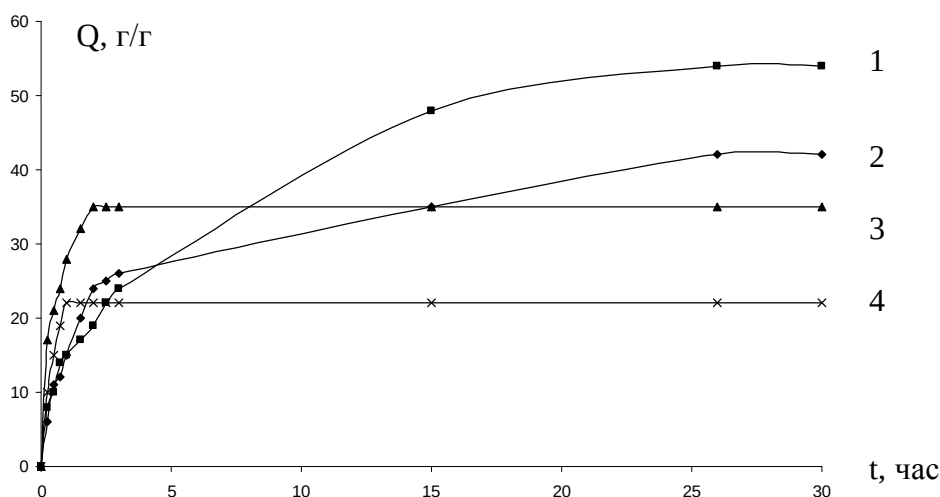


Рис. 2. Зависимость равновесной степени набухания композиций от концентрации сшивающего агента [МБАА] (масс.%) в физиологическом растворе при температуре 18 °С. Условия синтеза композиции следующие: [АК] = 22 масс.%, время синтеза = 1,5 ч, температура реакции = 50 °С, [ПСА] = 2 масс.%, [Ф] = 0.1 масс.%, [СФ] = 10 масс.%, $\alpha = 0.9$. Концентрация МБАА (масс.%) : 1 – 0.1; 2 – 0.2; 3 – 0.3; 4 – 0.5

Полученные зависимости позволяют за определенный промежуток времени синтезировать гели с заданными свойствами. Это необходимо для решения конкретных технических задач.

На рис. 3 представлена зависимость влагопоглощения новых акрилатных композиций от температуры проведения процесса.

Из рис. 3. видно, что оптимальными характеристиками водопоглощения обладают материалы, синтезированные при температуре 50 °С. Минимальное время достижения максимальной степени набухания имеют материалы, полученные при 30 °С, при этом материалы, синтезированные при 40 - 50 °С, имеют максимальную степень набухания, равную 800 – 1000 г/г.

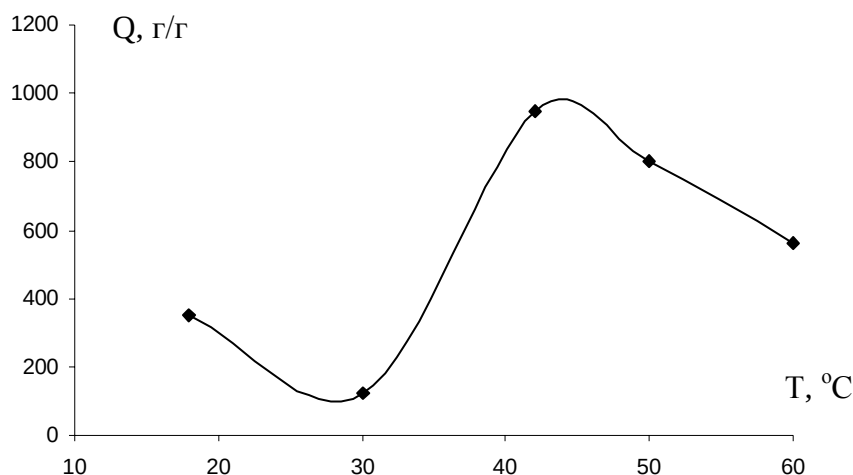


Рис. 3. Зависимость степени набухания в дистиллированной воде полимерной композиции от температуры проведения синтеза при 18 С. Условия синтеза композиции: [АК] = 22 масс.%, $\alpha=0.9$, время синтеза 5 – 6 ч, [МБАА] = 0.1 масс.%, [ПСА] = 2 масс.%, [Ф] = 0.1 масс.%, [СФ] = 10 масс.%

Заключение

Синтезированы и исследованы композиции на основе акрилатного полимера с двойным наполнением: алюмосиликатными стеклосферами и фуллереном – C_{60} . Введение бинарных наполнителей позволяет получать материалы, способные не только сорбировать воду, но и сохранять геометрическую форму изделия. Показано, что условия синтеза существенным образом влияют на физико-химические свойства новых композиций.

Литература

1. R.S.Harland, R.H.Prudhomme. Polyelectrolyte Gels: Properties, Preparation and Applications. // ACS Symposium Series. 1992. V.480. Amer. Chem. Society, Wash. D.C. P.7–12.
2. J. Thiel, G.Maurer, J. M.Prausnitz. Hydrogele: Verwendungsmöglichkeiten und thermodynamische Eigenschaften. // Chemie Ingenieur Technik. 1995. B.67. № 12. S. 1567-1583.
3. Будтова Т.В., Сулейменов И.Е., Френкель С.Я. Сильнонабухающие полимерные гидрогели - некоторые современные проблемы и перспективы (обзор). // Журн. прикл. химии. 1997. Т.70, № 4. С. 529–539.
4. Шварева Г.Н., Рябова Е.Н., Шацкий О.В. Суперабсорбенты на основе (мет)акрилатов, аспекты их использования. // Пластические массы. 1996. № 3. С.32–35.
5. Дубровский С.А., Казанский К.С. Термодинамические основы применения сильнонабухающих гидрогелей в качестве влагоабсорберов (обзор). // Высокомолек. соед. Сер. Б. 1993. Т.35. № 10. С.1712–1721.
6. Успенская М.В., Сиротинкин Н.В., Масик И.В. Композиции на основе тетразолилакрилатных сополимеров и полых стеклосфер. // ЖПХ. 2004. Т. 77. №.10. С. 1719–1721.
7. Успенская М.В., Сиротинкин Н.В., Островский В.А. Композиционные материалы на основе акрилатных сополимеров и фуллеренов. // Материалы V Всероссийской конференции «Керамика и композиционные материалы», Сыктывкар, 2004, 20–27 июня. С. 207–208.
8. Игрунова А.В., Сиротинкин Н.В., Успенская М.В. Синтез и абсорбционная способность новых полиэлектролитных тетразолсодержащих акриловых гидрогелей. // ЖПХ. 2001. Т. 74. №. 5. С. 793–797.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗРЫВА СВЯЗЕЙ В СТОЛКНОВЕНИИ $\text{H}\text{E}^{2+} + \text{H}_2^+$

Г.Б. Дейнека

Рассматривается процесс столкновения молекулярного иона водорода с α -частицей. Двумерная модель столкновения построена на конечном базисе эрмитового набора В-сплайнов. При захвате электрона происходит разрыв связи в молекуле. Проведен анализ влияния ориентации молекулы на вероятность захвата электрона.

Введение

Настоящая работа является продолжением серии исследований возможности применения малоразмерных (одно- и двумерных) динамических моделей при изучении простейших квантовых систем [1–3] и посвящена анализу влияния ориентации молекулы на вероятность захвата пролетающей заряженной частицей. В настоящее время появился целый ряд работ, связанных с теоретическими [4–7] и экспериментальными [8, 9] исследованиями влияния ориентации молекулы на вероятность захвата электрона налетающей частицей. В частности, в [8] на основе разрыва связи и фиксирования направления движения разлетающихся протонов экспериментально исследуется влияние ориентации на вероятность захвата. В нашей работе, с помощью двумерной модели, разработанной в [3], мы проведем анализ зависимости вероятности захвата электрона от взаимной ориентации молекулы и направления движения налетающей α -частицы в пределах ее энергии 1–100 КэВ/нуклон.

Методика исследования

При исследовании динамических процессов в квантовой механике важное значение имеет выбор соответствующей модели, позволяющей провести вычисления при минимуме дополнительных (вычислительных) приближений и сохраняющей основные свойства исследуемого объекта. Как показано нами в [3], двумерная модель с соответствующей проекцией потенциала частиц на рассматриваемое 2D пространство позволяет вполне удовлетворительно описать столкновение атома водорода с протоном даже в плане сравнения с экспериментальными данными. Этой моделью мы воспользуемся и в настоящем исследовании. Рассмотрим плоскость (x, y) , в начале координат которой находится центр тяжести молекулярного иона водорода. α -частица движется параллельно оси y на расстоянии прицельного параметра b . Ориентация определяется углом φ между осью x и прямой, соединяющей ядра молекулы. Динамика столкновения определяется зависящим от времени уравнением Шредингера

$$i(\partial / \partial t) \Psi(x, y, t) = \{H_0(x, y) + V(R(t))\} \Psi(x, y, t), \quad (1)$$

где $V(R(t))$ – потенциал налетающей частицы,

$$R(t) = ((x-b)^2 + (y-vt)^2)^{1/2}, \quad (2)$$

$H_0(x, y)$ – невозмущенный гамильтониан молекулярного иона водорода. Уравнение (1) решается разложением $\Psi(x, y, t)$:

$$\Psi(x, y, t) = \sum_{\alpha} C_{\alpha}(t) \Phi_{\alpha}(x, y), \quad (3)$$

где $\Phi_{\alpha}(x, y)$ – решение стационарного уравнения

$$H_0 \Phi_{\alpha}(x, y) = E_{\alpha} \Phi_{\alpha}(x, y)$$

с использованием эрмитового набора В-сплайнов [10]. Зависящий от времени вектор $C(t)$ вычисляется с использованием аппроксимацию Кранка-Никольсена [11]

$$C(t + dt) = (1 + i dt h/2)^{-1} (1 - i dt h/2) C(t), \quad (4)$$

где h – матрица $H_0(x, y) + V(t)$.

Результаты

В результате исследований получены кривые зависимости вероятности захвата электрона (и, соответственно, разрыва связи) от скорости налетающей α -частицы для 4 различных ориентаций молекулярного иона $\varphi=(0, 45, 90, -45)^\circ$. На рисунке приведены полученные зависимости для прицельного расстояния $b = 2$ а.е. Прежде всего отметим, что максимум вероятности захвата (около 1 а.е. скорости) хорошо совпадает с данными трехмерных расчетов [6]. Максимальная вероятность захвата соответствует ориентации 0° (молекула ориентирована перпендикулярно движению налетающей частицы) и минимальная – 90 градусов (параллельная ориентация). Следует отметить, что ориентации 45° и -45° дают различную вероятность захвата, что свидетельствует о несимметричности процесса относительно направления движения α -частицы.

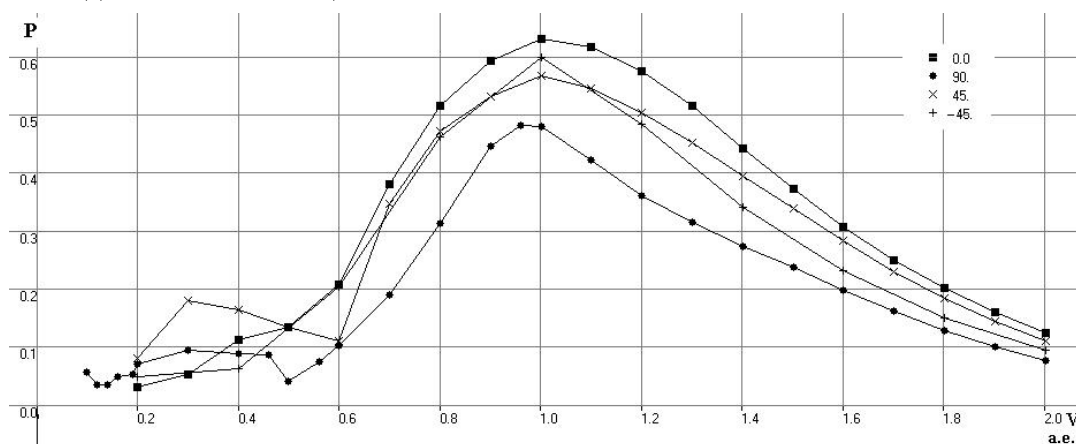


Рис. Зависимость вероятности захвата электрона α -частицей для различных ориентаций молекулярного иона водорода ($\varphi=0, 45, 90, -45$ градусов) от скорости налетающей частицы. Значение прицельного параметра $b = 2$ а.е.

Выводы

Рассматриваемая простая модель хорошо передает процесс столкновения, воспроизводит основные энергетические параметры захвата α -частицей электрона и чувствительна к ориентации молекулы. Это позволяет надеяться на успешное использование предложенной модели для изучения более сложных систем.

Литература

1. Дейнека Г.Б. // Оптика и спектроскопия. 2005. Т. 98. № 2. С. 229.
2. Deineka G.B. // International Journal of Quantum Chemistry. 2004. V. 100. №4. P. 677
3. Deineka G.B. International Journal of Quantum Chemistry. 2006. V. 106. №8.
4. Shingal R., Lin C.D. // Phys. Rev. A 40. 1989. V. 3. №1. P.302.
5. S. C. Cheng and B. D. Esry, Phys. Rev. A **72**. 2005. 022704
6. D. J. Phalen, M. S. Pindzola, and F. Robicheaux Phys. Rev. A **72**. 2005. 022720.
7. S. Martínez, G. Bernardi, P. Focke, D. Fregenal, and S. Suárez Phys. Rev A **72**. 2005. 062722 8 H Bräuning, I Reiser, A Diehl, A Theiß, E Sidky, C L Cocke and E Salzborn J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2001. V. 34. L321–L325
8. I. Reiser C. L. Cocke and H. Bräuning A **67**. 2003. 062718.
9. Deineka G.B., Optics and Spectroscopy, 1998. V. 81. №2. P. 159.
10. Bonche P.; Koonin S. and Negele J.W. Phys. Rev. C. 1976. V. 13. №3. P. 1226.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СИНТЕЗА ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ КЕРАМИКИ

**А.А. Слободов, Е.Б. Качер, Д.В. Кремнев, М.А. Радин, В.С. Бабкин,
Г.И. Евстропьева, М.Ю. Зубкова, Г.А. Мищенко**

Экспериментальное изучение газофазного синтеза хлорида аммония, используемого в качестве важной солевой добавки для ряда керамических изделий, осложняется высокой компонентностью, сложностью учета всего комплекса происходящих при этом процессов. Показано, что термодинамический метод оказывается не просто определенной альтернативой эксперименту, но и существенно более продуктивным.

Введение

Большинство крупных заводов химической промышленности в своих отходах так или иначе содержат хлор и (или) его соединения. Мировое производство хлора составляет около 25 млн. тонн, и хлорная промышленность является одной из доминирующих отраслей. Для обеспечения экологической безопасности хлорсодержащих продуктов необходимы рациональные технологические решения по нейтрализации отходов или их утилизации. На многих производствах хлорсодержащих соединений побочными продуктами является аммиак, количество которого выходит за пределы балансового взаимопотребления. Некоторые хлорсодержащие выбросы можно перерабатывать в товарные продукты, имеющие большой спрос на рынке химических реактивов. Так, из отходящих газов, содержащих аммиак и хлороводород, можно получать готовый к потреблению в промышленности продукт – хлорид аммония.

Хлорид аммония обычно является побочным продуктом содового производства; его выделяют упариванием маточного раствора, остающегося после отделения твердого NaHCO_3 , или высаливанием с помощью NaCl . Применяют хлорид аммония при изготовлении сухих батарей, гальванических элементов, при пайке и лужении стальных изделий, как дымообразователь; хлорид аммония применяют в медицине в виде водного раствора как мочегонное средство.

Однако существующие технологии хлорида аммония характеризуются рядом существенных недостатков, что во многом обусловлено сложностью протекающих при синтезе процессов.

Возможности термодинамического подхода

Существует несколько промышленных способов получения хлорида аммония. Основной способ получения в промышленности хлорида аммония – из растворов аммиака и хлороводородной кислоты. Такой процесс очень трудоемок, так как требует больших энергозатрат на сушку раствора. Тем не менее, подобная схема используется при утилизации HCl и NH_4OH , содержащихся в жидких отходах химических производств. Известно, что все жидкофазные способы производства хлорида аммония из аммиак-хлорсодержащих отходов химической промышленности обладают рядом недостатков:

- необходимость значительных энергозатрат для выпаривания раствора образующегося хлорида аммония и выделения его в кристаллическом виде;
- сильная коррозия выпарных аппаратов;
- сложность и многостадийность производства.

Альтернативным и весьма перспективным представляется газофазный метод производства хлорида аммония. Однако теоретическая физико-химическая база, необходимая для его эффективного применения, разработана недостаточно [1–3]. Перспектив-

ным подходом исследования твердофазного способа производства хлорида аммония из газообразных отходов, содержащих хлороводород и аммиак, представляется метод термодинамического моделирования [3]. В основе его лежит разработка и применение системы методов и термодинамических данных для описания, моделирования и расчета фазово-химического состава сложных (по природе и числу компонентов, фаз, химических реакций) многокомпонентных систем в широкой области параметров состояния.

Одна из ключевых задач при реализации термодинамического подхода – определение химических потенциалов компонентов системы, которую, в свою очередь, можно разбить на два принципиально различных случая. Первый относится к индивидуальным веществам, второй – к компонентам растворов. Для индивидуальных веществ соответствующая экспериментальная информация в целом достаточно обширна [4–8], однако имеется, и немало, «белых пятен» – отсутствие многих высокотемпературных данных, а для ряда веществ даже для условий, близких к стандартным (298.15 К, 1 бар), – противоречивость, ненадежность или отсутствие информации.

Еще более сложная ситуация – с растворами (твердыми, жидкими, в том числе и газообразными). Действительно, высокотемпературные данные, независимо от природы и компонентности, как правило, единичны или отсутствуют. Для нормальных условий относительно обширная информация имеется лишь для бинарных (в первую очередь, водно-неорганических) систем. Для тройных и более сложных систем она отрывочна [9, 10].

Другой проблемой является определение корректных и эффективных методов описания и моделирования реальной системы, решения встающих (в соответствии с принципом равновесия Гиббса) при этом задач условного экстремума (являющихся по своей структуре, в силу характера зависимостей химпотенциалов от состава системы, существенно нелинейными). Имеющиеся разработки для расчета химических и фазовых равновесий во многих случаях предназначены для слишком узкого класса реальных систем, не обеспечивают корректность описания и эффективность решения, для достаточно сложных систем дают искаженный результат или не могут дать его в принципе. Кроме того, математическая модель в ряде случаев оказывается явно некорректной и несогласованной, не отражая (хотя бы в минимально необходимой степени) физико-химические свойства реальной системы, что также приводит к неверным результатам.

Важнейшей проблемой при реализации даже достаточно универсальных комплексов методов для исследования конкретных, весьма сложных и различных по природе взаимодействий многокомпонентных неорганических и водно-неорганических систем является обеспечение корректности «сужения» общей модели на данную систему, их адекватности. Другой, уже конечной задачей, возникающей как итог моделирования и расчетов, является анализ, интерпретация и обобщение результатов, т.е. построение собственно физико-химических моделей поведения исследуемых систем – выявление закономерностей влияния компонентного состава, температуры, давления на детальный фазово-химический состав системы, характер протекающих в ней превращений. Это дает возможность определения и ее макрохарактеристик (растворимости, полей устойчивости и др.), а для технологических систем – еще и оптимальных условий проведения процесса, регламентации ключевых параметров, наиболее эффективных условий синтеза и др.

Лишь совокупное решение всех указанных проблем (каждая из которых представляет собой широкий спектр непростых задач) позволяет рассчитывать на количественную достоверность итоговых результатов.

Проблема и особенности учета фазовых и химических превращений

Особые сложности в изучение рассматриваемых многокомпонентных систем вносят необходимость охвата обширной области значений параметров состояния (температуры,

состава и др.), когда система нередко качественно меняет свое фазово-химическое состояние, свойства и поведение. Так, состав и технологические режимы производства ряда продуктов (минеральных солей, удобрений, стекол и др.) обеспечивают на конечных, высокотемпературных стадиях синтеза формирование их как конденсированных (кристаллических, аморфных, жидких) растворов. Поскольку, однако, условия эксплуатации и хранения этих материалов соответствуют нередко значительно более низким температурам (комнатным или даже ниже, в то время как в условиях синтеза они доходят обычно до 1000–1500 °С и выше), то система становится термодинамически неустойчивой, и происходит релаксация – ее старение, осложненное еще и собственно условиями эксплуатации. А так как в низкотемпературной области взаимная растворимость неорганических веществ часто низка или даже имеет место практически полная взаимная нерастворимость, то термическая релаксация определяет тенденцию формирования такого материала (люминофора, стекла, огнеупора и др.) не как твердого раствора, а как конгломерата индивидуальных веществ, находящихся в фазовом равновесии [10]. Иными словами, при низких температурах нередко происходит распад твердого раствора (образованного на этапе синтеза в высокотемпературных условиях).

Для всестороннего корректного исследования свойств подобных систем необходимо (помимо выполнения определенных ниже, более общих требований) иметь аппарат термодинамического описания, моделирования и расчета, включающий две существенно различные и взаимодополняющие концепции их анализа: как раствора (твердого; жидкого, в частности, водного; газообразного) – растворная методология – в одних условиях, и как фазовой ассоциации – фазовая методология – в других. Тем более, что вообще исследуемые природные и технологические неорганические и водно-неорганические системы являются, как правило, гетерогенными – с сосуществующими фазами как постоянного (в том числе водные и газообразные растворы) составов. Так что эти концепции должны быть не только взаимодополняющими, но и (как и фазы) «сосуществующими». При этом во всех случаях обе они должны иметь «химическую составляющую»: обеспечивать эффективный учет отмеченного выше многообразия химических (как внутри-, так и межфазных) превращений.

Реализация метода для процесса газозофазного синтеза хлорида аммония

Таким образом, эффективность решения рассматриваемых задач методами термодинамического физико-химического моделирования требует решения целого комплекса рассмотренных проблем (технологических, физико-химических, математических, экологических и др.). Некоторые из результатов разработанного подхода представлены ниже, для решения задачи утилизации газовых выбросов хлор- и аммиакосодержащих производств и разработки на этой основе технологии хлорида аммония.

Рассмотрим гомогенную систему взаимодействия газообразных хлороводорода с аммиаком с образованием кристаллического продукта хлорида аммония по реакции:



Эта реакция, как видно, экзотермична, протекает с большим выделением теплоты. Рассмотрим по данной реакции фазовое равновесие этой гомогенной газовой системы.

На рис. 1 и 2 представлены результаты термодинамического моделирования – зависимости по конденсации хлороводорода и аммиака в зависимости от температуры при различных суммарных давлениях данных компонентов смеси: 0,1 и 1 атм. соответственно. Из обеих графиков можно сделать вывод о том, что с увеличением температуры, близкой к 800 К, начинает происходить диссоциация основных компонентов на различные компоненты: атомарный Н, Cl, а также Cl₂, NH₂. Их концентрация в смеси может достигать в этом случае 10⁻⁷-10⁻⁶ (моль/м³), что, несомненно, будет вносить свой

вклад в протекание процесса и образование новой кристаллической фазы хлорида аммония.

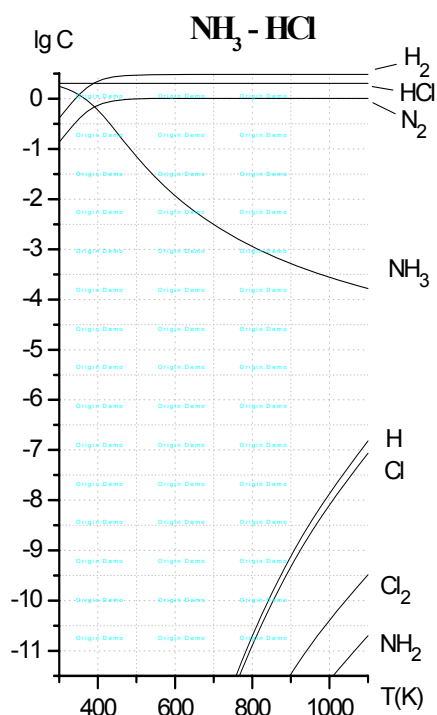


Рис.1. Влияние температуры на состав газовой фазы при сублимации хлорида аммония при общем давлении 0,1 атм

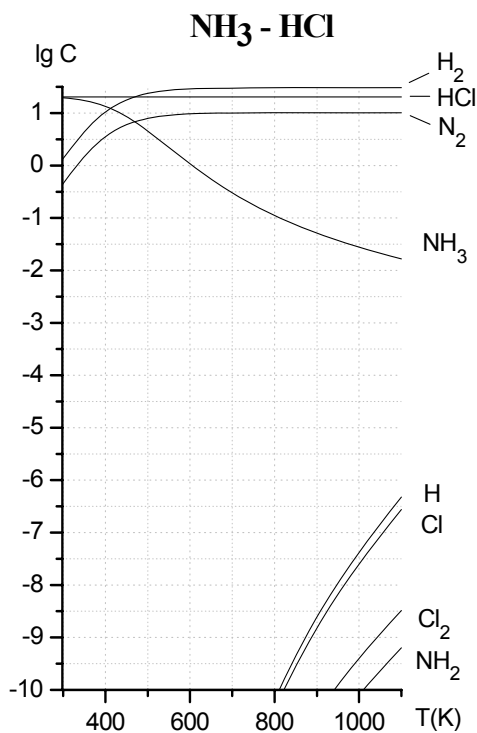


Рис. 2. Влияние температуры на состав газовой фазы при сублимации хлорида аммония при общем давлении 1 атм.

Результаты, представленные на рис. 2, свидетельствуют о том, что с повышением давления (от 0.1 до 1 атм) диссоциация аммиака снижается. Его концентрация при повышенном давлении будет выше при той же самой температуре.

Концентрация хлороводорода при одной и той же температуре будет больше у системы с более высоким давлением (1 атм). Это можно объяснить низкой диссоциацией и разложением хлороводорода при давлении 1 атм, что положительно скажется на кинетике и производительности процесса сублимации хлорида аммония.

При температуре больше 400 К аммиак будет диссоциировать на азот и водород; концентрация азота, получаемого в системе при разложении аммиака, выходит на плато и остается практически постоянной в течение всего процесса. Это объясняется его инертностью по отношению к газофазным компонентам данной системы.

По предлагаемой технологии выбросы в атмосферу аммиака и хлороводорода полностью отсутствуют, а потери экологически менее опасного соединения – хлорида аммония в виде легко рассеивающегося аэрозоля – не превышают предельно допустимых выбросов на большинстве хлорпроизводящих и хлорперерабатывающих предприятий.

Таким образом, разработанный метод термодинамического моделирования утилизации хлороводорода и аммиака, содержащихся в выбросах предприятий, производящих хлорсодержащие материалы и изделия, обеспечивает не только надежную экологическую защиту воздушного бассейна многих регионов России, но и позволяет получать ценный продукт – хлорид аммония в чистом виде, широко используемый в электротехнической, фармацевтической, парфюмерной и других отраслях промышленности.

Заключение

Показана эффективность методов термодинамического моделирования и расчета при разработке и исследовании твердофазного способа производства хлорида аммония из газообразных отходов, содержащих хлороводород и аммиак. В основе подхода лежит разработка и применение системы методов и термодинамических данных для описания, моделирования и расчета фазово-химического состава сложных (по природе и числу компонентов, фаз, химических реакций) многокомпонентных систем в широкой области параметров состояния.

Выработаны и реализованы основные критерии, обеспечивающие корректность и эффективность применения разрабатываемого подхода для различных задач химической технологии и науки.

Представленный комплекс методов реализован для задачи газофазного синтеза важнейшего, стратегически важного продукта – хлорида аммония. Как результат, выявлены основные закономерности влияния параметров состояния (температуры, давления, состава реакционной смеси) на эффективность процесса, определены оптимальные условия технологического процесса.

Литература

1. Kotrly S., Sucha L. Handbook of chemical equilibria in analytical chemistry. John Wiley and Sons: N.Y., 1985. 414 p.
2. Барри Т. Прикладная химическая термодинамика. М.: Мир, 1988. 507 с.
3. Радин М.А., Бабкин В.С., Мищенко А.В., Маруева Г.А., Пучков Л.В., Зарембо В.И., Стрельников К.Б., Слободов А.А. Термодинамическая методология исследования и оптимизации процессов химической технологии // Межд. конф. "Фундаментальная наука в интересах развития критических технологий": Тез. докл. Новосибирск: ИК СО РАН, 2005. С.46–47.
4. Глушко В.П. (Ред.) Термические константы веществ: Справочник в 10-ти вып. М.: АН СССР, 1965-1981.

5. Наумов Г.Б., Рыженко Б.Н., Ходаковский И.Л. Справочник термодинамических величин. М.: Атомиздат, 1971. 240 с.
6. Cox J.D., Wagman D.D., Medvedev V.A. CODATA key values for thermodynamics. N.Y., 1989. 362 p.
1. 7. JANAF thermochemical tables / Ed. D.R.Stull, H.Prophet. Washington: NSRDS–NBS, 1971. V.37. 1141 p.; Supplements // J. Phys. Chem. Ref. Data: 1974. V.3, № 2. P.311–480; 1975. V.4, № 1. P.1–175; 1978. V.7, № 3. P.793–940; 1982. V.11, № 3. P.695–940; 1985. V.14, Suppl. № 1.
7. Robie R.A., Hemingway B.S. Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar (10^5 Pascals) pressure and at higher temperatures // U.S. Geol. Surv. Bull. N 2131. Washington: Dept. Interior, 1995. 492 p.
8. Wagman D.D., Evans W.H., Parker V.B., Schumm V.B., Halow I., Bailey S.M., Churney K.L., Nuttall R.L. The NBS table of chemical thermodynamic properties. Selected values for inorganic and C₁ and C₂ organic substances in SI units. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1982. V.11, Suppl.2. 394 p.
9. Yokokawa H., Fujishige M., Ujiie S., Dokiya M. CTC: Chemical thermodynamic computation system. // J. Nat. Chem. Lab. Ind. 1988. V.83. № 11. P.1–122.

СОЗДАНИЕ И МЕТОДЫ РАБОТЫ С БАЗОЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

А.А. Слободов, Е.Б. Качер, Д.В. Кремнёв, М.А. Радин, А.В. Мищенко,
Я.В. Зарембо, М.Ю. Матузенко, Г.И. Евстропьева

Существующие системы и базы термодинамических свойств веществ нередко характеризуются недостаточной полнотой и достоверностью информации. Предлагаемые критерии и методы позволяют создать достаточно полную и согласованную систему и соответствующую компьютерную базу данных.

Введение

Современный уровень развития термодинамического метода в физико-химических исследованиях дает принципиальную и во многих случаях реальную возможность чисто расчетного изучения самых разнообразных по своей природе природных и технологических систем, исключив необходимость их экспериментального исследования. Применение при этом современного аппарата методов термодинамического моделирования и расчета позволяет рассчитывать на получение *количественно* достоверных результатов при изучении даже достаточно сложных по составу, свойствам и поведению систем [1–4]. Этот подход становится особо ценным, когда эксперимент оказывается малоэффективным, труднореализуемым или невозможным – в случаях высокой компонентности исследуемой системы, экстремальности значений параметров состояния, одновременного протекания ряда сложных взаимосвязанных физико-химических превращений и др.

Однако эффективность применения даже абсолютно строгих термодинамических методов расчета во многом определяется и ограничена наличием и качеством соответствующих термодинамических данных, определяющих значения параметров применяемых методов. Несмотря на кажущееся обилие различных систем и баз термодинамических данных, последние нередко оказываются противоречивы, несогласованы, неполны или отсутствуют [5–11].

Структура термодинамического описания

Переходя к более детальному анализу и решению проблем создания термодинамических систем и баз данных, целесообразно сначала очертить круг термодинамических характеристик, необходимых для построения корректного и полного термодинамического описания произвольной физико-химической системы в допустимой области возможных ее состояний.

Следует, во-первых, отметить, что выбор независимых параметров состояния и соответствующих характеристических функций определяет и различные формы термодинамического описания системы. При этом все эти формы эквивалентны, легко трансформируются одна в другую, и любая из них в равной степени позволяет (с применением расчетного аппарата термодинамики типа и в духе уравнений Максвелла, термодинамических уравнений состояния и т.п.) исследовать различные свойства как системы в целом, так и компонентов, фаз и веществ, ее составляющих. Как с теоретических, так и с практических позиций наиболее удобным при построении такого описания является выбор давления P и температуры T в качестве независимых внешних параметров состояния. Соответствующей характеристической функцией является тогда, как известно, энергия Гиббса $G(P, T, n)$ ($n = \{n_i\}$ – вектор мольного состава) исследуемой системы, определяемая (в силу того, что P , T – интенсивные переменные, а n – экстенсивная) значениями мольных количеств n_i и химических потенциалов m_i веществ, описывающих ее компонентный и фазовый состав:

$$G = \sum_{(i)} \frac{\partial G}{\partial n_i} n_i \equiv \sum_{(i)} \mu_i n_i. \quad (1)$$

В свою очередь, химический потенциал $\mu_i(P, T)$ i -го вещества определяется через его значение $\mu_i^0(P, T)$ в так называемом *стандартном состоянии*:

$$\mu_i(P, T) = \mu_i^0(P, T) + RT \ln a_i, \quad (2)$$

где a_i – активность i -го вещества (относительно используемого для него стандартного состояния).

Как известно, в качестве стандарта для индивидуальных веществ обычно принимается наиболее устойчивое при данных (P, T) -условиях фазовое состояние, для компонентов растворов – как чистое вещество, так и растворенное. При этом в силу (1), (2) величины μ_i^0 суть мольные (при выборе чистого вещества в качестве стандарта) либо парциальные мольные (если стандартное состояние – раствор) энергии Гиббса $G_i^0(P, T)$. Поскольку для построения корректного термодинамического описания и расчета равновесий достаточно знать не полные значения $G_i^0(P, T)$ (определить которые практически невозможно), а лишь их относительные изменения, часто в качестве требуемой «шкалы отсчета» используются функции образования соединений из соответствующих простых веществ – $\Delta_f G^0(P, T)$ (здесь и далее индекс i вещества опущен). Более целесообразным, однако реже применяемым, представляется использование в качестве $G^0(P, T)$ (т.е. и $\mu^0(P, T)$) другой (также термодинамически корректной) величины:

$$\tilde{G}^0(P, T) \equiv \Delta_f G^0(P_0, T_0) + [G^0(P, T) - G^0(P_0, T_0)], \quad (3)$$

а также аналогичного выражения для энтальпии $\tilde{H}^0(P, T)$, где P_0, T_0 – соответственно, стандартные значения давления и температуры, для которых, в соответствии с принятыми в настоящее время международными соглашениями, рекомендованы величины $P_0 = 1$ бар (10^5 Па), $T_0 = 298.15$ К. Отметим, что для давления нередко используется прежний стандарт – $P_0 = 1$ атм $\equiv 101325$ Па, для температуры (иногда) – $T_0 = 0$ или 293.15 К.

Получение функций типа $\tilde{G}^0(P, T)$, $\tilde{H}^0(P, T)$ не требует, в отличие от $\Delta_f G^0(P, T)$, знания термодинамических свойств простых веществ (определяющих состав данного сложного) при (P, T) -условиях, отличных от стандартных. Поскольку температурные зависимости термодинамических свойств веществ наиболее изучены при давлениях, близких к стандартному, то потенциал $\tilde{G}^0(P, T)$ (3) целесообразно «привязать» к значению $P = P_0$, представив переход из состояния (P_0, T_0) в (P, T) сначала по изобаре $(P_0, T_0) \rightarrow (P_0, T)$, затем – по изотерме $(P_0, T) \rightarrow (P, T)$:

$$G^0(P, T) - G^0(P_0, T_0) = [G^0(P_0, T) - G^0(P_0, T_0)] + [G^0(P, T) - G^0(P_0, T)], \quad (4)$$

Подставляя далее (4) в (3) и используя математический аппарат термодинамики для составляющих выражения (4), после ряда преобразований несложно получить:

$$\begin{aligned} \tilde{G}^0(P, T) = & \Delta_f G^0(P_0, T_0) - S^0(P_0, T_0)(T - T_0) + \\ & + \sum_{j=1}^k \left[T \int_{T_{j-1}}^{T_j} \frac{G_j^0(P_0, t)}{t} dt - \int_{T_{j-1}}^{T_j} G_j^0(P_0, t) dt + \left(\frac{T}{T_j} - 1 \right) \Delta H_j^0(P_0, T_j) \right] + \int_{P_0}^P V^0(p, T) dp, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta_f G^0(P_0, T_0) \equiv \Delta_f G_{298}^0$, $S^0(P_0, T_0) \equiv S_{298}^0$ – соответственно, энергия Гиббса образования и энтропия вещества при стандартных ($P_0 = 1$ бар, $T_0 = 298.15$ К) условиях; $T_j \equiv T_{tr}$, $\Delta H_j^0(P_0, T_j) \equiv \Delta H_{tr}^0$ – соответственно, температуры и стандартные тепловые эффекты фазовых (полиморфных, агрегатных и др.) переходов вещества, если таковые имеются; $G_j^0(P_0, t) \equiv G_{P_j}^0(t) = \partial H^0 / \partial t$ – температурные зависимости стандартных изобарных теп-

емкостей для каждой из k фаз вещества, образующихся на интервалах $[T_{j-1}, T_j]$, ($j \in 1:k$; $T_0=T_0$, $T_k=T$); $V^0(p, T)$ – барическая зависимость стандартного мольного объема на интервале $[P_0, P]$ при температуре T .

При этом последнее слагаемое в (5) соответствует второй скобке в (4) (изотерме), четыре предыдущих – первой (изобаре). Как и выше для μ_0 , термодинамические величины, входящие в выражение (5) и являющиеся в общем случае парциальными мольными, превращаются в мольные при выборе в качестве стандартного состояния индивидуального вещества (но остаются парциальными, если стандарт – раствор).

Критерии корректности и полноты описания

Переходя к решению вопроса о структуре и критериях качества информации, отметим, что, в силу определения (3) функций $\tilde{G}^0, \tilde{H}^0$ (которые далее обозначим, как и обычные функции образования, $\Delta_f G^0, \Delta_f H^0$) и тождества $\Delta H = \Delta G + T \Delta S$ (справедливого для любого изотермического изменения состояния системы), при любых значениях P, T (в том числе и стандартных – P_0, T_0) эти функции связаны соотношением

$$\Delta_f H^0 = \Delta_f G^0 + T \Delta_f S^0 \equiv \Delta_f G^0 + T \left(S^0 - \sum_{(i)} \nu_i S_i^0 \right) \quad (6)$$

где ν_i, S_i^0 – соответственно, стехиометрические коэффициенты и стандартные энтропии простых веществ, определяемых элементарным составом рассматриваемого соединения.

При наличии всех данных, необходимых для расчета температурно-барических зависимостей $\Delta_f G^0(P, T)$ во всем поле устойчивого существования данного вещества, выражение (5) представляет собой *полное* термодинамическое описание этого вещества. Из него могут быть получены (при каком-либо ином выборе независимых параметров состояния) другие, эквивалентные (5), описания, а также рассчитаны все необходимые термодинамические свойства веществ (типа $H = \partial (G/T) / \partial (1/T)$, $S^0 = -\partial G^0 / \partial T$ и др.).

Таким образом, необходимым и достаточным условием полноты и корректности термодинамического описания физико-химической системы является «обеспеченность» расчетов (5), т.е. (с учетом принятых соглашений по стандартному состоянию) наличие для каждого из веществ, входящих в исследуемую систему, следующих четырех групп термодинамических характеристик:

- термических констант стандартного состояния: $\Delta_f H_{298}^0, \Delta_f G_{298}^0, S_{298}^0$ (любые две из них, в силу (6), достаточны);
- термических констант фазовых переходов (если последние имеются): $T_{tr}, \Delta H_{tr}^0$ (или ΔS_{tr}^0 , т.к. $\Delta H_{tr}^0 = T_{tr} \Delta S_{tr}^0$);
- температурно-зависимых функций $G_p^0(T)$ (при фиксированном, стандартном значении $P = P_0 = 1 \text{ бар}$);
- барически-зависимых функций $V^0(P, T)$ (в требуемой области температур).

Непосредственно отсюда вытекают общие критерии (в целом рассмотренные выше), характеризующие в совокупности качество любой системы или базы термодинамических данных. Это, во-первых, степень ее *химической полноты*, показывающая, насколько широк круг включенных в нее веществ. Второе – это *термодинамическая полнота*, характеризующая наличие (или отсутствие) для веществ базы термодинамических данных по всем четырем указанным группам свойств, необходимых для построения полного и строгого, в соответствии с (5), термодинамического описания. И, наконец, третья, ключевая ее характеристика – насколько *достоверно* это описание, т.е. какова *объективная* точность содержащейся в базе информации.

Ясно, что наиболее сложными и неоднозначными являются вопросы не полноты (как химической, так и термодинамической: требования к качеству здесь очевидны – чем больше, тем лучше), а достоверности информации, обеспечивающей расчет (5). Хотя, следует отметить, условия согласованности этих общих критериев (обусловленные взаимосвязями, по соответствующим реакциям, между значениями одного свойства для различных веществ – с одной стороны, и между различными термодинамическими свойствами одного вещества – с другой) дают возможность (при анализе термодинамической информации) получения наиболее корректных результирующих оценок.

Касаясь структуры описания (5), следует отметить, что учет влияния лишь последней, барической его составляющей $\int_{T_0}^T V^0(p, T) dp$ не представляет (с определенными

оговорками), независимо от класса рассматриваемых веществ, значительных трудностей. Во-первых, мольный объем многих индивидуальных веществ хорошо изучен при стандартных условиях. Кроме того, для конденсированных (твердых и жидких) фаз его величина $V^0(P, T)$ незначительна, относительно слабо зависит от температуры и давления в достаточно широкой области значений параметров состояния, и вклад барической составляющей в величину $\tilde{G}^0(P, T)$ потенциала (5), как правило (до давлений порядка 1000 атм), пренебрежимо мал. Для газов же, поведение которых в этой области близко к идеальному ($P_i V^0 = RT$, где P_i – парциальное давление), расчет ее труда не представляет:

$$\int_{T_0}^T V^0(p, T) dp = RT \ln \frac{P_i}{P_0} = RT \ln \frac{RT}{P_0 V} \quad (7)$$

(или используя, если имеется, более точное уравнение состояния – типа уравнения Ван-дер-Ваальса, вириальное и др.).

Таким образом, для расчета (5) определяющими становятся данные первых трех групп термодинамических характеристик: константы – при стандартной температуре и при температурах фазовых переходов, и температурные зависимости $C_p^0(T)$. Причем все они взяты при фиксированном (стандартном) давлении P_0 . Отметим также, что в практически важном частном случае условий, близких к стандартным (1 бар, 298.15 К) достаточно иметь лишь данные первой группы (стандартные термодинамические константы, связанные соотношением (6)).

Основные требования к качеству эксперимента и расчета

Конкретизация представленных критериев полноты и достоверности термодинамической информации определяется особенностями методологии эксперимента и расчета при ее получении, качество которых, в свою очередь, может быть описано посредством некоторых общих, не зависящих от специфики методов и природы объектов исследования, показателей. При этом их, в соответствии с логикой получения данных, можно разбить на три группы – характеризующие собственно *эксперимент*, методологию *обработки* его результатов и *расчетные* (от чисто теоретических до чисто эмпирических) методы получения термодинамических свойств веществ. Реализация такого подхода дает основу для формирования требований, которым должна удовлетворять любая система термодинамических данных, критического анализа существующих систем и построения (если необходимо и возможно) такой, которая бы в максимальной степени удовлетворяла поставленным требованиям.

В качестве базисных, определяющих качество *эксперимента*, можно выделить следующие показатели: чистота исследуемых веществ, их фазовое состояние, соблю-

дение и контроль условий опыта, методические особенности измерений, возможные источники случайных (инструментальных) и систематических погрешностей.

Корректность последующей *обработки* экспериментальных данных определяется следующими основными условиями: адекватностью методики описания данных опыта и их обработки реальным его условиям, единством и строгостью используемых методов обработки, наличием и обоснованностью оценок погрешностей результатов, взаимосогласованностью термодинамических характеристик.

Достоверность термодинамических свойств, полученных расчетным путем (самостоятельным или дополняющим экспериментальное изучение), зависит, в первую очередь, от того, насколько обосновано применение того или иного метода расчета, какова корректность самого метода, насколько достоверны значения его параметров (если таковые имеются), какова их погрешность.

Логика научных исследований и их сегодняшний уровень, к сожалению, не позволяют в большинстве случаев дать универсальные и исчерпывающие ответы на многие из поставленных общих вопросов (не говоря уже о более специфических) и однозначно определить значения показателей качества. Чаще лишь скрупулезный экспертный анализ с привлечением массы прямой и косвенной информации позволяют решить (нередко лишь отчасти) ту или иную проблему достоверности термодинамических характеристик вещества.

Касаясь сначала первого из введенных критериев – степени химической полноты базы данных, отметим, что при анализе свойств индивидуальных веществ целесообразно (как с точки зрения особенностей экспериментальных исследований, так и расчетных аспектов) рассматривать классы соединений в конденсированном (твердом и жидком) и газообразном агрегатных состояниях отдельно. Термодинамика конденсированных растворов (газообразные, как правило, достаточно легко поддаются расчету на основе индивидуальных характеристик) относительно широко и полно изучена лишь для водных систем, однако имеющиеся термодинамические данные характеризуются заметными противоречиями и информационными пустотами (как по кругу веществ, так и по полноте описания) и нуждаются в серьезной экспертизе, уточнении и пополнении.

Методы экспериментального исследования, а также расчета и оценки термодинамических свойств для каждого из этих классов во многом различны, обладая рядом характерных особенностей. Последние, в свою очередь, определяют по сути как возможности достижения термодинамической полноты исследования (второй критерий), так и степень достоверности его результатов (третий критерий), порождая тем самым соответствующие отличия в структуре и требованиях к качеству информации. В связи с этим вопросы эффективности экспериментальных и в особенности (учитывая отмеченную выше противоречивость и недостаток экспериментальной информации) расчетных методов исследования термодинамических свойств веществ нуждаются в специальном рассмотрении.

Относительно расчетных методов необходимо отметить, что, помимо чисто теоретических подходов (в целом весьма ограниченных), для достаточно широких классов реакций и веществ (индивидуальных и растворенных) – оксидов и гидроксидов металлов, некоторых групп солей, водных ионов, их гидроксо-, боратных, аммиачных, галогенидных и других комплексов, и др. – установлен ряд эмпирических и полуэмпирических закономерностей и зависимостей их термодинамических функций от температуры, природы и типа реакции, состава соединения, кристаллохимических параметров его структуры, степени закомплексованности и др. [1, 4, 6, 12]. Корректное привлечение этой информации и выявление, при экспертизе и анализе результатов экспериментальных исследований равновесий, других закономерностей, разработка и использование на этой основе методов оценки термических констант – все это дает возможность получения достаточно обоснованной, полной и согласованной системы термодинамических функций для широких классов веществ и соответствующего банка термодинамических данных [13].

Заключение

В целях решения проблемы корректности, достоверности и полноты систем и баз термодинамических свойств веществ разработаны методы и критерии качества информации, позволяющие обеспечить выполнение указанных требований. Рассмотрена структура термодинамического описания как отдельного вещества создаваемой базы данных, так и самой базы в целом. Указанная структура описания отдельного вещества и необходимая для этого информация обеспечивают корректный расчет термодинамических характеристик (стандартных энергии Гиббса и энтальпии образования, энтропии, изобарной теплоемкости, энтальпий фазовых превращений) в широком диапазоне параметров состояния (температуры, давления). В сочетании с представленными критериями внутренней и внешней согласованности данных создаваемой базы и требованиями к качеству экспериментального и расчетного определения термодинамических характеристик веществ это обеспечивает корректное и эффективное исследование достаточно сложных многокомпонентных гомо- и гетерогенных физико-химических систем различной природы.

Литература

1. Кубашевский О., Олкок С.Б. *Металлургическая термохимия*. М.: Металлургия, 1982. 392 с.
2. Kotrly S., Sucha L. *Handbook of chemical equilibria in analytical chemistry*. John Wiley and Sons: N.Y., 1985. 414 p.
3. Слободов А.А., Суворов С.А., Борзов Д.Н., Бочаров С.В., Матузенко М.Ю. Термодинамическое моделирование поведения периклазуглеродистых огнеупоров в условиях эксплуатации // *Новые огнеупоры*. 2003. № 2. С.24–28.
4. Радин М.А., Бабкин В.С., Мищенко А.В., Маруева Г.А., Пучков Л.В., Зарембо В.И., Стрельников К.Б., Слободов А.А. Термодинамическая методология исследования и оптимизации процессов химической технологии. // *Межд. конф. "Фундаментальная наука в интересах развития критических технологий"*: Тез. докл. Новосибирск: ИК СО РАН, 2005. С.46–47.
5. Глушко В.П. (ред.) *Термические константы веществ: Справочник в 10-ти вып.* М.: АН СССР, 1965–1981.
6. Наумов Г.Б., Рыженко Б.Н., Ходаковский И.Л. *Справочник термодинамических величин*. М.: Атомиздат, 1971. 240 с.
7. Cox J.D., Wagman D.D., Medvedev V.A. *CODATA key values for thermodynamics*. N.Y., 1989. 362 p.
8. JANAF thermochemical tables / Ed. D.R.Stull, H.Prophet. – Washington: NSRDS–NBS, 1971. – V.37. – 1141 p.; Supplements // *J. Phys. Chem. Ref. Data*: 1974. V.3, № 2. P.311–480; 1975. V.4, № 1. P.1–175; 1978. V.7, № 3. P.793–940; 1982. V.11, № 3. P.695–940; 1985. № V.14, Suppl. № 1.
8. Robie R.A., Hemingway B.S. Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar (10^5 Pascals) pressure and at higher temperatures // *U.S. Geol. Surv. Bull. N 2131*. Washington: Dept. Interior, 1995. 492 p.
9. Wagman D.D., Evans W.H., Parker V.B., Schumm V.B., Halow I., Bailey S.M., Churney K.L., Nuttall R.L. The NBS table of chemical thermodynamic properties. Selected values for inorganic and C₁ and C₂ organic substances in SI units // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 1982. V.11, Suppl. 2. 394 p.
10. Yokokawa H., Fujishige M., Ujiie S., Dokiya M. CTC: Chemical thermodynamic computation system // *J. Nat. Chem. Lab. Ind.* 1988. V.83, № 11. P.1–122.
11. Барри Т. *Прикладная химическая термодинамика*. М.: Мир, 1988. 507 с.
12. Slobodov A. Calculation of phase-chemical transformations in multicomponent systems of various nature on the basis of thermodynamic methods- and databank ASTICS. // *Proceed. XIV Int. Conf. Chem. Thermod.* St.Petersburg, 2002. P.47–54.

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАНАРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ

С.А. Миронов

Разработан лабораторный стенд для экспериментального исследования характеристик волноводного распространения оптического излучения в планарных интегрально-оптических волноводах. Для измерения спектра и затухания оптических мод используется метод «спектроскопии m -линий». Программное обеспечение стенда позволяет определять основные параметры однородных и градиентных волноводов. Стенд предназначен для использования в учебно-методической и научной работе.

В настоящее время проводится интенсивная разработка интегрально-оптических приборов с целью применения их в аппаратуре высокоскоростных волоконно-оптических линий связи, датчиках и системах оптической обработки информации [1, 2]. Использование тонкопленочных диэлектрических волноводов открывает путь к созданию миниатюрных активных и пассивных устройств (оптических модуляторов, переключателей, дефлекторов, ответвителей, сумматоров и др.) с параметрами, превосходящими их аналоги, построенные на элементной базе традиционной объемной оптики.

Основой построения любых приборов интегральной оптики является планарный интегрально-оптический волновод. Параметры приборов во многом определяются характеристиками распространения оптических волноводных мод. Поэтому разработка и совершенствование методов исследования оптических волноводов является актуальной задачей.

В работе рассмотрен разработанный в СПб ГУ ИТМО лабораторный стенд, который предназначен для измерения основных характеристик планарных оптических волноводов, таких как спектр и затухание оптических мод. Программное обеспечение стенда позволяет рассчитывать спектр распространяющихся мод, исходя из известных параметров волновода, а также решать обратную задачу – на основе экспериментально полученного спектра мод рассчитывать основные параметры волновода.

Схема стенда, работающего на основе принципа «спектроскопии m -линий» [3], приведена на рис.1. Используется призмный метод ввода излучения в волновод, который обладает модовой селективностью и позволяет проводить измерения для каждой волноводной моды в отдельности.

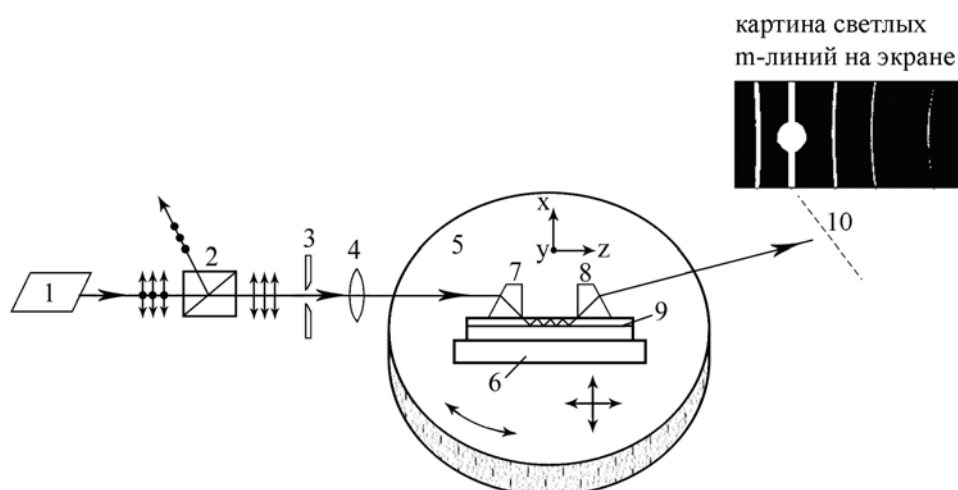


Рис.1. Оптическая схема стенда, 1 – лазер, 2 – поляризатор, 3 – щель, 4 – линза, 5 – столик гониометра, 6 – подставка для крепления ячейки, 7 – призма для ввода света, 8 – призма для вывода света, 9 – волновод, 10 – экран

Измерительная ячейка с исследуемым волноводом и призмами ввода и вывода излучения размещается на поворотном столике гониометра ГС-5 так, чтобы ее можно было вращать в плоскости xz (см. рис. 1). Изменяя, таким образом, угол падения луча лазера на входную призму, можно добиться выполнения условия синхронизма для какой-либо m -моды волновода и реализовать ее возбуждение. После распространения по волноводу оптическое излучение выходит из него через выходную призму и далее попадает на фотодетектор или на экран, где возникает картина « m -линий», по которой можно идентифицировать порядок возбужденной m -моды. С помощью отсчетного устройства гониометра измеряется угол падения луча лазера на входную призму, при котором возбуждается m -линия, и затем путем расчета определяется волноводный показатель преломления моды $n_m = \beta_m/k$, где β_m – постоянная распространения m -моды, а $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

При использовании гониометра ГС-5 погрешность измерения углов составляет $10''$, что дает максимальную погрешность при определении постоянных распространения оптических мод β_m/k не более $\sim 10^{-4}$.

Метод призмленного ввода дает возможность измерения затухания для каждой моды в отдельности. Конструкция измерительной ячейки позволяет перемещать выходную призму относительно входной в направлении z , чтобы изменять эффективную длину образца. При этом в каждой точке z измеряется интенсивность выходного излучения. Метод измерения затухания с помощью двигающейся призмы является удобным, так как он позволяет выполнять прямые измерения коэффициента затухания оптических мод. Погрешность измерения затухания указанным методом составляет $\sim 10^{-2}$.

Для обработки и проверки экспериментальных результатов в работе предложен алгоритм и разработана программа в среде математического пакета MathCad 13.0, которая позволяет рассчитывать спектры мод, распространяющихся в однородных и градиентных волноводах с различными профилями показателя преломления (ППП). Спектры мод определяются посредством численного решения дисперсионного уравнения по методу ВКБ [4] на основе известных параметров волновода (прямая задача).

Рассчитанные спектры оптических мод представлены на рис. 2. Начальные условия: длина волны излучения $\lambda = 0,6328$ мкм, толщина волновода $d = 6$ мкм, а также показатели преломления волновода $n_2 = n(0) = 1,5900$, покрытия $n_1 = 1$ и подложки $n_3 = 1,5125$ выбраны одинаковыми для всех случаев для удобства сравнения и соответствуют типичным параметрам волноводов, сформированных в стекле.

Было показано (см. рис. 2), что характер модового спектра (расстояние по спектру между модами $\Delta\beta/k$) существенно различен для волноводов с различным ППП. Установлено, что для волновода с параболическим профилем постоянные распространения расположены эквидистантно, т.е. $\Delta\beta/k = \text{const}$. В то же время для однородного волновода значения $\Delta\beta/k$ увеличиваются с номером моды m , а для волноводов с экспоненциальным, гауссовым и линейным профилями значения $\Delta\beta/k$ уменьшаются с возрастанием номера моды. Установленные особенности модового спектра позволяют по результатам эксперимента качественно оценить вид ППП волновода, что необходимо для дальнейшего количественного восстановления ППП (обратная задача [5]).

Для решения обратной задачи разработана программа, которая позволяет восстанавливать ППП по известному модовому спектру. Результаты расчетов по восстановлению ППП опытных образцов волноводов, полученных методом протонного обмена в кристалле ниобата лития [6], представлены в табл. 1 и показаны на рис. 3. Необходимые для расчетов экспериментальные спектры мод были измерены на разработанном стенде. Установлено, что разработанная программа позволяет определять такие пара-

метры волноводов, как показатель преломления на поверхности и эффективную толщину, с точностью $\sim 10^{-3}$.

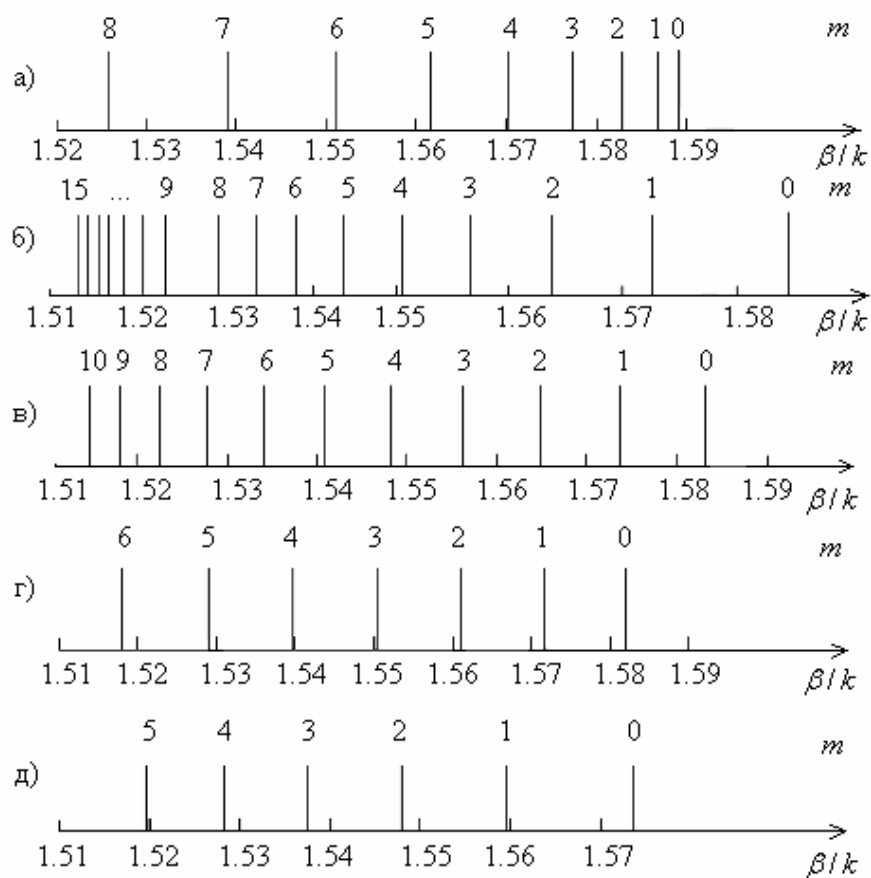


Рис. 2. Спектры мод, рассчитанные по программе: а) для однородного волновода, б) для градиентного волновода с экспоненциальным профилем, в) для градиентного волновода с Гауссовым профилем, г) для градиентного волновода с параболическим профилем, д) для градиентного волновода с линейным профилем

Образец №	m	β/k	Форма профиля	n_0	d , мкм
2.0	0	2.208	Гауссов	2.220	1.955
	1	2.197			
3.0	0	2.199	Гауссов	2.203	3.757
	1	2.195			
	2	2.193			
3.1	0	2.200	Гауссов	2.205	3.670
	1	2.196			
	2	2.193			
3.2	0	2.200	Гауссов	2.204	4.183
	1	2.196			
	2	2.194			

Таблица 1. Результаты восстановления профиля показателя преломления для Н-обменных волноводов в $LiNbO_3$, $n_s = 2.192$.

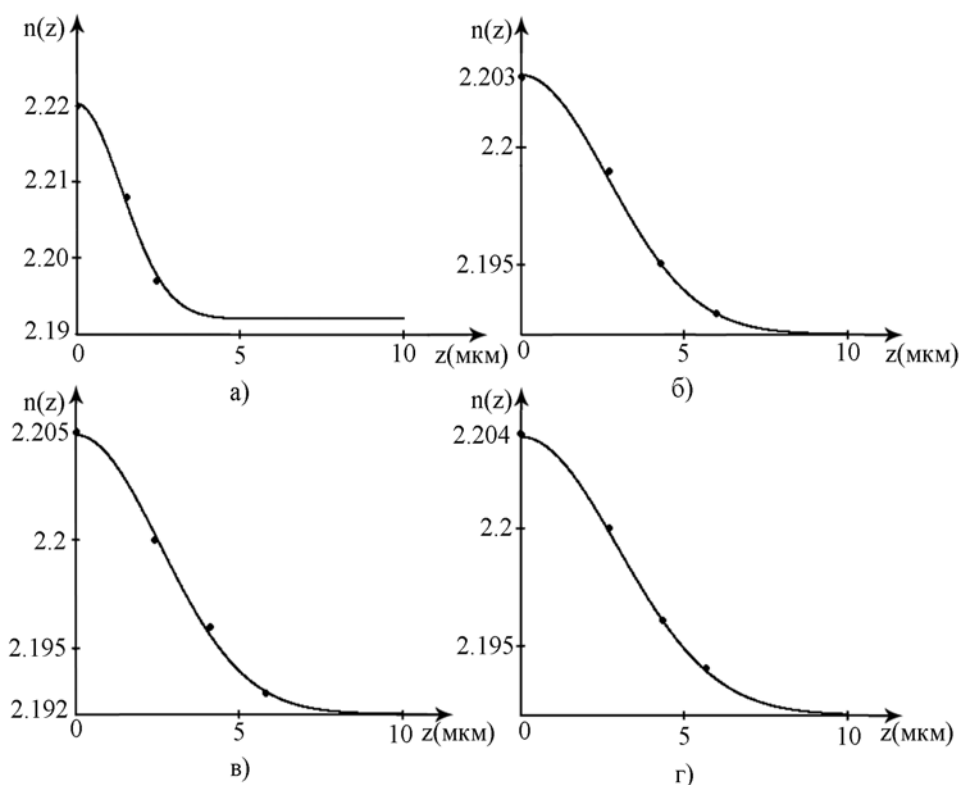


Рис. 3. Графики распределения показателя преломления (n) по глубине волновода (z) для волноводов в LiNbO_3 . Расчетные значения ($\bullet$) и аппроксимирующие их кривые (-): а) для образца 2.0, б) для образца 3.0, в) для образца 3.1, г) для образца 3.2

Основные результаты работы сводятся к следующему.

- Разработан лабораторный стенд, позволяющий измерять основные параметры планарных интегрально-оптических волноводов.
- Разработан пакет программ, позволяющих рассчитывать спектр оптических мод, а также определять параметры однородных и градиентных волноводов, изготовленных из различных материалов.
- Полученные результаты были использованы на кафедре «Физика и техника оптической связи» при создании новой лабораторной работы по курсу «Оптические направляющие среды и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи». Кроме того, результаты работы были использованы при изготовлении волноводов с заданными свойствами в научно-исследовательской работе по созданию управляющей интегрально-оптической схемы для волоконно-оптического гироскопа.

Литература

1. Тамир Т., Волноводная оптоэлектроника, М., Мир, 1991.
2. Фриман Р., Волоконно-оптические системы связи, М., Техносфера, 2004.
3. Tien P., Light waves in thin films and integrated optics // Applied Optics. 1971. Vol. 10, № 11. P. 2395–2413.
4. Schiff L., Quantum Mechanics, New York, McGraw-Hill, 1955. P. 184–193.
5. White J., Heidrich P., Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices: a simple analysis // Applied Optics. 1976. Vol. 15. № 1, P. 151–155.
6. Korkishko Y., Fedorov V., Feoktistova O., LiNbO_3 optical waveguide fabrication by high-temperature proton exchange // Journal of lightwave technology, 2000. Vol. 18. № 4. P. 562–567.

**ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ
ТРЕХМЕРНЫХ ОБРАЗОВ****С.А. Алексеев, А.В. Пасяда**

В работе рассматривается проблема распознавания трехмерного объекта по его поляризационному изображению. Получена зависимость «глубины» изображения от интенсивности отраженного излучения и параметров поляризации, построена обучающаяся ячеистая нейрореподобная сеть (ЯНС), позволяющая восстанавливать произвольную форму поверхности.

Введение

Распознавание глубины поверхности наблюдаемого объекта является актуальной задачей для систем технического зрения. Существующие методы распознавания ориентаций поверхности и глубины по единственному изображению, как правило, рассматривают интенсивность отраженного от объекта излучения. В некоторых работах проводится достаточно успешное распознавание поверхности при анализе одной только интенсивности [1]. Для расширения возможностей (распознавание полупрозрачных объектов и адекватное определение тени) и повышения точности измерений в данной работе предлагается использовать дополнительно поляризационные характеристики излучения. На зависимостях интенсивности и поляризации от ориентации отражающей поверхности обучается алгоритм ячеистой нейросети и восстанавливает глубину (наклон) поверхностей.

**Получение зависимостей отражательной способности и поляризации
от расстояния до поверхности**

Распознавание формы по затенению относится к процессам восстановления трехмерной формы из монокулярного плоского изображения. Успех распознавания зависит от подходящей модели представления, которая устанавливает связь между формой поверхности и яркостью изображения, и от выбранного численного алгоритма восстановления формы из данного изображения.

В исследованиях распознавания формы по затенению модель представления определяется через карту отражательной способности $R(p, q)$, где $p = dz/dx$ и $q = dz/dy$ – частные производные высоты z по отношению к координатам изображения, называемые также градиентами поверхности. Также удобно представлять карту отражательной способности как $R(\Psi, \Xi)$, где Ψ – угол наклона, Ξ – угол направления наклона. С определением карты отражательной способности проблема распознавания становится проблемой нахождения наилучшего пути восстановления поверхности $z(x, y)$.

При известных параметрах освещения поляризованным светом форма поверхности опосредованно характеризуется зависимостью параметров отраженного излучения от ориентации поверхности. Для более надежного распознавания поверхности к карте отражательной способности можно добавить карту отраженной поляризации. Процесс распознавания формы поверхности объекта состоит в восстановлении зависимости наклона поверхности от отраженной интенсивности и двух параметров поляризации: азимута θ и эллиптичности ϵ эллипса поляризации отраженного излучения. Эти параметры вычисляются на изображении фотометрическим методом по ряду положений анализатора. Важно отметить, что при диффузном отражении в каждый пиксел приходит ог-

ромное число фотонов с различными эллипсами поляризации. И в пикселе из-за деполяризации отраженный эллипс поляризации размывается и усредняется. Тем не менее, параметры азимута и эллиптичности подобной фигуры можно использовать для алгоритмов восстановления ориентаций поверхности. Азимут θ и эллиптичность ε , также как интенсивность, показывают определенные зависимости от наклона поверхности (рис. 1). При отражении (особенно зеркальном) эллипс поляризации ориентируется по отношению к направлению наклона поверхности, а эллиптичность связана с углом падения (и отражения).

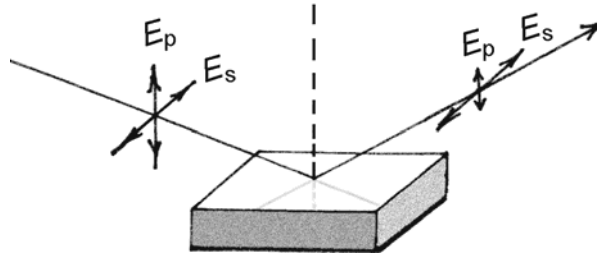


Рис. 1. Подавление р-компоненты световой волны при зеркальном отражении

Поляризация и интенсивность измеряются фотометрическим методом. Перед фотоприемником установлен вращающийся анализатор. Непосредственно измеряется зависимость интенсивности излучения $I_{\Phi\P}(\alpha)$, проходящего линейный анализатор и достигшего приемной площадки фотоприемника, на интервале $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ в N угловых положениях анализатора $\alpha_k = k \cdot 2\pi/N$, где $k = 0, 1, 2 \dots N-1$. Необходимо, чтобы в начальном положении линейного анализатора ось пропускания совпадала с х-поляризацией исследуемой оптической системы.

После ряда преобразований [2] на основе численного гармонического анализа вычисляются коэффициенты Фурье [3]:

$$a_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} I_{\Phi\P}(\alpha_k), \quad (1a)$$

$$a_2 = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} I_{\Phi\P}(\alpha_k) \cdot \cos \frac{4\pi \cdot k}{N}, \quad (1б)$$

$$b_2 = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} I_{\Phi\P}(\alpha_k) \cdot \sin \frac{4\pi \cdot k}{N}. \quad (1в)$$

На основе этих данных определяются оба параметра эллипса поляризации: угол эллиптичности

$$\varepsilon = \pm \frac{1}{2} \cdot \arcsin \sqrt{1 - \frac{4}{a_0^2} \cdot (a_2^2 + b_2^2)} \quad (2)$$

и азимут

$$\theta = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \arctg(b_2/a_2) + 0,5 \pi d, \quad (3)$$

где $d=0$ или 1 и зависит от положения максимума $I_{\Phi\P}(\alpha)$. При расчете поляризации фотометрическим методом невозможно определить только знак эллиптичности, т.е. направление обхода поляризационного эллипса. Интенсивность, с точностью до постоянного коэффициента K , зависящего от пропускания оптических элементов системы анализатора, можно оценить как

$$I_0 = K(a_0 + \sqrt{a_2^2 + b_2^2}) \quad (4)$$

Параметры ε и θ – эллиптичность и азимут «псевдоэллипса» отраженного частично поляризованного света. Тем не менее, остается возможность использовать параметры подобной фигуры для определения ориентации поверхности.

Схема установки показана на рис. 2. При использовании матричного фотоприемника строится карта отражательной способности и поляризации. Для получения зависимостей интенсивности и поляризационных параметров световой волны от ориентации отражающей поверхности выполняется следующий алгоритм:

1. сцена освещается параллельным пучком линейно поляризованного света (после деполяризации из линейной поляризации получается фигура, близкая к кругу, а совсем не линейная поляризация);
2. на сцену устанавливается калибровочный объект из исследуемого материала. Для этого лучше всего подойдет шар, так как он содержит все ориентации поверхностей, его просто распознать [4] и смоделировать и найти ориентацию поверхности в любой точке (пикселе);
3. измеряется зависимость от ориентации интенсивности $I(p,q)$, азимута $\theta(p,q)$ и эллиптичности $\varepsilon(p,q)$. Их также можно построить не только в пространстве градиентов (p,q) , но и в углах (Ψ, Ξ) ;
4. проводится обучение нейросети как алгоритма для восстановления глубины изображения по известным $I(\Psi, \Xi)$, $\theta(\Psi, \Xi)$ и $\varepsilon(\Psi, \Xi)$. В работе [1] получена эффективная методика восстановления глубины изображения с помощью ячеистых нейросетей. За счет пространственного соседства и парадигмы распределения случайных марковских полей именно ячеистые нейросети являются эффективным алгоритмом для задачи распознавания. Если относительное расстояние до поверхности («глубину» изображения) z измерять в радиусах калибровочного шара $r_{ш}$ (пусть $r_{ш} = 1$), то $z = 1 - \cos(\Psi)$. (6)
5. на сцену помещается произвольный предмет с этим же классом поверхности, и восстанавливается расстояние до поверхности при помощи обученной нейросети.

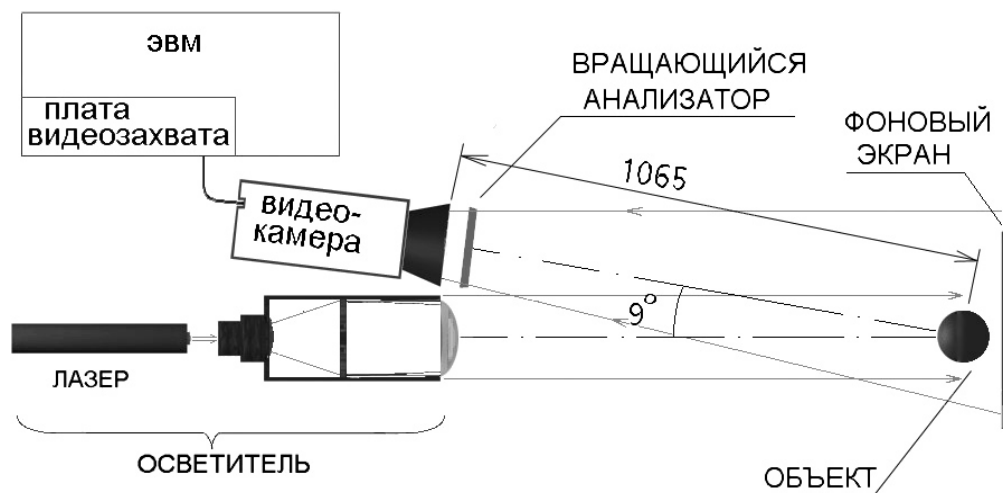


Рис. 2. Схема установки

Ячеистые нейросети

Для рассмотрения алгоритма в шаге (4) приведем общее определение ячеистых нейронных сетей: данные сети являются массивами идентичных динамических систем ячеек, которые связаны только локально [5]. Любая ячейка соединена только со своими соседними ячейками, на несоседние ячейки оказывается косвенное взаимодействие из-за распространяющегося эффекта динамики в сети. Ячейка, находящаяся в положении (i,j) двумерного массива $M \times N$, обозначена C_{ij} , и ее r -окрестность N_{ij}^r определяется как

$$N_{ij}^r = \{C_{kl} \mid \max\{|k-i|, |l-j|\} \leq r; 1 \leq k \leq M, 1 \leq l \leq N\} \quad (7)$$

где размер окрестности r — положительное целое число.

Каждая ячейка имеет состояние x , постоянное внешнее значение на входе u и на выходе z . Эквивалентная схема ячейки непрерывного действия по времени показана на рис. 3.

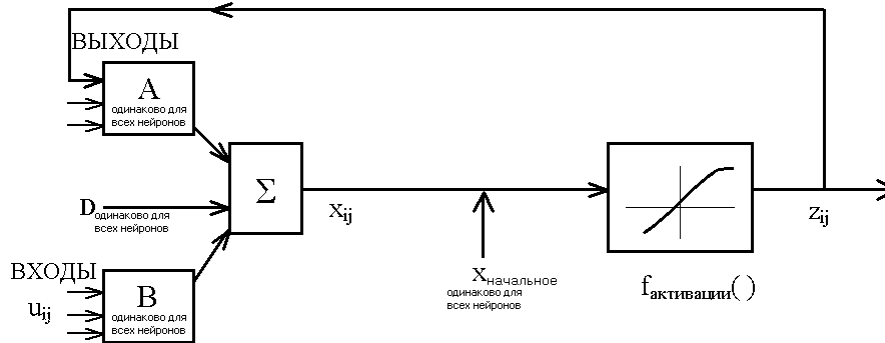


Рис. 3. Блок-схема одной ячейки нейрона ячеистой нейросети

Здесь u_{ij} – входные значения, обычно $|u_{ij}| \leq 0$; x_{ij} – состояние ячейки C_{ij} , а D – независимое постоянное смещение. Из [5] $z_{ij}(t) = f_{\text{активации}}(x_{ij}(t))$, где f может быть любой подходящей нелинейной функцией. Матрицы весовых коэффициентов $A(.)$ и $B(.)$ известны как клонирующие шаблоны. $A(.)$ действует на выход соседних ячеек и рассматривается как оператор обратной связи. $B(.)$, в свою очередь, воздействует на входные значения и соответствует контролирующему оператору. Конечно, $A(.)$ и $B(.)$ зависят от применения. Постоянное смещение D и клонирующие шаблоны определяют временное поведение ячеистой нелинейной сети. В общем, клонирующие шаблоны не обязательно должны быть пространственно инвариантны.

Для определения глубины изображения был использован метод на основе ячеистых нейросетей. Имеется ряд наблюдений на пиксельном уровне с зависимостью $I(z)$, $\varepsilon(z)$ и $\theta(z)$. Как показано в работе [1], единственный путь вычислить z – это минимизация функции энергии E , состоящей в нашем случае из 3 членов:

$$E = E_a(z) + E_b(z) \quad (8)$$

Энергия модели $E_a(z)$ является членом регуляризации, похожим на ограничение гладкости, классически используемое для решения «некорректно поставленных задач». Добавочная энергия $E_b(z)$ – это энергия ошибки. Конкретно в данной работе функция энергии переписана как

$$E = \sum_{i,j} [k_a \cdot (z_{ij} - z_{i+1,j})^2 + k_a \cdot (z_{ij} - z_{i,j+1})^2 + k_a \cdot (z_{ij} - z_{i-1,j})^2 + k_a \cdot (z_{ij} - z_{i,j-1})^2 + k_b \cdot |x_{\text{текущее}} - x_{\text{требуемое}}|], \quad (9)$$

где $x_{\text{текущее}}$ – это сумма сигналов, пришедших со всех синапсов, перемноженных на их весовые коэффициенты; а $x_{\text{требуемое}}$ – это сумма, которая должна была получиться, чтобы на выходе было именно требуемая глубина $z_{\text{требуемое}}$. А при подаче выборки на вход нейрона получилась сумма $x_{\text{текущее}}$, следовательно, из отличия $x_{\text{текущее}}$ и $x_{\text{требуемое}}$ можно вычислить ошибку.

Создается нейросеть со стольким числом нейронов, сколько значений в выборке наблюдений $I(z)$, $\varepsilon(z)$ и $\theta(z)$. Минимум энергии можно вычислить, используя или алгоритмы стохастической релаксации типа «имитации отжига», или детерминистическими алгоритмами наподобие итеративных условных моделей [6].

Здесь используется метод «имитации отжига», который состоит в следующем: на начальном шаге параметр «температура» T , отвечающий за вероятность изменения весов, берется высоким, например $T_0 = 10$. Весовые коэффициенты для входящих значений интенсивности представляют (для всех нейронов) матрицу W_I . В нашем примере размерность матриц выбрана 5×5 и охватывает соответствующую окрестность вокруг нейрона C_{ij} . Такой же размерности использованы матрицы весовых коэффициентов для

входящих значений эллиптичности, азимута и матрица коэффициентов обратных связей $A(z)$. В нашем случае взята сигмоидная активационная функция нейронов

$$z = 0,5 (1 + \text{th}(x \cdot \gamma)) = f(x) \quad (10)$$

где γ отвечает за крутизну сигмоидной функции и выбрано в эксперименте $\gamma=0,05$. Изначально весовые коэффициенты берутся нулевыми. На вход нейрона C_{ij} подаются значения выборки $I(z)$, $\varepsilon(z)$ и $\theta(z)$, и вычисляется выходное значение z_{ij} . Затем вычисляется функция энергии E . Чтобы определить $x_{\text{требуемое}}$ в формуле энергии, необходимо подать на выход значение глубины изображения $z_{\text{требуемое}}$:

$$x_{\text{требуемое}} = f^{-1}(z_{\text{требуемое}}) = 0,5 \cdot \ln(z_{\text{требуемое}} / (1 - z_{\text{требуемое}})) : \gamma \quad (11)$$

Теперь вычисляются весовые коэффициенты методом имитации отжига [7]:

(а) в зависимости от «температуры» T веса случайно изменяются на шаг $\pm \Delta w$ с вероятностью

$$P(w) = \exp(-w^2/T^2) \quad (12)$$

(б) вычисляется энергия E . Если она уменьшилась, то шаг a принят, и веса сохраняются, иначе тоже сохраняются, но с вероятностью

$$P = \exp(\Delta E/T) \quad (13)$$

(в) «температура» понижается по геометрической прогрессии (10):

$$T_{g+1} = T_g \cdot 0,9999 \quad (14)$$

Шаги а–в повторяются до достижения «теплового равновесия» модели, когда $T_{g+1} < T_{\text{пороговое}}$. Затем можно на порядок уменьшить величину изменения веса (шага) $\pm \Delta w$ и снова искать решение до $T_{g+1} < T_{\text{пороговое}}$.

Экспериментальные данные

Чтобы определить расстояние до изображения, в работе взят угол наклона поверхности калибровочного шара Ψ . z вычислялось по формуле (4).

На основе фотометрического метода определения поляризации в каждом пикселе было обработано изображение шара и кубика-угла, покрашенных серой нитроэмалью (т.е. с одинаковым покрытием), в созданном программном обеспечении [8]. Измерение поляризации проходило по 4 положениям анализатора 0° , 45° , 90° и 135° . Каждое положение анализатора – отдельный кадр.

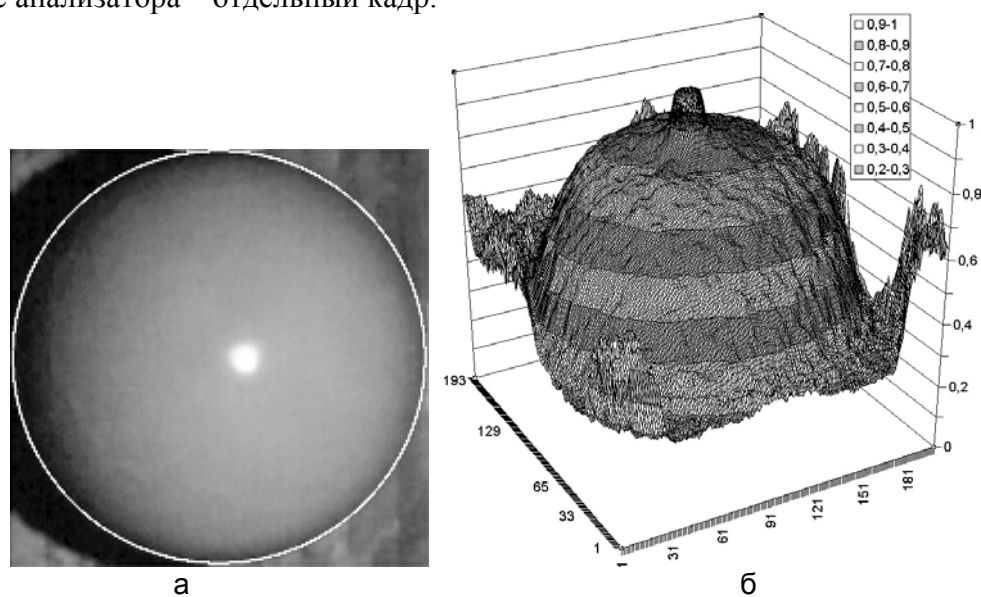


Рис. 4. а) Изображение калибровочного шара: белый круг – граница шара, б) диаграмма распознанной глубины поверхности

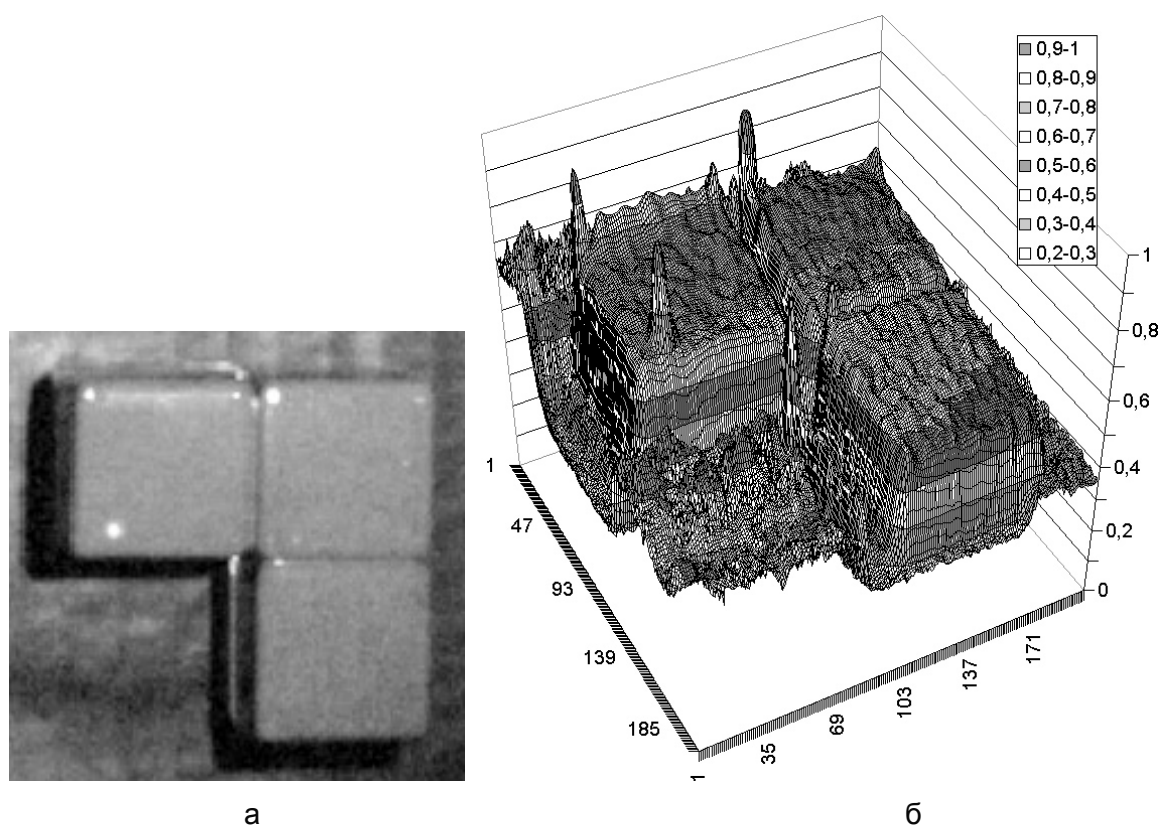


Рис. 5. а) Изображение кубика, б) распознанная поверхность кубика. Материал тот же. Потемнение к низу кадра дало перекося поверхности

Для обучения нейросети был применен метод «имитации отжига». Интенсивность была нормирована к 1: $I \leq 1$. Шаг изменения весовых коэффициентов $\pm \Delta w = 0,01$. При уменьшении «температуры» до $T_{\text{пороговое}} = 1$ были получены результаты z для изображения самого калибровочного шара на рис. 4 и кубика на рис. 5.

Как видно, сильная погрешность выделяется в точках бликов. Искажения поверхности объясняются как зашумленностью исходного изображения, так и упрощенным алгоритмом. В вычислении энергии не была задействована возможность изменения весов при увеличении энергии. Недостаточная равномерность освещения вместе с эффектом потемнения к краю кадра привела к погрешности на кубике на рис. 5б – потемнение к низу кадра дало перекося поверхности кубика. Также потребуется больше итераций для работы алгоритма «имитации отжига». Тем не менее, несмотря на зашумленность, распознавание привело к положительному результату: усредненная ошибка алгоритма составляет 7,2%. Это показывает определенную ценность данного подхода и необходимости развивать алгоритм в дальнейшем. Возможно, стоит отказаться от учета значений азимута, которые наиболее сильно зашумлены. В областях с фоном высота хаотически изменялась, так как нейросеть не была настроена на тип поверхности фона. Для этого необходимо в будущем создать алгоритм сегментации, различающий классы поверхностей на изображении (например, по цвету).

Заключение

Исследован метод, в котором на калибровочном объекте получается карта отражательной способности и поляризации. По полученным выборкам обучается ячеистая нейрноподобная сеть для определения относительного расстояния до поверхности из известного покрытия на ПО [8]. Не прибегая к стереоскопическому зрению, можно определять глубину изображения в относительных единицах (единицах радиуса калибро-

вочного шара). Хотя метод требует увеличения автоматизации измерений и точности, результаты показывают зависимость между глубиной и изменением интенсивности и параметров поляризации отраженного света. Добавим, что метод относительно стоек к шумам и не требует отдельного расчета угла падения света, как это требовалось в работе [1]. В дополнении к этому, обработка поляризации расширит возможности сегментации изображения в системах технического зрения. Это может быть использовано для различения материалов и определения не обнаруживаемых по другим параметрам излучения изменений в объектах.

Литература

1. Milanova M., Almeida P. E. M., Okamoto J. and Simoes M. G. Applications of Cellular Neural Networks for Shape from Shading Problem. Lecture Notes in Artificial Intelligence. / Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition, 1999, P. 51–63 (перевод на рус. <http://ralertmod.narod.ru/new/yans.htm>).
2. Аззам Р. Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. С. 297–300.
3. Бронштейн И.Н, Семендяев К.А., Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов, М.: Наука, 1980.
4. Алексеев С.А., Пасяда А.В. Распознавание ориентации поверхности по отраженной интенсивности и поляризации излучения. // Вестник II Межвузовской конференции молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. СПб, 2005. Т. 3. С.7.
5. Chua L.O., Roska T. The CNN Paradigm. // IEEE Transactions on Circuits and Systems (Part I), CAS-40. 1993. № 3. P. 147–156.
6. Besag, J. On the Statistical Analysis of Dirty Pictures. // J. R. Statist. Soc. B. 1986. Vol. 48. № 3. P. 259–302.
7. Заенцев И.В. Нейронные сети: основные модели. / Учебное пособие к курсу «Нейронные сети» для студентов 5 курса магистратуры к. электроники физического ф-та Воронежского государственного университета. 2000. С. 30.
8. Пасяда А.В. ПО «Поляризация на калибровочном шаре». <http://ralertmod.narod.ru/p.htm>

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ КЛЮЧ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОМ УЛЬТРАЗВУКА

Е.М. Никущенко, А.Л. Дмитриев

Описано оптоэлектронное устройство (оптоэлектронный ключ) для бесконтактного дистанционного управления генератором ультразвука с повышенной надежностью срабатывания и устойчивостью к воздействию внешних световых и электрических помех. Приведены результаты экспериментального исследования ОЭК.

Введение

В высокоточных физических экспериментах, в условиях высокой изоляции объекта измерений от внешних воздействий (изменений температуры, давления, влаги, электромагнитных помех и др.) нередко требуется обеспечить надежное бесконтактное управление электронным устройством, связанным с исследуемым объектом. Например, в метрологии при измерениях массы контейнера, расположенного в закрытой витрине компаратора, необходимо обеспечить бесконтактное дистанционное включение и выключение генератора ультразвука, находящегося в контейнере. Известные промышленные бесконтактные оптоэлектронные ключи (ОЭК) [1] часто непригодны для использования в прецизионной аппаратуре вследствие частых сбоев и влияния на их работу световых и электрических помех – осветительных устройств, электродвигателей, контакторов и др. Высоконадежное бесконтактное управление электронными устройствами удобно осуществлять с использованием предлагаемого оптоэлектронного ключа.

Устройство оптоэлектронного ключа

Принципиальная схема ОЭК показана на рисунке. Непрерывный сигнал от задающего генератора, выполненного на микросхемах DD1.1 и DD1.2, через согласующий драйвер DD3 подается на усилитель мощности, нагруженный на последовательный LC-контур. Контур образован индуктивностью L и емкостью, роль которой выполняет ультразвуковой преобразователь Q2 на основе пьезокерамики типа ЦТСЛ. Настройка пьезокерамического преобразователя на рабочую резонансную частоту в диапазоне 130–150 кГц производится изменением величины емкости C5. Согласующий драйвер управляется сигналом, подаваемым на потенциальный вход SD, при этом высокий уровень сигнала блокирует драйвер и усилитель мощности, а низкий – включает.

Устройство управления драйвером и усилителем мощности выполнено на микросхемах DD1.4 и DD1.5 и триггере DD2 [1,2]. Управляющий оптический сигнал, подаваемый на фотодиод VD1, изменяет состояние триггера и величину напряжения на выходе П. Порог срабатывания оптического ключа регулируется резистором R1. Элементы DD1.4, DD1.5, C1, C2, R2 и VD2 используются для повышения помехоустойчивости оптического ключа к внешним фоновым засветкам фотодиода и исключения ложных срабатываний.

Экспериментальная разработка и действие ОЭК

При освещении фотодиода VD1 управляющим лучом света триггер переходит в состояние с низким уровнем выходного напряжения, при этом включаются усилитель мощности и генератор ультразвука (включается красный индикатор VD4). Повторное освеще-

ние фотодиода переводит триггер в состояние с высоким выходным напряжением, в результате чего усилитель и генератор отключаются (включается зеленый индикатор VD3). Батарея питания (аккумулятор) напряжением 12 В размещена внутри электронного блока, размерами 50×50×30 мм. В состоянии «выключено» потребляемый ток устройства равен 10 мА, в состоянии «включено» - до 1 А.

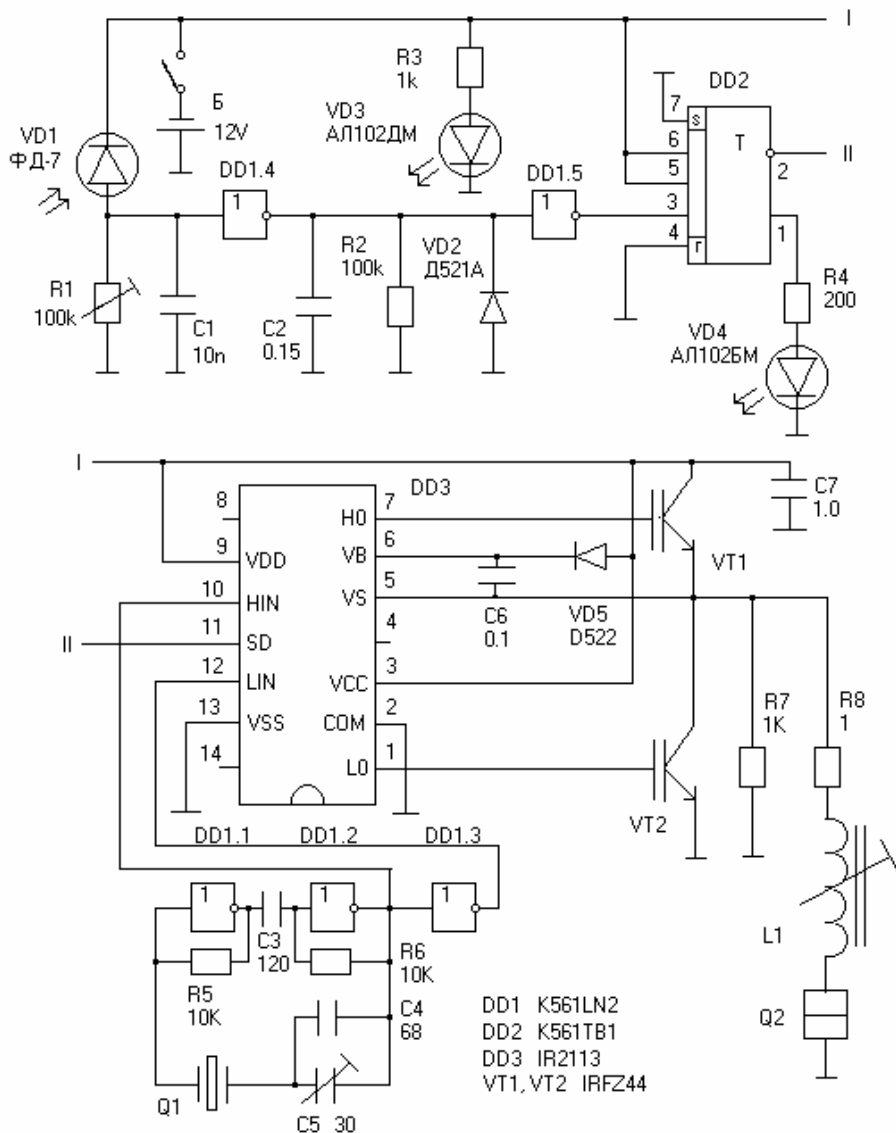


Рис. Принципиальная схема ОЭК

Экспериментальные исследования ОЭК подтвердили высокую надежность (свыше 99%) срабатывания ключа при работе как в затененном, так и хорошо освещенном лабораторном помещении. Помехи, создаваемые электронными приборами (электродвигатели, сильноточные контакторы и др.) практически не влияли на работу ОЭК.

Описанный оптоэлектронный ключ практически использовался при высокоточных измерениях масс металлических образцов при возбуждении в них ультразвуковых колебаний [3]. Управление ключом производилось через стеклянный кожух компаратора с рас-

стояния 1 - 2 метра с помощью лазерной указки. Действие ключа отличалось высокой надежностью срабатывания и устойчивостью к внешним фоновым засветкам.

Заключение

Разработана схема и конструкция оптоэлектронного ключа с повышенной надежностью работы в условиях влияния световых и электрических помех. Выполнены исследования ОЭК, подтвердившие высокую, свыше 99%, вероятность безотказного срабатывания устройства. Описанное устройство может применяться для бесконтактного управления и другими радиоэлектронными приборами (генераторами, усилителями, АЦП и др.), где необходимо их дистанционное включение и выключение в условиях воздействия различных атмосферных, а также электромагнитных и световых помех.

Литература

1. Быстров Ю. А., Галунов А. П., Персианов Г. М. Оптоэлектронные устройства в радиолюбительской практике. М.: Радио и связь, 1995.
2. International IR Rectifier, D.S. No. PD60046-P, www.irf.com
3. Дмитриев А.Л., Никущенко Е.М., Снегов В.С. // Измерительная техника, 2003, №2. С.8–11.

МЕТОДИКА РАСПОЗНАВАНИЯ СОРТОВ КОФЕ ПО КРИВЫМ КИНЕТИКИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Д.А. Кижя, С.Б. Лукин

В статье рассмотрены принципы распознавания сортов кофе по параметрам затухания кинетики фотолюминесценции. Показана возможность повышения эффективности распознавания в двумерном признаковом пространстве.

Введение

Проблема определения качества кофе и кофепродуктов, а также распознавания суррогатных включений, входящих в их состав, является актуальной на сегодняшний день. Оптические методы, а именно методы спектрально-флуоресцентного анализа, обладает рядом преимуществ, таких как возможность бесконтактного анализа, высокая скорость анализа, возможность анализа без предварительной пробоподготовки («as is»). Традиционные методы ИК-спектроскопии иногда не позволяют однозначно выделить полосы поглощения суррогатных включений (например, большие шумы из-за атмосферной воды и CO_2), а, следовательно, и определить качество продукта. [1]

К перспективным направлениям контроля качества пищевых продуктов можно отнести анализ кинетики затухания фотолюминесценции. Существуют различные методы определения вида кривой фотолюминесценции, для того чтобы выделить ряд признаков, характерных для определенных веществ.[1]

Задача, которую ставит перед собой данное исследование – построить двумерное признаковое пространство, используя одновременно и спектральные различия между исследуемыми образцами, и различия их кинетических характеристик. Построение такой модели признакового пространства позволит уменьшить погрешность и увеличит эффективность распознавания, так как при построении двумерного признакового пространства появляется возможность различать те образцы, которые мало отличаются по одному из признаков, но достаточно сильно различаются по совокупности признаков. Для подтверждения предложенной методики были проведены экспериментальные исследования.

Основные результаты

Эксперимент проводился с использованием прибора «Флюорат -02», который позволяет производить измерения как в режиме регистрации спектров, так и в режиме регистрации кинетики фотолюминесценции. Анализируемые образцы представляют собой растворимый кофе «Jacobs» (на графике – X1), растворимый кофе «Neskafe» (на графике – X4), натуральный кофе «Premium» (на графике – X2), натуральный кофе «Жокей» (на графике – X3).

Образцы исследовались по длительности затухания люминесценции. Остальные признаки, анализируемые на данном приборе, оказались менее объективными, в результате малой чувствительности прибора и погрешности при пробоподготовке.

На рис. 1 приведен типовой спектр фотолюминесценции (а) и спектры фотолюминесценции двух различных сортов кофе (б). Видно (рис. 1а), что экстремум кривой приходится на длину волны 415–430 нм, причем для различных образцов наблюдается сдвиг в пределах 8 нм (рис.1б). Для надежной классификации сорта кофе эта величина недостаточна ввиду того, что она сравнима с шумовыми изменениями спектров одного и того же сорта при ансамбле измерений. Поэтому для повышения надежности классификации вводится дополнительный признак – показатель экспоненциальной кривой затухания кинетики фотолюминесценции. На рис. 2 показаны кривые затухания люминесценции различных сортов.

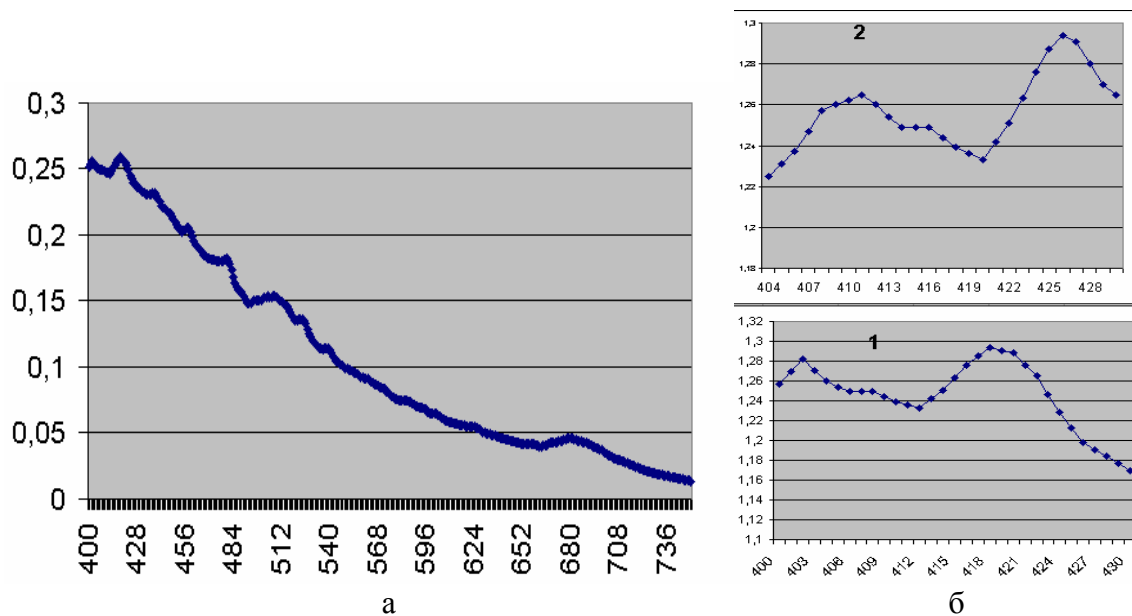


Рис.1 Спектры люминесценции разных сортов кофе: а) типовой спектр люминесценции кофе; б) тонкая структура спектров двух различных сортов кофе

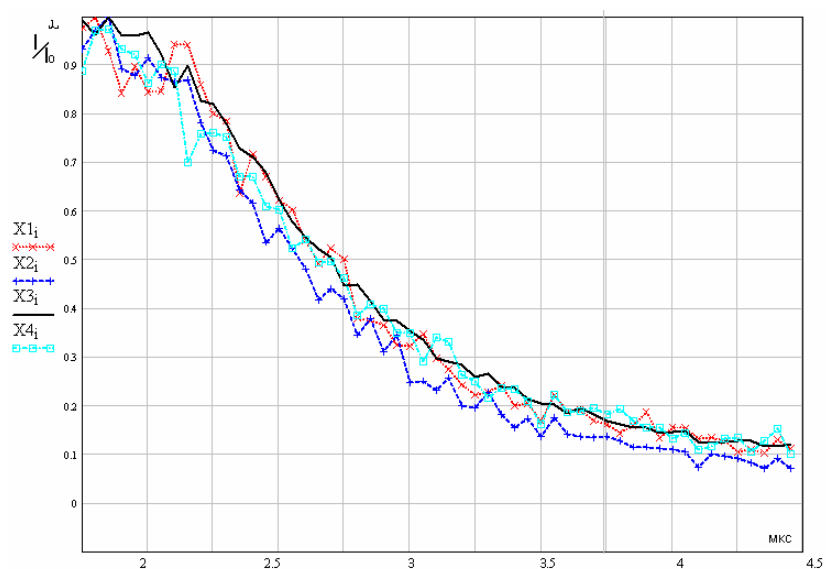


Рис. 2 Кинетика затухания фотолюминесценции образцов

Из полученных результатов видно, что сорта натурального кофе отличаются друг от друга по длительности процесса затухания люминесценции, что свидетельствует о различиях в составе этих образцов.

Обработка кривых кинетики фотолюминесценции методом наименьших квадратов дала значения аппроксимирующих коэффициентов, представленные в таблице.

Таблица

№ образца	Сорт кофе	Показатель затухания люминесценции τ , мкс.
1	Premium, натуральный кофе	2,8
2	Jacobs, растворимый кофе	2,9
3	Жокей, натуральный кофе	2,9
4	Nescafe, растворимый кофе	3,0

Заключение

В результате можно сформировать двумерное признаковое пространство, в котором расстояние между двумя различными образцами будет вычисляться по формуле

$$R = \sqrt{\Delta\tau^2 + \Delta\lambda^2} \quad \left| \begin{array}{l} R = \Delta\tau \\ R = \Delta\lambda \end{array} \right.$$

При этом эффективность распознавания повышается по сравнению с методиками, в которых используется одномерное признаковое пространство (рис.3).

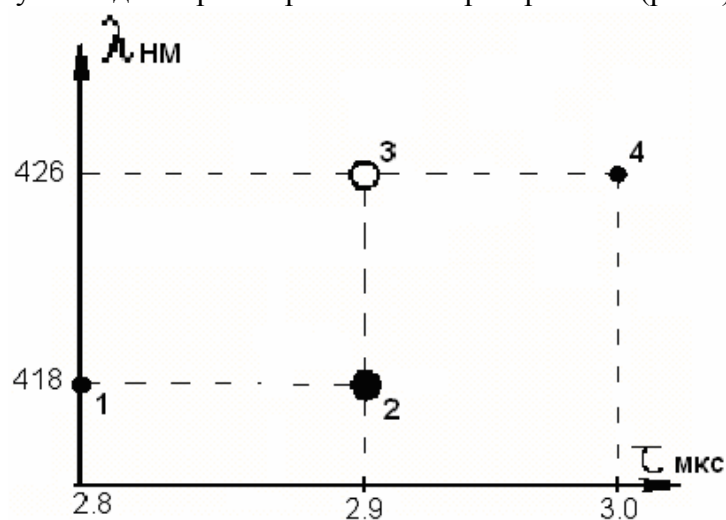


Рис. 3 Двумерное признаковое пространство

Таким образом, использование двух признаков классификации позволяет достаточно надежно определить сорт кофе.

Литература

1. Лёвшин Л.В., Салецкий А.М. Люминесценция и ее измерение: молекулярная люминесценция. М.: Изд-во МГУ, 1989.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА, ОТРАЖЕННОГО ЛАКОКРАСОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Н.В. Павлова, В.Т. Прокопенко, В.А. Трофимов

В статье рассматриваются результаты исследования состояния поляризации света, отраженного нитроэмалевыми покрытиями, в сравнении с подобными характеристиками природных объектов. Установленные различия предлагается использовать для построения изображения, основанного на поляризационном контрасте объекта и фона. Утверждается, что такого рода техника позволит повысить достоверность обнаружения окрашенных таким образом объектов на фоне подстилающей среды.

Введение

В практике приборостроения часто возникает необходимость решения двух противоположных задач: задачи обнаружения объекта на фоне окружающей среды и обратной ей задачи, связанной с необходимостью камуфляжа объекта, снижающей вероятность его обнаружения.

Такие проблемы могут возникать, например, в системах неразрушающего контроля качества, требующих выделения неоднородности физико-технических параметров изделия, либо в системах обнаружения и локации, предназначенных для распознавания искомым объектов (цели) на фоне естественной среды, как, например, пашни, подлеска, травы и т.д. В подавляющем большинстве известных устройств, решающих эту задачу, используется принцип измерения мощности сигнала, определяемой свойствами отражающей поверхности объекта и фона, на котором этот объект находится [1]. Вследствие возможного сходства отражательной способности искусственных и естественных объектов выделение цели (неоднородности) на фоне подстилающей среды (на общем фоне) либо соизмеримых с ней естественных образований может быть затруднено. Такого рода ситуация определяет необходимость поиска дополнительных отличительных признаков, одним из которых может служить поляризация отраженного излучения.

Действительно, если рассматривать наиболее часто используемые способы описания векторных характеристик световой волны, то можно заметить, что энергетическая характеристика – интенсивность – является лишь одним из параметров, отображающих полную характеристику поляризации [2]. Дополнив информацию об объекте, построенную на основе энергетических характеристик, информацией, использующей векторные характеристики световой волны, можно либо существенно увеличить вероятность обнаружения объекта, либо разработать меры, резко снижающие этот показатель в зависимости от условий решаемой задачи.

Постановка задачи

Характеристики света, отраженного шероховатой поверхностью, определяются матрицами рассеяния объекта и фона. Элементы этих матриц являются функцией длины волны падающего излучения, углов падения и отражения, состояния поляризации падающей волны и физических характеристик отражающей поверхности, таких как форма, шероховатость, однородность и т.п. свойства [3]. Отличающиеся между собой матрицы рассеяния объекта и подстилающей среды могут определять различие состояния поляризации в отраженных ими лучах при одинаковой поляризации падающих. При локации диффузно-отражающей поверхности отраженный сигнал частично поляризован. Степень поляризации сигналов отраженных фоном и объектом может быть различна. Этот факт целесообразно использовать при построении оптических систем выделения изображения объектов на фоне подстилающей среды на основе поляризационного контраста. Кроме того, полезная информация об отражающих поверхностях содержится и в полностью поляризованной составляющей отраженного излучения, кото-

рая может быть использована для повышения достоверности рассматриваемой информации

Задача энергетического обнаружения характерна тем, что мощность сигнала, равная разности мощностей излучений, отраженных объектом и фоном $\Delta P = P_o - P_\phi$, достигает такого порогового значения, когда на индикаторе с заданной вероятностью фиксируется лишь наличие в области обзора объекта без различия его формы и деталей. На практике же пользуются не абсолютным, а относительным ее значением, так называемым пороговым контрастом при нулевой пространственной частоте,

$$k = \frac{(P_o - P_\phi)}{P_\phi}, \quad (1)$$

где P_o – мощность сигнала объекта, P_ϕ – мощность сигнала фона. Подобное определение контраста может быть применено не только для интенсивности света, но и для каждого параметра поляризации отдельно, так что

$$k = \frac{(P_{io} - P_{i\phi})}{P_{i\phi}}, \quad (2)$$

где P_i – параметры вектора Стокса, $i = 1, 2, 3, 4$. Матрица рассеяния является одной из важнейших и наиболее полных характеристик объекта, определяющих состояние поляризации в отраженном пучке, однако конкретный вид ее известен лишь в немногих случаях.

Процесс обнаружения, как правило, строится по принципу сравнения информации, приходящей от наблюдаемого объекта, с информацией, хранящейся в памяти системы обнаружения. Для заполнения памяти системы обнаружения, основанной на энергетической локации, выполнены долгосрочные измерения альбеда различных естественных образований. При этом тщательно измерены процессы рассеяния естественного света в зависимости от различных факторов, таких как склонения естественных источников освещения, их характера, времени года, характеров объектов и т.п. Подобная информация, связанная с поляризационными свойствами объектов, практически отсутствует. В этой связи представляют интерес измерения, позволяющие поместить в память распознающих систем информацию о поляризационных свойствах объектов, подлежащих обнаружению.

Одним из наиболее распространенных искусственных объектов, подлежащих обнаружению, может быть поверхность, покрытая лакокрасочным покрытием. Примером тому могут быть различного рода гражданская и военная техника, жилые и производственные постройки и т.п., расположенные на естественном фоне.

Описание экспериментальных исследований

Определение контраста в соответствие с (2) предполагает наличие априорных сведений о поляризационных характеристиках объекта и фона, причем достаточным условием является отличие по одному из параметров. Для проверки изложенных предположений и отработки методики измерений выполнены исследования поляризационных свойств образцов, представляющих собой дюралевые пластины (прокат), покрытые нитроэмалевым покрытием, выполненным по технологии естественного высыхания.

Исследования выполнены на поляриметре, позволяющем осуществить измерения по схеме нулевого метода [4] (см. рис.1).

Состояние поляризации света в падающем пучке определяется тем, что в качестве излучателя используется газовый лазер с анизотропным активным элементом. Особенностью такого излучателя является высокая степень линейной поляризации генерируемого излучения. Установленная на пути такой световой волны четвертьволновая пластинка позволяет с помощью изменения ее азимута задаваться различными формами

поляризации. Сформировав таким образом циркулярно-поляризованное излучение и установив на его пути линейный поляризатор, можно формировать в падающем луче различные формы линейно поляризованного излучения, отличающиеся значениями азимутов. Для анализа отраженного от исследуемого образца излучения используется гониометр с установленными на алидаде анализатором, четвертьволновой пластинкой и поляризационно-нечувствительным фотоприемником. Анализатор можно установить с четырьмя значениями азимутов 0° , 90° и 45° , -45° , а фазовую пластинку можно либо вывести из схемы измерений, либо установить с азимутами 0° и 90° . Определение нулевого положения элементов схемы проводится с помощью модулятора Фарадея и резонансного усилителя по известной методике наблюдения в составе регистрируемого фототока наличия или отсутствия первой гармоники [4].

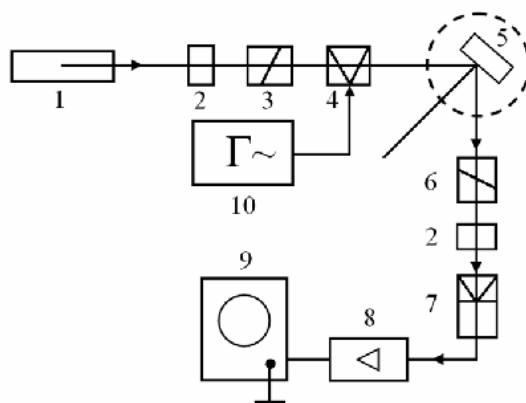


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1. Лазер. 2. Четвертьволновая пластинка. 3. Поляризатор. 4. Модулятор Фарадея. 5. Образец. 6. Анализатор. 7. Фотоприемник. 8. Узкополосный усилитель. 9. Осциллограф. 10. Звуковой генератор

Матрица рассеяния рассматриваемых образцов может быть представлена в виде:

$$M = \begin{vmatrix} 1 & m_{12} & 0 & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{44} \end{vmatrix}, \quad \begin{aligned} \tilde{m}_{ik} &= \frac{m_{ik}}{m_{11}} \\ m_{21} &= m_{12} \end{aligned} \quad (3)$$

Экспериментально выявленная зависимость элементов матрицы рассеяния от угла наблюдения, представленная в таблице для двух образцов, позволяет определить характер изменения отдельных параметров Стокса при отражении света с различными типами и формами поляризации в соответствии со следующим правилом:

$$S_1 = I_x + I_y, \quad S_2 = I_x - I_y, \quad S_3 = I_{45^\circ} - I_{-45^\circ}, \quad S_4 = I_{45^\circ} - I_{-45^\circ},$$

где I_i – интенсивность пучка света, прошедшего определенным образом ориентированные поляризационные элементы [5].

θ	m_{12}		m_{22}		m_{33}		m_{44}	
	1	2	1	2	1	2	1	2
-25°	0,04	0,05	0,2	0,25	-0,18	-0,16	-0,1	-0,01
0°	-0,05	-0,05	0,25	0,29	-0,2	-0,22	-0,11	-0,09
25°	-0,37	-0,33	0,5	0,51	-0,16	-0,17	0	-0,09
56°	-0,36	-0,48	0,72	0,77	0,09	0,12	0,11	0,14
72°	0,06	0	0,6	0,59	0,1	-0,06	0,12	-0,04

Таблица. Экспериментально выявленная зависимость элементов матрицы рассеяния от угла наблюдения

Выбор образцов определялся возможностью исследования наиболее распространенных нитроэмалевых защитных покрытий, выполненных при разных температурных режимах естественной сушки.

Пример расчета, представленный на рис. 2, выполнен на основе полученных экспериментальных данных.

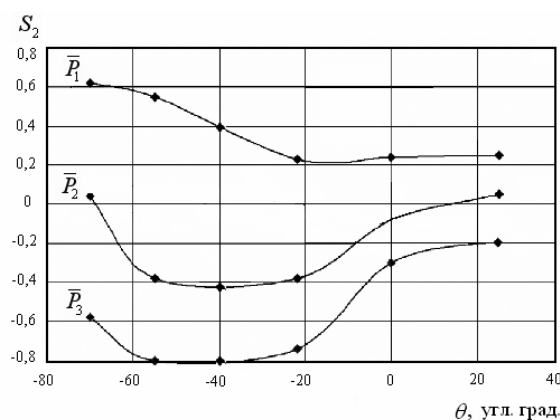


Рис. 2. Изменение второго параметра Стокса S_2 от угла наблюдения θ при отражении света от образца №1 для различных состояний поляризации света в падающем пучке: горизонтальная линейная поляризация $\bar{P}_1 = \{1, 1, 0, 0\}$; линейная поляризация с азимутом $+45^\circ$: $\bar{P}_2 = \{1, 0, 1, 0\}$; циркулярно-поляризованное излучение: $\bar{P}_3 = \{1, 0, 0, 1\}$.

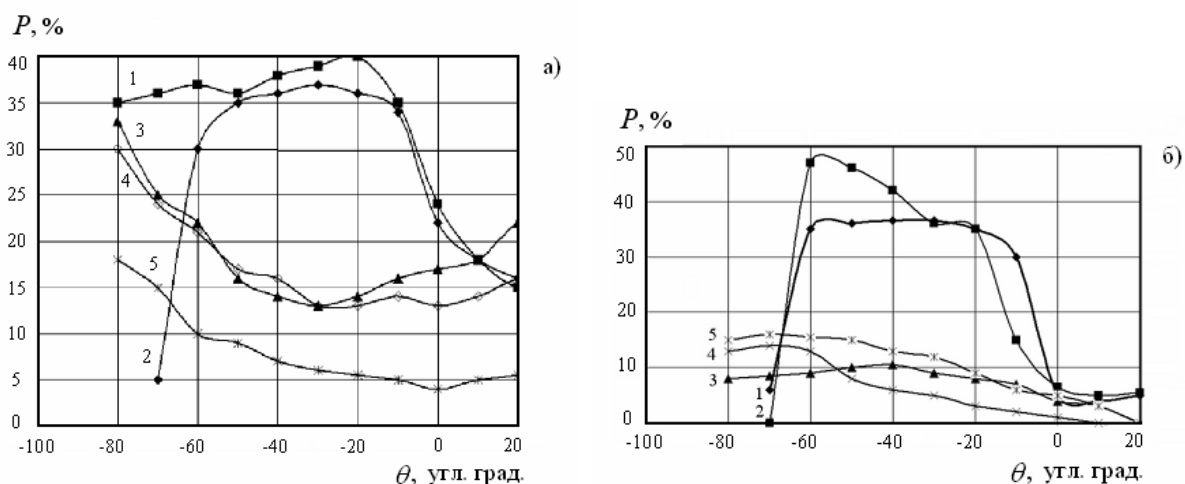


Рис. 3. Зависимость степени поляризации P отраженного света от угла падения θ . Поляризация падающего света: а) – линейная; азимут 45° , б) – естественная. $\lambda = 520$ нм, угол падения 70° . 1 – образец №1; 2 – образец №2; 3 – земля; 4 – пустыня; 5 – речной песок

Анализ результатов демонстрирует ярко выраженную зависимость поляризационных характеристик полностью поляризованной компоненты отраженного света (параметров вектора Стокса) от угла наблюдения, при этом различие в поведении отдельных параметров особо заметно в диапазоне 40–50 угл. град. К сожалению, воспользоваться этой особенностью для повышения достоверности обнаружения объекта не всегда возможно. Свойства отражающих поверхностей зачастую таковы, что доля полностью поляризованной компоненты после отражения даже полностью поляризованного света становится ничтожной. В этом случае особую важность может иметь такая поляризационная характеристика, как степень поляризации света. Пример расчета зависимости

степени поляризации света, отраженного исследуемыми образцами, в сравнении с данными из работы [6] представлен на рис 3.

Рассматриваемые зависимости показывают, что для широкой области углов наблюдения выявлено заметное различие степени поляризации света, отраженного от естественных объектов и исследуемых образцов. В среднем эти различия составляют тридцать процентов для диапазона углов в сорок пять градусов, при этом контраст представляет заметное значение порядка 2,5–3, что, безусловно, позволяет использовать этот фактор в целях повышения вероятности обнаружения.

Заключение

Рассмотрена возможность построения изображения объекта на основе поляризационного контраста с подстилающей средой (фоном). Для обоснования высказанного предположения выполнены измерения поляризации света, отраженного от нитрозмалевого покрытия, позволившие отработать методику измерений и рассмотреть различие поляризационных характеристик образцов и естественных покрытий. Установленные различия состояния поляризации полностью поляризованных компонент и степени поляризации отраженного света подтверждают обоснованность высказанного предположения и могут быть использованы для повышения вероятности обнаружения объектов с нитрозмалевыми покрытиями на фоне подстилающей среды.

Литература

1. Волохатюк В.А. , Вопросы оптической локации. М.: Сов. радио, 1971.
2. Аззам Р. Башара Н., Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.
3. Орлов В.М., Элементы теории светорассеивания и оптическая локация. Новосибирск: Наука, 1982.
4. Горшков М.М. Эллипсометрия. М.: Сов. радио, 1974. 200 с.
5. Дитчберн Р. Физическая оптика. М., Наука, 1965. 632 с.
6. Nand C.R., Nagaraja Rao. // Brit. J. Appl. Phys. {J. Phys. D}. 1968. V.2. P.1191

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ИСКАЖЕНИЯ, ВНОСИМЫЕ СОБИРАЮЩЕЙ ЛИНЗОЙ

М.С. Ерофеева, А.Л. Дмитриев

Кратко рассмотрены искажения поляризации света фокусирующими оптическими элементами. Выполнен расчет поляризационных помех, вносимых собирающей линзой. Показана критическая (четвертая степень) зависимость мощности ортогональной компоненты поляризации излучения, возникающей при его прохождении через линзу, от числовой апертуры линзы. Результаты проведенного анализа могут быть полезны при разработке аппаратуры высокоточной поляриметрии волноводных оптических элементов.

Введение

Предельная чувствительность различных оптических измерителей и датчиков интерферометрического типа, например, волоконно-оптических гироскопов и тензометров, может быть достигнута лишь при тщательных коррекции и контроле поляризации излучения, распространяющегося в контуре волноводного интерферометра. Ввод излучения в волоконный или интегральный оптический интерферометр часто производится с использованием фокусирующих устройств (шариковых линз, микрообъективов, граданов), поэтому нежелательная поляризационная помеха возникает уже на стадии возбуждения оптических волноводов, вследствие поляризационных искажений, вносимых фокусирующими элементами.

В современных высокоточных, в том числе волоконных, поляриметрах нередко используются фокусирующие элементы, которые также изменяют состояние поляризации исследуемого излучения. В связи с этим анализ поляризационных искажений, вносимых фокусирующими оптическими устройствами, весьма актуален, и этим вопросам посвящен ряд теоретических исследований [1-4].

Так, в [2] рассмотрены искажения поляризационной структуры волнового фронта при прохождении линейно поляризованного света через различные оптические элементы – линзу, линзу с децентрировкой, брюстеровскую пластинку. В [3] предложена математическая модель для расчета поляризационных aberrаций оптических элементов с целью определения характеристик собственных поляризационно-неоднородных волн в оптическом резонаторе, содержащем такие элементы. Точный расчет поляризационных aberrаций в общем случае затруднителен, поэтому для практических расчетов используется ряд приближений [3].

В настоящей работе рассмотрены поляризационные искажения, вносимые тонкой положительной линзой, и получено выражение для относительной величины мощности излучения, преобразуемого линзой в моду с ортогональным типом поляризации, и выполнены численные оценки величины таких искажений.

Расчет поляризационных искажений

Рассмотрим лучевой метод, позволяющий получить простую аналитическую формулу для расчета искажений поляризации при прохождении линейно поляризованного света через фокусирующую линзу.

На рис. 1, 2. показаны используемые геометрические обозначения. Основными параметрами здесь являются фокусное расстояние f линзы и световой диаметр падающего светового пучка $2h$.

Рассмотрим изменение поляризации света, линейно поляризованного вдоль оси y (рис. 2.), при прохождении через тонкую линзу. Из формул Френеля [5] для луча света, преломленного линзой в точке с полярными координатами (h, α) , прямо следует отно-

шение амплитуд компонент электрического поля, параллельной ($T_{\parallel}$) плоскости падения и перпендикулярной ($T_{\perp}$) к ней для области углов $0 \leq \alpha \leq 45^\circ$:

$$\frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}} = \cos(\theta_i - \theta_t) \operatorname{tg} \alpha. \quad (1)$$

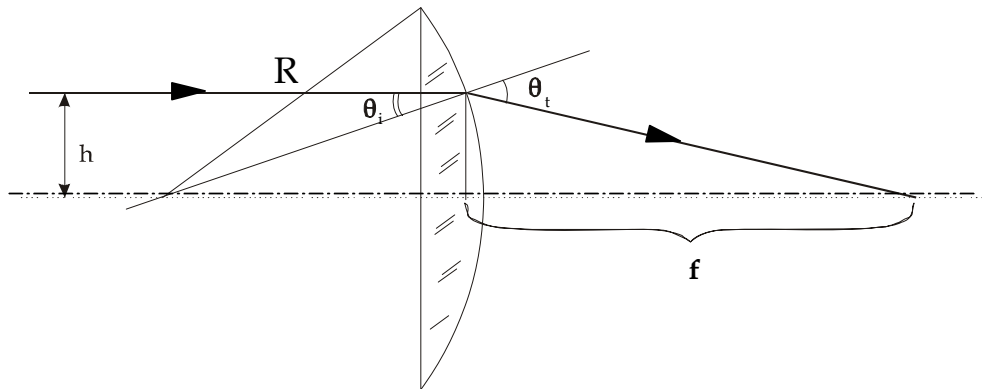


Рис. 1. Прохождение излучения через плосковыпуклую линзу; h – полярный радиус направляемого луча, R – радиус кривизны линзы, f – фокусное расстояние линзы, θ_i и θ_t – углы падения и преломления лучей света, соответственно

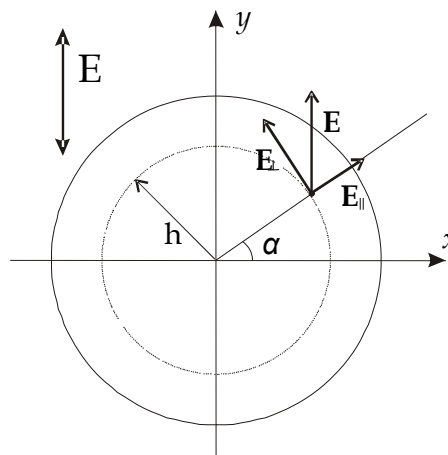


Рис. 2. Ориентация плоскости линейной поляризации излучения в плоскости линзы; α – азимутальный угол, $E_{\perp}$ и $E_{\parallel}$ – азимутальная и радиальная проекции вектора поляризации падающего излучения

При прохождении линейно поляризованного света границ раздела воздух-линза и линза-воздух изменения фазы световой волны в проходящем пучке не происходит, следовательно, тип поляризации излучения (например, линейная поляризация) не изменяется. При этом, в зависимости от величины углов падения θ_i , изменяется соотношение амплитуд параллельной и перпендикулярной компонент электрического поля. Это соответствует вращению плоскости поляризации прошедшего оптического излучения. Выполняется равенство

$$\operatorname{tg}(\alpha + \gamma) = \frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}} = \cos(\theta_i - \theta_t) \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

где γ – малый угол поворота плоскости поляризации (полагаем $\gamma \ll 1$).

Выражая угол падения θ_i через фокусное расстояние f и полярную координату луча h , в приближении малых углов $\alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$ получим для угла вращения

$$\gamma \approx -\frac{1}{4} \frac{h^2}{f^2} \operatorname{tg} \alpha. \quad (3)$$

Здесь характерна квадратичная зависимость угла поворота γ плоскости поляризации от отношения (h/f) , при этом наибольшая величина угла γ достигается при $\alpha = 45^\circ$. На рис. 3. приведена расчетная зависимость величины угла поворота γ от азимутального угла α с использованием формулы (2) для различных значений (h/f) .

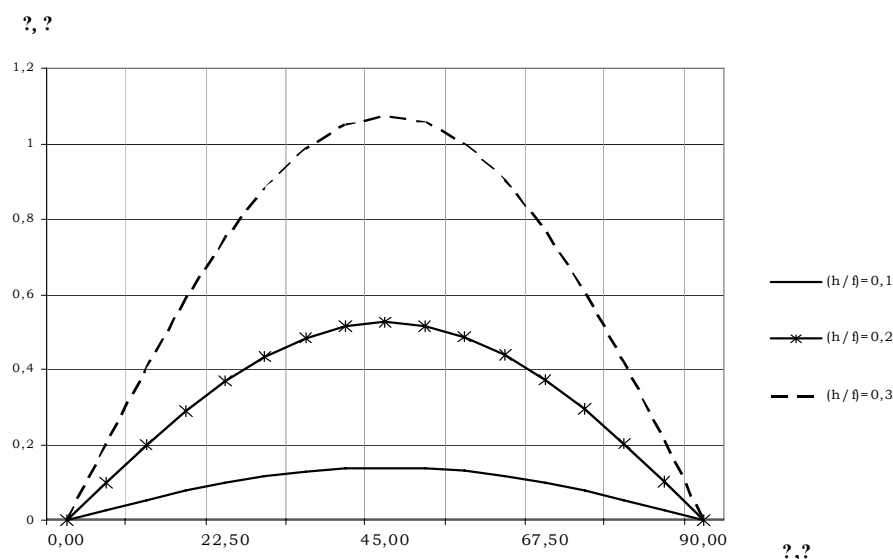


Рис. 3. Зависимость угла вращения γ плоскости поляризации линзой от азимута α и соотношения (h/f)

Общая картина расположения векторов поляризации в плоскости пучка света непосредственно за плосковыпуклой линзой, показана на рис. 4 (для наглядности угол поворота плоскости поляризации на рисунке значительно увеличен).

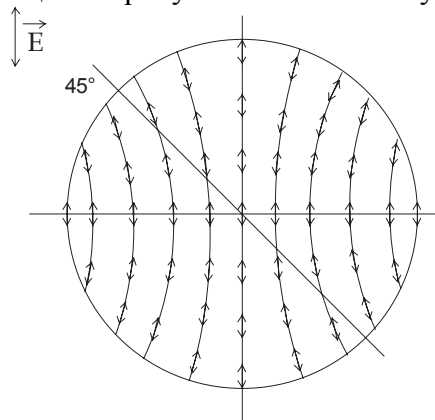


Рис. 4. Ориентация плоскостей линейной поляризации излучения в сечении пучка света, прошедшего плосковыпуклую линзу; поляризация падающего на линзу излучения – вертикальная

Полученные результаты хорошо согласуются с качественными картинками искажений поляризации, приведенными в [2, 3].

При прохождении линейно поляризованного излучения через двояковыпуклую линзу с одинаковыми радиусами кривизны угол поворота плоскости поляризации γ удваивается. Следует отметить, что фокусирующие объективы, применяемые на практике для ввода излучения в волноводные элементы, нередко имеют просветляющие интерференционные покрытия, содержат несколько склеенных линз, что в целом может повлиять на фазовые соотношения между падающей и прошедшей волнами в разных точ-

ках сечения выходного пучка. В таких случаях состояние поляризации прошедшего светового пучка, вообще говоря, изменяется – приобретает эллиптичность, величина которой зависит от величины сдвига фаз ортогональных компонент поляризации.

Для оценки поляризационных aberrаций объективов любой конфигурации без учета влияния промежуточных покрытий можно использовать выражения (2), (3), подставив вместо f величину эквивалентного фокусного расстояния $f_{\text{экв}}$; расчет для $f_{\text{экв}}$ приведен в [6].

Расчет относительной мощности излучения, переходящего в ортогональную поляризационную моду

При прохождении линейно поляризованного излучения через линзу, как показано выше, преломленная волна приобретает ортогональную составляющую, которая при фокусировке излучения в волновод будет возбуждать в нем нежелательную поляризационную помеху. Оценим величину мощности излучения, переходящего в ортогональную поляризационную моду волновода.

Электрическая компонента поля оптического излучения E_0 , падающего на линзу, представляется векторной суммой ортогональных векторов $E_{\parallel}$ и $E_{\perp}$, при этом для величин векторов выполняется $E_{\parallel}^2 + E_{\perp}^2 = E_0^2$. Учитывая, что угол поворота плоскости поляризации γ мал ($\gamma \ll 1$), амплитуда ортогонально-поляризованной моды равна $E_{\perp} = \gamma \cdot E_0$. Рассмотрим элемент площади dS прошедшего светового пучка в плоскости фокусирующей линзы: $dS = h dh d\alpha$. Дифференциал $dP_{\perp}$ мощности прошедшего излучения, переходящего в ортогональную моду, в точке наблюдения с полярными координатами h, α (см. рис. 2.) положим равным

$$dP_{\perp} = |E_{\perp}|^2 dS = E_0^2 \gamma^2 dS. \quad (4)$$

Тогда величина η относительной мощности излучения, переходящей в ортогональную поляризационную моду для плосковыпуклой линзы равна

$$\eta = \frac{E_0^2 \int \gamma^2 dS}{E_0^2 \int dS} = \frac{\int_0^{D/2} \int_0^{2\pi} \gamma^2(h, \alpha) h dh d\alpha}{\pi (D/2)^2}, \quad (5)$$

где D – световой диаметр объектива или линзы (подразумевается, что падающее излучение полностью заполняет апертуру объектива).

Расчет величины поляризационной помехи η при использовании точного выражения (2) затруднителен, но для большинства практических оценок можно воспользоваться приближенным выражением (3). При этом интеграл (5) приводится к простой аналитической формуле

$$\eta = \frac{8 \int_0^{D/2} \int_0^{\pi/4} \gamma^2(h, \alpha) h dh d\alpha}{\pi (D/2)^2} = \frac{\int_0^{D/2} \int_0^{\pi/4} \left[h \left(\frac{h}{f} \right)^4 \text{tg}^2 \alpha \right] dh d\alpha}{2\pi (D/2)^2}, \quad (6)$$

где, выполняя интегрирование, получаем:

$$\eta \approx \frac{\pi}{12} \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{D}{2f} \right)^4 = 0,056 \cdot \left(\frac{D}{2f} \right)^4. \quad (7)$$

Величину η относительной мощности помехи удобно выразить в децибелах:

$$\tilde{\eta} = -10 \cdot \lg \eta. \quad (8)$$

В таблице приведены численные значения поляризационных помех (в децибелах) для различных величин $D/2f$.

$D/2f$	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8
$\tilde{\eta}$, дБ	120	93	76	56	38

Таблица. Оценка величины поляризационных помех, вносимых линзой, в зависимости от соотношения $D/2f$

В [3] приведены рекомендации по уменьшению и компенсации поляризационных aberrаций оптических резонаторов. В высокоточной поляриметрии методы, предлагаемые в [3], не могут быть использованы, так как здесь обычным является требование высокой степени линейной поляризации излучения, вводимого в волновод. Полученные в настоящей работе формулы и расчетные данные позволяют при заданном уровне поляризационной помехи определить величину относительного отверстия линзы-объектива, используемого при возбуждении волоконного либо интегрально-оптического волновода.

Заключение

При вводе излучения в оптические волноводы применяются фокусирующие линзы, которые изменяют состояние поляризации излучения и обуславливают возбуждение нежелательных поляризационных помех.

В настоящей работе

- выполнен анализ искажений поляризационной структуры линейно поляризованного пучка света при его прохождении через собирающую линзу;
- на основе формул Френеля получено выражение для величины угла вращения плоскости поляризации в различных точках сечения светового пучка;
- показано, что поляризационные aberrации существенно возрастают при увеличении апертуры падающего излучения и уменьшении фокусного расстояния линзы;
- получено выражение для расчета относительной мощности излучения, преобразуемого линзой в моду с ортогональной поляризацией.

Литература

1. Котов О.И., Лиокумович Л.Б. и др. Использование интерференции для измерения поляризационных характеристик двулучепреломляющих световодов в когерентных оптических системах. // Письма в ЖТФ. 2004. Том 30. Вып. 12. С. 62–69
2. Соколов А.Л. Трансформация поляризационной структуры лазерного излучения в оптических системах // Оптика и спектроскопия, 2003, том 95, № 5, с. 869–873
3. Соколов А.Л. Поляризационные aberrации лазерного излучения. // Оптика и спектроскопия. 2000. Т. 89. № 3. С. 512–518.
4. Bahmann K., Hell S. W. Depolarization by high aperture focusing // Applied Physics Letters. 2000. V. 77. № 5. P. 612–614.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Изд. 2-е, М.: Наука, 1973, 720 с.
6. Кругер М.Я., Панов В.А., Кулагин В.А. и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Изд. 2-е, Л. Машиностроение, 1968, 760с.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ ЗАГРУЗЧИК С ГРАФИЧЕСКИМ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИМ ИНТЕРФЕЙСОМ ДЛЯ УМК SDK1.1

Ю.В. Китаев

Лабораторный практикум при изучении курса «Электроника и микропроцессорная техника» обычно проводится с использованием специализированных учебных микропроцессорных и микроконтроллерных комплексов или УМК. На кафедре электроники используются УМК на базе микроконтроллеров семейств 68HC08, ATmega и MCS51[1]. Последнее семейство представлено УМК SDK1.1, выпускаемым ООО «ЛМТ» на основе микроконтроллера (микроконвертора) ADuC812. УМК имеет необходимый набор стандартных внешних устройств (матричная клавиатура, ЖК дисплей, набор светодиодов, пьезокерамический динамик и т. д.). В поставке присутствует также программа «Инструментальный загрузчик» для работы в командной строке Windows, к недостаткам которого можно отнести отсутствие графического пользовательского интерфейса, а также ряд мелких неудобств.

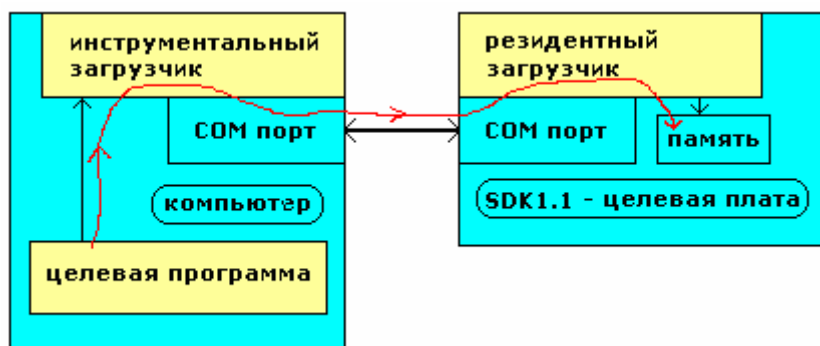


Рис.1. Схема работы загрузчика

Назначение инструментального загрузчика – доставка на целевую или рабочую плату – систему (в нашем случае в учебный лабораторный комплекс SDK1.1) целевой (пользовательской) программы для микроконтроллера в специальном Intel'овском HEX формате (рис. 1). Целевую программу пишет студент для каждого конкретного применения системы на основе того или иного микропроцессора или микроконтроллера (например, ADuC812). Загрузка целевой программы в память SDK1.1 и ее выполнение позволяет оценить и работоспособность целевой программы, и работоспособность всей системы.

В процессе выполнения лабораторной работы студент неоднократно производит загрузку рабочей программы через инструментальный последовательный порт. В некоторых заданиях необходимо доставлять на компьютер результаты измерений или принимать команды. Для этих целей может использоваться как инструментальный последовательный порт, так и дополнительный рабочий. Поэтому умение писать программы взаимодействия УМК с ПК является необходимым навыком при разработке измерительно-управляющих комплексов.

Разработка инструментального загрузчика включает знание протокола обмена информацией, заложенного в резидентный загрузчик, располагающийся в ПЗУ целевой платы.

При инициализации системы, во время включения источника питания или при нажатии на кнопку «RESET» резидентный загрузчик с интервалом в 200 мсек посылает в компьютер символ «.» – приглашение к передаче строки HEX файла целевой программы. В ответ инструментальный загрузчик передает одну строку HEX файла, в том числе два завершающих символа любой текстовой строки – это символ «возврат каретки (CR)– код 0D» и «перевод строки (LF) – код 0A». После приема каждой HEX-строки резидентный загрузчик вычисляет контрольную сумму и, если она совпадает с принятой, посылает инструментальному загрузчику символ «+», если не совпадает, «-», что указывает на ошибку при передаче HEX-строки. Далее, при безошибочном приеме строки резидентный загрузчик снова посылает уведомление «.», и все повторяется снова. После приема HEX-строки со стартовым адресом 02XXXX060000SS резидентный загрузчик прекращает отправку «.» и передает управление по адресу XXXX, т.е. запускает целевую программу на выполнение.

Разработку программы инструментального загрузчика можно производить с использованием любой подходящей среды программирования, например Microsoft Visual Studio, Delphi, Java Builder и т.п. Остановимся на Microsoft Visual Basic'e (VB) [2], входящем в состав Microsoft Visual Studio. VB позволяет студенту быстро написать требуемую программу и легко импортировать сторонние библиотеки с набором нужных компонентов в течение одного лабораторного занятия. В процессе выполнения работы студент должен определить набор необходимых органов управления и отображения в основном окне (форме) загрузчика (рис. 2).

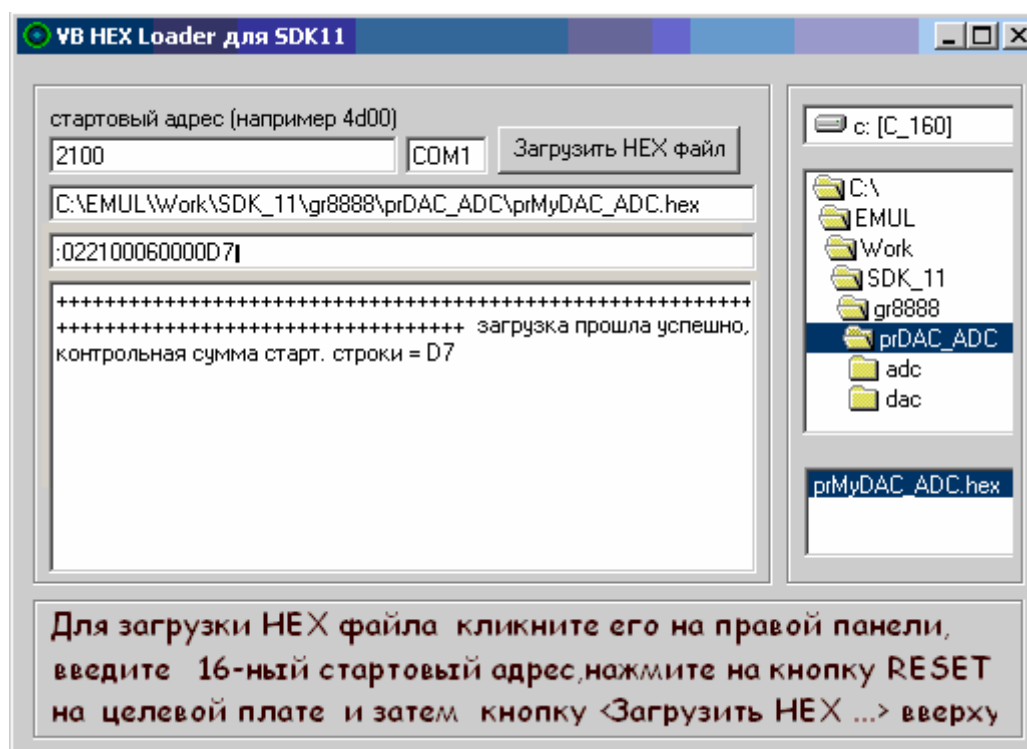


Рис.2. Основное окно загрузчика

Все рабочее пространство формы условно разделено на три области (панели). В левой расположены рабочие текстовые окна и командная кнопка. На правой панели ра-

сполагаются органы управления и отображения для работы с файловой системой. На нижней панели отображена краткая последовательность действий.

Вся основная работа по пересылке HEX-файла будет производиться при нажатии на кнопку «Загрузить HEX файл в SDK1.1». Назначение большинства текстовых окон видно из рис.2. В верхнем левом текстовом окне студент записывает стартовый адрес рабочей программы в ОЗУ целевой платы. Этот адрес (адрес стартового модуля ?C_C51STARTUP) в общем случае в процессе разработки при сборке программы изменится. Причем студенту его необходимо «выуживать» из специального файла карты памяти, а затем каждый раз снова записывать его в текстовое окно. Этот процесс чреват ошибками, поэтому в компоновщике целевой программы стартовый адрес указан в виде шестнадцатеричной константы, например 2100, и в дальнейшем студент его не меняет (рис. 3).

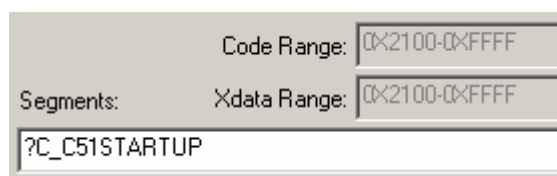


Рис.3. Стартовый адрес

В следующем текстовом окне (рис. 2) задается последовательный канал (COM порт), по которому производится загрузка HEX-файла. Два нижних окна отображают полный путь до загружаемого файла и текущую пересылаемую строку. Самое большое текстовое окно служит для отображения прогресса передачи и для вывода диагностических сообщений.

Основная работа выполняется обработчиком события Command1_Click, которое выполняется при нажатии на кнопку «Загрузить HEX-файл». Осуществляется проверка, заполнены ли соответствующие текстовые окна, а также корректность записей в них. В случае правильности записей открывается рабочий файл и деактивируется кнопка загрузки для исключения повторных запусков. Далее делается попытка установить канал связи и запускается таймер. Если через 0.5 секунды не будет установлена связь с лабораторным стендом, выводится диагностическое сообщение, и программа переходит в режим ожидания устранения причин отсутствия связи с целевой платой. Если обмен данными с УМК установлен, рабочая программа загружается в лабораторный стенд, и ей передается управление.

В процессе выполнения этой работы студент:

- приобретает навыки работы с распространенной интегрированной средой программирования, в том числе инструментальных средств проектирования МП устройств – MS Visual Studio,
- разрабатывает программное средство доставки кода на рабочую плату, которое затем будет использоваться во всех остальных лабораторных работах по изучению микроконтроллерных устройств на основе УМК SDK1.1.

Литература

1. Бродин В.Б., Калинин А.В.. Системы на микроконтроллерах и БИС программируемой логики. М.: ЭКОМ, 2002
2. Сайлер Б., Спотс Д.. Использование Visual Basic 6. М.: Вильямс, 1999.

ДИСТАНЦИОННОЕ ИНТЕРНЕТ-УПРАВЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫМ СТЕНДОМ ДЛЯ СНЯТИЯ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДОВ

Ю.В. Китаев

Возможность размещать учебно-методические материалы в системе ДО СПбГУ-ИТМО может использоваться и как средство получения образования дистанционным способом, и как компьютерная технология обучения. Открытость и универсальность Интернет-технологий позволяет реализовывать не только такие традиционные учебно-методические материалы, как электронные конспекты, виртуальные лаборатории, информационные ресурсы, обучающие и аттестующие тесты, но и дистанционные лаборатории, включающие в свой состав реальное инструментальное лабораторное оборудование и приборы.

Лабораторная установка в составе измерительно-вычислительного комплекса соединяется с сервером с помощью стандартного последовательного СОМ порта и взаимодействует с ним с помощью программного обеспечения для сбора и обработки данных. Такое ПО является естественной составной частью лабораторного комплекса. Студент с любого удаленного компьютера, имеющего выход в Интернет, загружает апплет или ActiveX объект, который, во-первых, устанавливает связь с лабораторной установкой и, во-вторых, обеспечивает функционирование, обмен данными, математическую обработку данных, визуализацию и документирование.

По данным различных публикаций [1], в которых отражены предпочтения в отношении подхода к построению систем сбора и обработки данных можно выделить устойчивую тройку лидеров среди языков, лежащих в основе таких решений: C/C++, Visual Basic и различные системы графического проектирования. Программный модуль, загружаемый на удаленный компьютер, содержит графическую виртуальную переднюю панель стандартного измерительного прибора или специализированного под конкретную задачу лабораторного стенда. Такой виртуальный стенд имеет все необходимые органы управления и измерительные приборы (осциллографы, мультиметры и др.). Для ускорения разработки программного обеспечения можно воспользоваться готовыми библиотеками виртуальных инструментов.

Основным узлом инструментального лабораторного стенда является микроконтроллерная система на базе МК Infineon C-501 (рис. 1) и двух преобразователей – АЦ и ЦА. На цифроаналоговый преобразователь подается линейно изменяющийся цифровой код. Напряжение с выхода ЦАП поступает на последовательную цепь – ограничительный резистор и исследуемый диод. Сигнал на аноде диода с помощью аналого-цифрового преобразователя снова преобразуется в код. Массивы значений напряжений на выходе ЦАП и входе АЦП по последовательному каналу поступают на сервер, откуда эти данные передаются на удаленный компьютер. Для разгрузки сервера все вычисления и обработка данных производятся на удаленном компьютере. Известное значение ограничительного резистора позволяет вычислить ток через диод при измеренном значении напряжения на диоде. Затем с помощью виртуального осциллографа характеристики отображаются на дисплее.

В процессе выполнения лабораторной работы студент дистанционно меняет (коммутирует) различные типы диодов. Полученные вольтамперные характеристики затем можно распечатать.

Программное обеспечение выполняемой лабораторной работы загружается из сервера с помощью браузера Internet Explorer. Выполнение работы возможно либо с математической моделью исследуемого прибора (диода), либо дистанционно с физическим образцом. В последнем случае связь клиентского компьютера и сервера лабораторной установки обеспечивается с помощью TCP/IP соединения. Сценарий работы

хранится на сервере в виде стандартного HTML файла с внедренным программным объектом, обеспечивающим всю функциональность лабораторной работы.

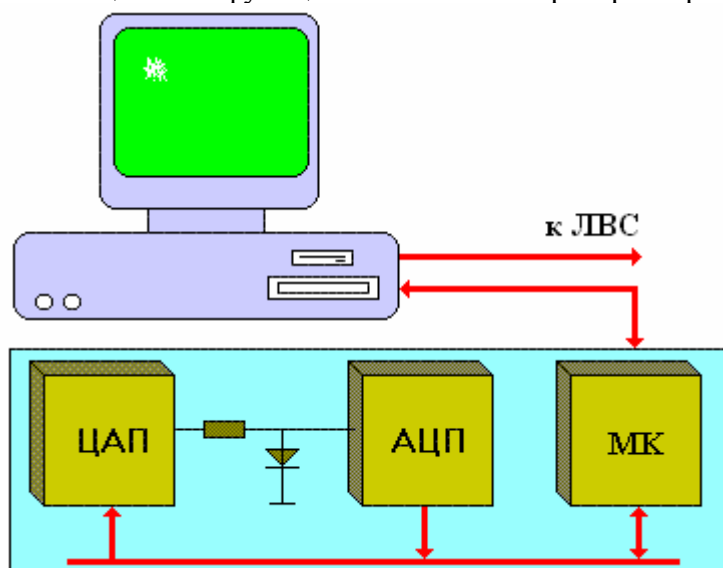


Рис. 1. Инструментальный лабораторный стенд

Профиль выполнения лабораторной работы фиксируется с помощью FTP-протокола на удаленном компьютере, где в начале сеанса работы создается временный файл с идентификационным номером студента, датой и временем начала работы. В процессе выполнения лабораторной работы студенту на определенных этапах предъявляются контрольные задания, по результатам выполнения которых выставляется промежуточная оценка. При выполнении задания текущего этапа оценка пересылается во временный файл, откуда может помещаться в базу данных. Помимо снятия вольтамперной характеристики виртуальный лабораторный стенд отображает передаточную характеристику ЦАП. Значения этой характеристики могут использоваться для коррекции полученных результатов.

Литература

1. Программное обеспечение для сбора и обработки данных. А. Курбатов. // Компоненты и технологии. №6. СПб: Изд-во «Finestreet», 2000.

МУЛЬТИСЕНСОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ
ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ

Т.Б. Соколов, А.Л. Матвеев

Одной из важнейших задач при обеспечении безопасности жизнедеятельности является контроль содержания вредных веществ в атмосфере. Наибольшее распространение получили однокомпонентные сигнализаторы и газоанализаторы, использующие электрохимические чувствительные элементы, характеризующиеся высокой селективностью. Применение таких приборов оправдано, когда можно определить качественный состав анализируемой среды; однако при возникновении аварийных ситуаций точный состав анализируемой среды, как правило, неизвестен. В этом случае решением поставленной задачи может быть применение так называемых «мультисенсорных» систем.

Идея мультисенсора состоит в использовании в составе первичного измерительного преобразователя (ПИП) нескольких однотипных чувствительных элементов, каждый из которых обладает чувствительностью к конкретной группе определяемых веществ, схожих по строению и свойствам. Как правило, для создания мультисенсорных систем используются электрохимические или полупроводниковые чувствительные элементы.

Возможность применения мультисенсора, построенного на базе полупроводниковых чувствительных элементов, для контроля большого числа органических веществ показана в работах [1–3].

В настоящей работе проводились исследования макета мультисенсорного газоанализатора с 4 полупроводниковыми чувствительными элементами (ПЧЭ), изготовленными по толсто пленочной технологии на основе оксида олова (SnO_2) с легирующими примесями (Pd, Co, Ag).

В отличие от классической схемы включения ПЧЭ с питанием нагревателя постоянным током [1], в макете используется импульсный режим нагрева с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Применение ШИМ позволяет уменьшить энергопотребление ПИП, а так же уменьшить время выхода на режим.

Управление нагревом ПЧЭ, а также сбор и обработка измерительной информации осуществляется с помощью управляющей программы «3GS» (разработка НПО «Прибор», Санкт-Петербург) и персонального компьютера.

Управляющая программа позволяет задавать мощность и длительность нагрева для каждого ПЧЭ, чем обеспечивается возможность точной настройки чувствительности. Сигнал задания с персонального компьютера поступает на контроллер А1 ($\mu\text{PSD3345D}$). Контроллер управляет блоком коммутации токов, формирующим импульсы тока для цепей нагрева ПЧЭ.

Выходным сигналом ПЧЭ является изменение сопротивления чувствительного слоя; измерительный сигнал усиливается блоком предварительных усилителей и передается на контроллер А2, осуществляющий преобразование измерительной информации в цифровую форму и обеспечивает передачу данных по интерфейсу RS 232 на персональный компьютер.

Известно, что на чувствительность ПЧЭ к конкретному определяемому компоненту или группе компонентов, схожих по строению и свойствам, кроме структуры и состава материала ПЧЭ, влияет температура каталитически активной поверхности [1–4]. Таким образом, изменяя мощность нагрева, можно достичь того, что каждый

ПЧЭ из состава мультисенсорного ПИП будет отвечать за «свою» группу определяемых компонентов.

В работе [5] проиллюстрирована возможность одновременного определения содержания аммиака и оксида углерода в воздухе с помощью одного ПЧЭ, работающего при двух различных значениях мощности нагрева.

Предварительные исследования макета мультисенсорного газоанализатора показали, что при контроле вредных веществ на уровне ПДК рабочей зоны существенное влияние на выходные сигналы ПЧЭ оказывает влагосодержание анализируемой среды.

Ввиду того, что в рабочих условиях эксплуатации относительная влажность анализируемой среды может меняться от 0 % до 98 %, задача компенсации влияния изменения влагосодержания приобретает первостепенное значение.

В ходе эксперимента были получены зависимости выходного сигнала от влагосодержания анализируемой среды для ПЧЭ, входящих в состав макета. Все экспериментальные исследования проводились при температуре анализируемой среды $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Перед каждой серией экспериментов проводился прогрев ПЧЭ при максимально допустимой мощности нагрева (так называемый «отжиг»).

Для проведения дальнейших расчетов экспериментальные данные по зависимости выходного сигнала от влагосодержания анализируемой среды для каждого ПЧЭ были аппроксимированы функцией вида

$$\Delta I_j^p = a + b \cdot \omega + c \cdot \omega^2, \quad (1)$$

где ω – относительная влажность анализируемой среды, %. Экспериментальные данные и графики аппроксимирующих кривых представлены на рис. 1.

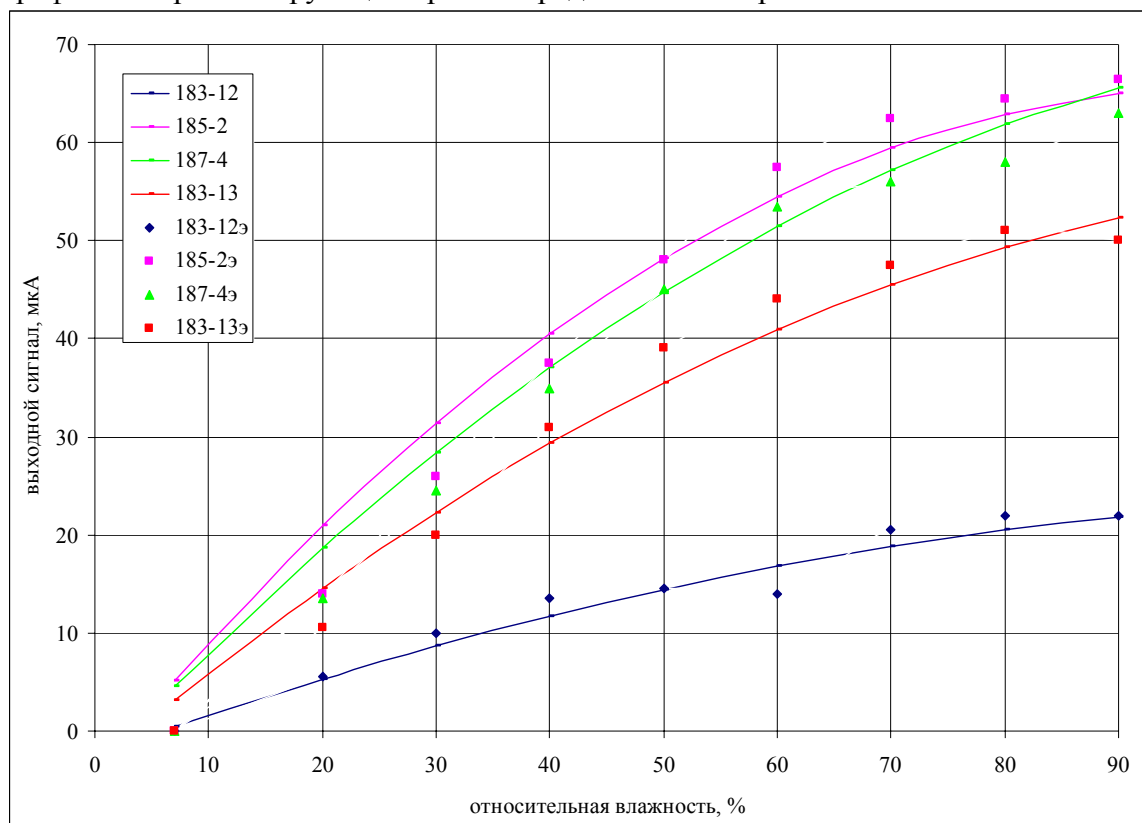


Рис. 1. Зависимость выходного сигнала ПЧЭ от влагосодержания анализируемой среды

Дополнительные исследования показали, что ПЧЭ № 185-2 при определенном значении мощности нагрева отличается повышенной чувствительностью к влажности при относительно небольшой чувствительности к оксиду углерода и аммиаку; можно

предположить, что выходной сигнал этого ПЧЭ можно использовать в качестве сравнительного для компенсации влияния изменения влагосодержания на выходной сигнал остальных ПЧЭ (рабочих) макета мультисенсора.

Расчет выходного сигнала ПЧЭ с учетом компенсации влияния влажности ΔI_j^{pk} , мкА, в этом случае будет проводиться по формуле:

$$\Delta I_j^{pk} = \Delta I_j - k_j(\omega) \cdot \Delta I_{cp}, \quad (2)$$

где ΔI_j – измеренное значение выходного сигнала j-го рабочего ПЧЭ, мкА; $k_j(\omega)$ – поправочный коэффициент для j-го рабочего ПЧЭ; ΔI_{cp} – выходной сигнал сравнительного ПЧЭ, мкА. Поправочный коэффициент для каждого рабочего ПЧЭ в диапазоне относительной влажности (0-100) % рассчитывается по формуле:

$$k_j(\omega) = \frac{\Delta I_j^p}{\Delta I_{cp}^p}, \quad (3)$$

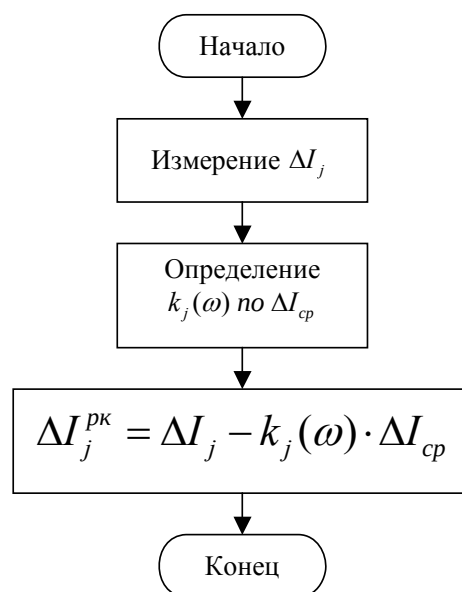


Рис. 2. Блок-схема алгоритма компенсации влияния изменения влагосодержания

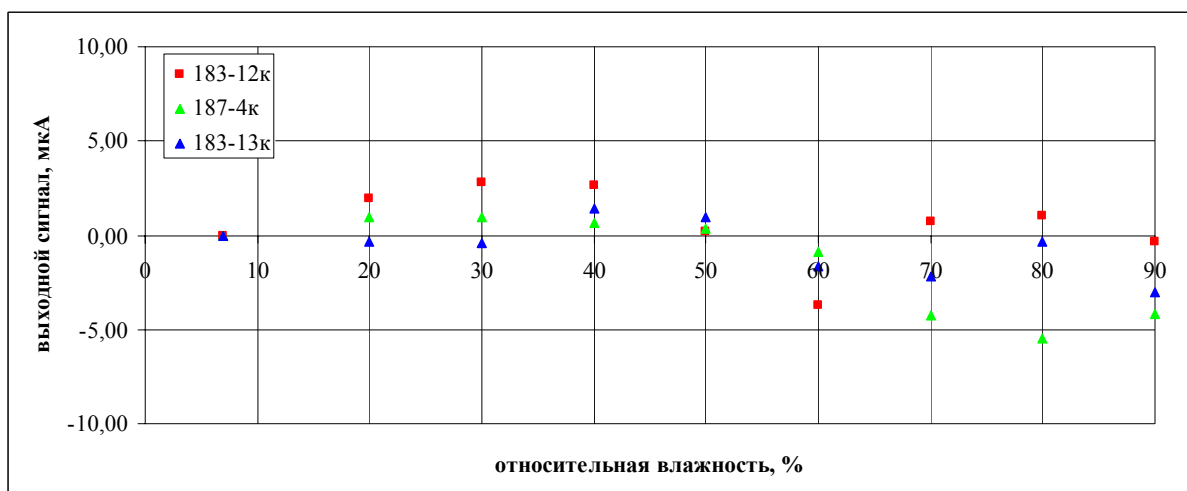


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала ПЧЭ от влагосодержания анализируемой среды с учетом компенсации

Блок-схема алгоритма компенсации влияния изменения влагосодержания приведена на рис. 2. При проведении измерений по выходному сигналу сравнительного ПЧЭ определяется соответствующее значение поправочного коэффициента для каждого рабочего ПЧЭ; расчет выходного сигнала проводится по формуле (2).

Результаты расчета компенсации влагосодержания по экспериментальным данным представлены на рис. 3. Как видно из результатов, приведенных на рис. 3, влияние изменения влагосодержания на выходной сигнал рабочих ПЧЭ значительно уменьшилось.

Проведенные исследования показывают возможность компенсации влияния изменения влагосодержания на выходной сигнал ПЧЭ в составе мультисенсорного газоанализатора и, следовательно, повышения достоверности измерительной информации о содержании определяемых компонентов в воздухе.

Литература

1. Максимович Н.П., Каскевич О.К., Максимович Р.А. и др. //Полупроводниковый детектор для обнаружения утечек газа из магистрали без разрытия грунта. // ЖАХ, 2003. Т. 58. № 1. С. 105–110.
2. Сенькин А.Е., Селезнев Б.И., Соколов А.В., Васильев А.А. //Микропроцессорный газоаналитический модуль. // Сенсор. 2004. № 2. С. 6–13.
3. Бельшева Т.В., Боговцева Л.П., Гутман Э.Е. Применение металлооксидных полупроводниковых гетеросистем для газового анализа. // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 2004. №2 (10).
4. Figaro: датчики газов. М.: издательский дом "Додэка-XXI", 2002. 64 с.
5. Соколов Т.Б., Матвеев А.Л. Метрологические исследования макета сигнализатора с полупроводниковым чувствительным элементом при определении токсичных газов. // Сборник докладов II Международной научно-практической конференции «Метрологическое обеспечение физико-химических и оптико-физических измерений», Киев, 2005.

ЭЛЕКТРОННЫЙ МЫЛЬНО-ПЛЕНОЧНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ МАЛЫХ РАСХОДОВ ГАЗА

А.Ю. Мурашкин, А.А. Евдокимов, С.А. Ваньчков

Рассмотрен принцип действия точного лабораторного измерителя, позволяющего в реальном масштабе времени определять и обрабатывать данные объемного расхода газа. Высокая точность измерений в широком динамическом диапазоне (от 1 см^3 до 30 дм^3) достигается благодаря функции обработки данных и использованию комплекта сменных ячеек, в зависимости от измеряемого расхода.

В современных условиях развития аналитического приборостроения проблема точного измерения малых расходов газовых потоков является особенно важной и требует наличия точного и высоконадежного оборудования. Определение малых расходов возможно несколькими основными способами, среди которых можно выделить первичные и вторичные (требующие калибровки) методы:

- гравиметрический метод;
- метод поршня с ртутным или графитовым уплотнением;
- колокольный метод;
- мыльно-пленочный метод;
- метод барабанного счетчика;
- тепловой метод;
- метод определения по разнице давления

Электронный мыльно-пленочный измеритель малых расходов газа (далее расходомер) представляет собой автономный, точный лабораторный измеритель объемного расхода газа в широком динамическом диапазоне от 1 см^3 до 30 дм^3 . Расходомер предназначен для измерения невзрывоопасного газа, не содержащего пары и механические частицы, вызывающие коррозию или обладающие абразивными свойствами.

Расходомер является малогабаритным лабораторным электронным прибором, позволяющим быстро и надежно проводить научные эксперименты и работы, связанные с применением газовых смесей, где требуются измерения расходов.

Основная область применения: при градуировке и поверке генераторов газовых смесей, наладки и подготовке к работе газоанализаторов, хроматографов и других средств газоизмерительной техники.

Принцип действия расходомера основан на измерении времени, за которое пленка поверхностно-активного вещества проходит калиброванный объем измерительной трубки. Объемом измерительной трубки является измеренный объем пространства между двумя парами инфракрасных датчиков. Время – интервал, который необходим для перемещения мыльной пленки между парами датчиков, ограничивающими объем. Соотношение объем – время является объемом прошедшего газа в единицу времени или объемным расходом газа.

Для обеспечения максимально возможной точности измерений данным методом расходомер оснащен функциями «среднее» и «удаление». Функция «среднее» позволяет рассчитать среднее арифметическое значение по результатам серии последовательных измерений, функция «удаление» – отбросить из обрабатываемой последовательности результат, полученной при плохо сформировавшейся пленке.

Технические характеристики расходомера.

Диапазоны измерений:

- | | |
|-----------------------------|--|
| - с малой ячейкой потока | от 1 до $250 \text{ см}^3/\text{мин}$; |
| - со средней ячейкой потока | от $20 \text{ см}^3/\text{мин}$ до $6 \text{ дм}^3/\text{мин}$; |
| - с большой ячейкой потока | от 2 до $30 \text{ дм}^3/\text{мин}$. |

Пределы допускаемой основной погрешности $\pm 5 \%$.

Номинальная цена единицы наименьшего разряда цифрового индикатора:

- | | |
|---|-----------------------------|
| - в диапазоне значений от 0,001 до 9,999 см ³ /мин | 0,001 см ³ /мин; |
| - в диапазоне значений от 10,00 до 99,99 см ³ /мин | 0,01 см ³ /мин; |
| - в диапазоне значений от 100,0 до 999,9 см ³ /мин | 0,1 см ³ /мин; |
| - в диапазоне значений от 1,000 до 9,999 м ³ /мин | 1 см ³ /мин; |
| - в диапазоне значений от 10,00 до 30,00 м ³ /мин | 10 см ³ /мин. |

Предел допускаемой вариации показаний, в долях предела допускаемой основной погрешности - 0,5.



Рис. 1. Внешний вид электронного мыльно-пленочного расходомера:
1 – контрольно-управляющий блок; 2 – сменная ячейка потока в составе генератора пленки; 3 – сенсорный блок; 4 – мыльный раствор

Конструктивно расходомер состоит из следующих узлов (рисунок 1):

- контрольно-управляющий блок (1);
- сменная ячейка потока в составе генератора пленки (2);
- сенсорный блок (3);
- мыльный раствор (4).

В полный комплект поставки расходомера входят три сменных ячейки потока – малая, средняя и большая (рис. 2), а также емкость для дозирования мыльного раствора и чемоданчик для хранения и транспортировки.

Контрольно-управляющий блок расходомера предназначен для управления процессом измерений, вычисления, обработки и отображения их результатов, обеспечения электропитания и состоит из следующих элементов:

- микропроцессорный контроллер;
- жидкокристаллический дисплей;
- клавиатура;
- контрольные светодиоды;
- аккумуляторная батарея.

Каждая ячейка потока состоит из следующих узлов (рис. 2): сенсорный блок (1); генератор пленки (2).

Генератор пленки предназначен для создания мыльной пленки, которая под действием газового потока протягивается от основания трубки генератора к его верху. Образование пленки происходит после нажатия на кнопку запуска (рис. 3). Основным элементом генератора является труба (поз. 1 рис.3), по которой движется пленка. Геометрические размеры трубы определяют диапазон измерений ячейки потока.

Генератор пленки имеет два штуцера: нижний (входной) для подключения к генератору исследуемого газа и верхний (выходной) для организации сброса газа.

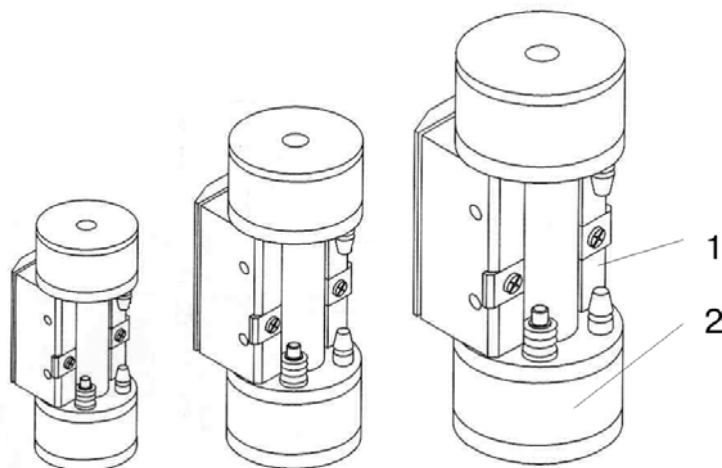


Рис. 2. Комплект сменных ячеек потока: 1 – сенсорный блок; 2 – генератор пленки

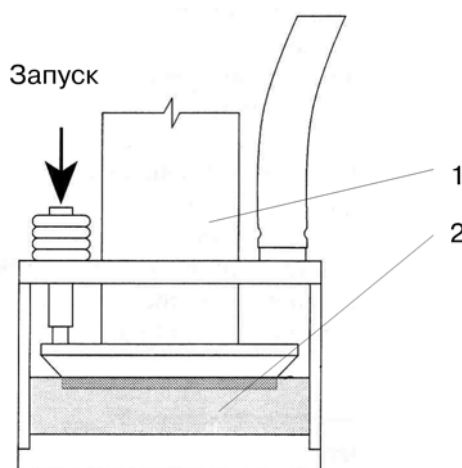


Рис. 3. Образование мыльной пленки: 1 – трубка генератора мыльной пленки; 2 – мыльный раствор

Сенсорный (измерительный) блок, включающий в себя две пары датчиков, предназначен для измерения времени прохождения мыльной пленки по трубке генератора от нижней до верхней пары датчиков.

Контрольно-управляющий блок расходомера оснащен 4-кнопочной клавиатурой. Кнопки имеют символическое или текстовое обозначение согласно их функциональному назначению: кнопка включения/выключения прибора, кнопка сброса, кнопка удаление и кнопка среднее.

Сброс – при нажатии данной кнопки происходит удаление всей текущей последовательности результатов измерений из памяти прибора. После выполнения операции на дисплей вместо последнего результата измерений выводятся символы «тире».

Удаление – при нажатии данной кнопки происходит удаление последнего результата измерений из текущей последовательности. Операция обозначается знаком «→» на

дисплее, после ее выполнения происходит перерасчет среднего значения и уменьшение на единицу счетчика результатов в последовательности.

Среднее – при первом нажатии и удержании данной кнопки на дисплей выводится среднее значение, рассчитанное для текущей последовательности результатов измерений. При повторном нажатии и удержании кнопки выводится текущее значение счетчика результатов в последовательности.

Мыльный раствор (поз. 2 рис. 3) имеет специальный состав с малым осадком, разработанный с целью обеспечения высокой прочности пленки и совместимости с материалами, используемыми при изготовлении ячеек потока.

Клавиатура выполнена по пленочной технологии с кнопками с тактильным эффектом, подтверждающим их нажатие.

Электропитание расходомера обеспечивается от встроенной перезаряжаемой Li-ion аккумуляторной батареи, либо от однофазной сети переменного тока напряжением через внешний блок питания, входящий в комплект поставки прибора. Аккумуляторная батарея расходомера обеспечивает автономное непрерывное электропитание прибора в течение не менее 20 ч.

Главная функция ячеек потока – генерация устойчивой мыльной пленки, движущейся по трубке потока. Измерение времени прохождения осуществляется двумя парами датчиков, установленных в нижней и верхней частях сенсорного блока, охватывающего прозрачную трубку генератора пленки. Объем трубки, ограниченный этими датчиками, может регулироваться путем перемещения верхней пары датчиков, что позволяет проводить градуировку расходомера при выпуске из производства по первичному эталону.

Информация о времени прохождения пленки в виде сигналов датчиков поступает в микропроцессор контрольно-управляющего блока, который ее обрабатывает и с учетом информации об объеме трубки рассчитывает результат измерений, который непосредственно отображается на ЖК-дисплее.

Интерфейс, соединяющий сенсорный блок с контрольно-управляющим, обеспечивает подачу питания на систему датчиков, а также передачу в обратном направлении информации о времени прохождения пленки и идентификационном коде ячейки потока.

Простота эксплуатации и обслуживания электронного мыльно-пленочного расходомера, надежность конструкции и метода измерения, сравнительно низкая цена полного комплекта измерительных ячеек превращают расходомер в незаменимый инструмент для анализа расходов газовых проб во всех отраслях аналитического приборостроения.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРОТИВОГАЗОВЫХ ФИЛЬТРОВ В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТ Р 12.4.192-99 И ГОСТ Р 12.4.193-99

Т.С. Костилян, А.А. Ильин

В январе 2003 г. вступили в действие новые российские стандарты на средства индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД), в том числе ГОСТ Р 12.4.192-99 «ССБТ. СИЗОД. Полумаски фильтрующие с клапанами вдоха и несъемными противогазовыми и (или) комбинированными фильтрами. Общие технические условия» и ГОСТ Р 12.4.193-99 «ССБТ. СИЗОД. Фильтры противогазовые и комбинированные. Общие технические условия» на противогазовые СИЗОД (фильтры). Новые стандарты (в отличие от старых), помимо технических требований к противогазовым и комбинированным СИЗОД (фильтрам), включают также методы их испытаний. Основным защитным показателем противогазовых и комбинированных СИЗОД (фильтров) является время защитного действия (ВЗД). Сущность метода определения ВЗД заключается в определении времени появления нормированной проскоковой концентрации тест-вещества после прохождения газо(паро)воздушной смеси, содержащей тест-вещество, через противогазовый или комбинированный фильтр.

Особенностью новых стандартов ГОСТ Р 12.4.192-99 и ГОСТ Р 12.4.193-99 является отсутствие указаний на способы создания входных концентраций тест-вещества, а также методы контроля проскоковых концентраций при определении времени защитного действия; регламентируется только точность контроля за этими параметрами.

В связи с введением новых стандартов возникла необходимость разработки установок по методам испытаний в соответствии с требованиями новых ГОСТов. Используемые до настоящего времени в России динамические установки типа ДП-3 для определения времени защитного действия противогазовых СИЗОД (фильтров) в соответствии с группой старых стандартов на методы испытаний (ГОСТ 12.4.158-90 – ГОСТ Р 12.4.161-90) не отвечают современным требованиям по многим параметрам. Существенным недостатком этих установок является невозможность контроля входной концентрации тест-веществ в процессе испытания. Так, например, для создания концентрации паровых веществ используется испаритель типа «гусек», который взвешивается до испытания и после, и по разности этих значений вычисляется средняя концентрация целевого компонента в паровоздушной смеси. А для определения входной концентрации газообразных тест-веществ (аммиак, диоксид серы и др.) применяется трудоемкая процедура – титрование. Применение резиновых деталей, предусмотренное в этих установках, приводит в условиях их эксплуатации при использовании таких агрессивных газов, как диоксид серы, хлор, аммиак, сероводород к быстрому их износу, что, в свою очередь, приводит к нарушению герметичности и создает большие неудобства при работе. А визуальная индикация проскоковой концентрации, предусмотренная в этой же группе стандартов, во-первых, предполагает некий субъективный фактор и, во-вторых, позволяет определить только интегральный показатель количества вещества, прошедшего через СИЗОД, а не конкретное время установления нормированной проскоковой концентрации. К другим недостаткам можно также отнести громоздкость этих установок. Учитывая все вышесказанное, модернизация динамических установок типа ДП-3 в соответствии с требованиями новых государственных стандартов ГОСТ Р 12.4.192-99 и ГОСТ Р 12.4.193-99 представлялась нецелесообразной.

При разработке установок по методам испытаний в соответствии с требованиями новых ГОСТов рассматривались наиболее распространенные методы приготовления газо(паро)воздушных смесей – статические и динамические методы.

Основным статическим методом создания концентраций газовых и паровых компонентов является приготовление парогазовых смесей, как правило, в сосудах

под давлением. Однако большие трудозатраты на приготовление смесей в баллонах, адсорбция ряда тест-веществ стенками баллона, необходимость поддерживать большие расходы газо(паро)воздушных смесей для работы на установке по определению ВЗД – все это определило выбор динамических методов дозирования для разработки стенда по определению ВЗД.

Динамический метод подразумевает использование различного рода устройств (генераторов), на выходе которых получается поток газо(паро)воздушной смеси с заданными, либо известными характеристиками.

В 2003 году в ИЦ СИЗ ФГУП «ВНИИ метрологии им Д.И.Менделеева» был разработан и запущен в эксплуатацию компьютеризированный испытательный стенд с программным обеспечением для определения времени защитного действия в соответствии с требованиями ГОСТ Р 12.4.192-99 и ГОСТ Р 12.4.193-99, основанный на динамическом методе дозирования 7 тест-веществ.

Стенд состоит из блока создания влажного воздуха, блока дозирования газообразных компонентов и блока создания и дозирования паров жидких компонентов.

Принцип действия стенда основан на смешении потока целевого газа (пара), газоразбавителя (воздуха) и паров воды. Работа стенда может осуществляться как в ручном режиме – управление с лицевой панели блоков с выводом измерительной информации на соответствующие индикаторы, так и в автоматическом – управление от персонального компьютера. В состав стенда входит также аппаратура для инструментального газоаналитического контроля проскоковой концентрации тест-веществ. Блоки, входящие в состав стенда, управляются встроенными микроконтроллерами.

Блок создания влажного воздуха БСВВ-01 обеспечивает приготовление паровоздушной смеси с расходами от 10 до 40 дм³/мин и измерение относительной влажности полученной смеси. БСВВ-01 обеспечивает создание относительной влажности паровоздушной смеси на выходе в диапазоне от 5 до 80 %. Пределы допускаемой относительной погрешности измерения расхода паровоздушной смеси не превышают $\pm 1,5\%$.

Для установки по определению ВЗД в соответствии с требованиями новых стандартов ГОСТ Р 12.4.192-99 и ГОСТ Р 12.4.193-99 был разработан блок БД-01, предназначенный для дозирования газообразных компонентов: хлора, сероводорода, аммиака, диоксида серы, оксида азота и диоксида азота. Блок БД-01 представляет собой динамическую систему для дозирования газообразных компонентов с помощью теплового регулятора массового расхода газа фирмы «Bronkhorst». Выбор способа дозирования газов с использованием регулятора расхода газа обусловлен высокой точностью и стабильностью получаемой на выходе концентрации целевых компонентов. Требуемый расход подаваемого целевого газа определяется расчетным путем. Данная система позволяет измерять и регулировать расход газа, причем его показания не зависят ни от давления, ни от температуры регулируемого потока. При этом обеспечивается наивысший уровень точности по сравнению с другими средствами измерения расхода. Одним из преимуществ данного регулятора является также его устойчивость к воздействию агрессивных газов.

Для создания паро-воздушных смесей циклогексана, используемого в качестве тест-вещества при работе на установке по определению ВЗД, рассматривались два динамических метода: диффузионный метод и метод насыщения.

Принцип действия диффузионных генераторов основан на смешении потоков газоразбавителя и целевого компонента. Поток целевого компонента задается диффузионным дозатором, находящимся в термостате с контролируемой температурой. В качестве диффузионных дозаторов могут использоваться источники микропотока или капиллярные дозаторы. Приготовление паро-воздушных смесей циклогексана при помощи источников микропотока с целью проведения испытаний противогазовых фильтров не представлялось возможным ввиду необходимости получения высоких концентраций

(3500-28000 мг/м³) и больших расходов приготавливаемой смеси (15 и 30 дм³/мин). Данный метод не мог обеспечить необходимую производительность.

Другим методом по приготовлению парогазовых смесей является метод, основанный на динамическом насыщении газа при его барботировании через жидкий компонент. Один из способов дозирования заключается в продувании дозатора газом-разбавителем, насыщении этого потока веществом до концентрации, соответствующей концентрации насыщенных паров при температуре термостатирования дозатора, и дополнительном разбавлении полученной парогазовой смеси основным потоком газа-разбавителя (рис. 1).

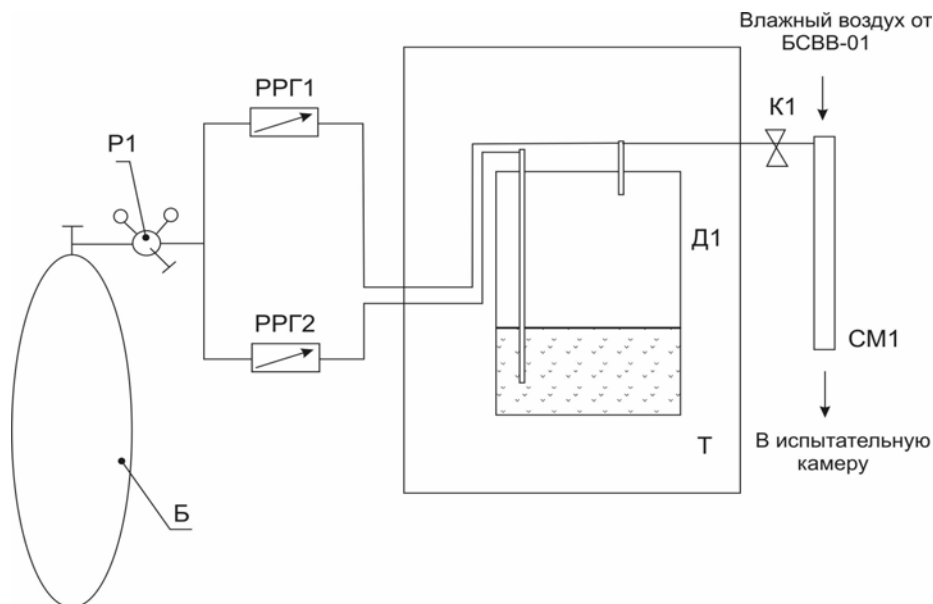


Рис. 1. Схематическое изображение способа барботирования:
Б – баллон с газом-разбавителем (азот); Р1 – редуктор; РРГ1, РРГ2 – регуляторы расхода газа; Д1 – дозатор; К1 – электромагнитный клапан; СМ1 – смеситель

Этот метод первоначально и был использован для дозирования паров циклогексана при использовании блока БД-02. Блок дозирования БД-02 предназначен для дозирования паров жидких компонентов (циклогексан).

Однако в процессе предварительных испытаний был выявлен ряд недостатков данной системы, основным из которых является невозможность поддержания высоких концентраций на время проведения длительных испытаний в связи с понижением давления насыщенных паров циклогексана в дозаторе при больших расходах газа-разбавителя, что приводило к снижению концентрации. А при использовании дозатора большего объема возникает проблема термостатирования больших объемов жидкости. В связи с этим было принято решение о разработке и изготовлении новой системы дозирования, существенно отличающейся от вышеперечисленных методов, которая отвечала бы требованиям новых стандартов, а также обеспечивала воспроизводимость результатов. Вследствие этого была разработана система дозирования, основанная на распылении жидкости с последующим ее испарением в термостате (рис. 2).

При разработке новой системы блока БД-02 были реализованы последние достижения в области микродозирования веществ. В частности, для дозирования циклогексана было предложено использовать высокоточный регулятор расхода жидкости «LIQUI-FLOW» производства фирмы Bronkhorst, не имеющий аналогов в отечественной промышленности и позволяющий измерять и регулировать расход с относительной погрешностью около 1%. Благодаря этому обеспечивается высокая точность дозирова-

ния и стабильность результатов. Разработанная система дозирования позволяет также осуществлять переход от одной концентрации циклогексана к другой без существенных затрат времени.

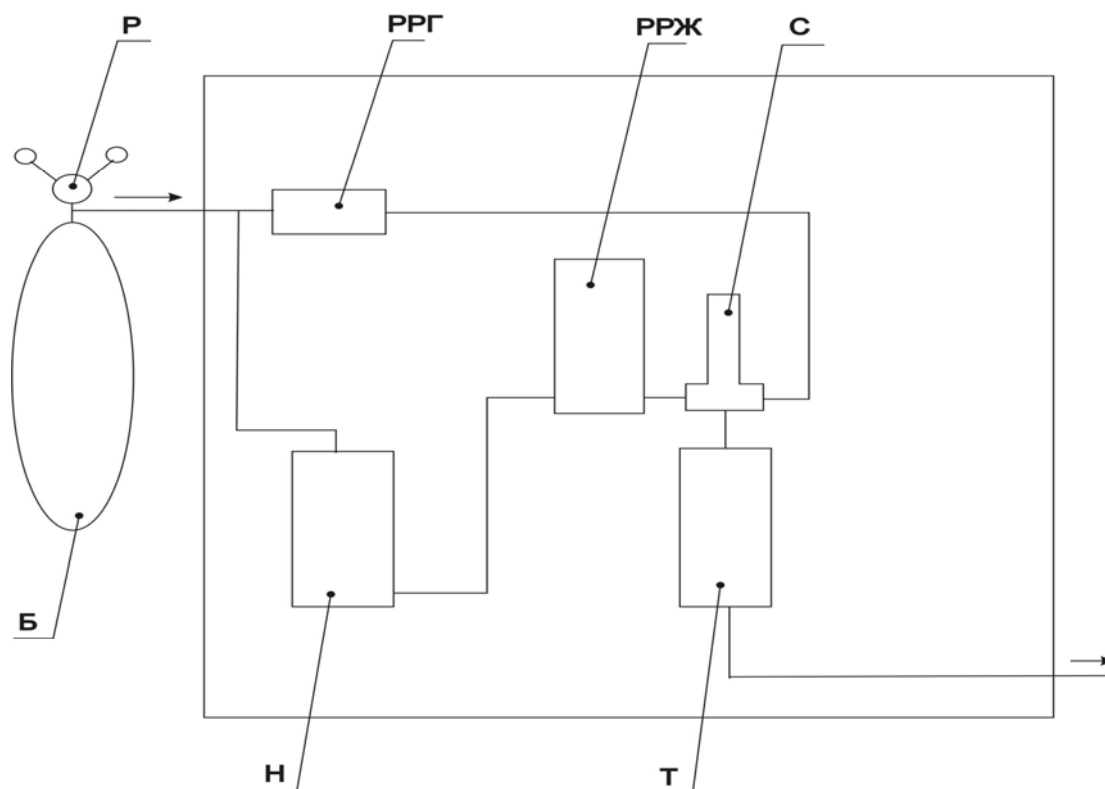


Рис. 2. Принципиальная схема системы дозирования: Б – баллон с газом-разбавителем (азот); Р – редуктор; РРГ – регулятор расхода газа; РРЖ - регулятор расхода жидкости; Н – емкость; С – смеситель; Т – термостат

Для определения времени защитного действия СИЗОД по парам ртути была разработана специальная приставка к стенду. Принцип действия основан на испарении паров ртути при нагревании и дальнейшем их смешивании с основным потоком газоразбавителя (воздуха). Приставка состоит из блока дозирования насыщенных паров ртути, испытательной камеры, нагревательного элемента, блока БССВ. Приставка позволяет создавать увлажненную паро-воздушную смесь с концентрацией паров ртути $13 \pm 1 \text{ мг/м}^3$ в соответствии с требованиями ГОСТ Р 12.4.192-99 и ГОСТ Р 12.4.193-99. При проведении предварительных испытаний было обнаружено, что на поверхности ртутного зеркала со временем образуется оксидная пленка, которая приводит к снижению концентрации паров ртути. В связи с этим была разработана система подогрева для поддержания постоянной концентрации ртути, которая позволяет непрерывно проводить испытания длительностью до 100 часов. Проскоковая концентрация и концентрация насыщенных паров ртути контролируется при использовании атомно-абсорбционного спектрофотометра РА-915+ с приставкой и с дополнительной одноходовой кюветой. По показаниям анализатора осуществляется корректировка входной концентрации ртути с помощью системы подогрева.

В целом стенд со всеми блоками и приставкой обеспечивает приготовление увлажненных газо(паро)воздушных смесей хлора, сероводорода, аммиака, диоксида серы, оксида азота, диоксида азота, циклогексана, ртути в воздухе в диапазоне концентраций от 0,05 до 1,0 % по объему при расходах 15 и 30 $\text{дм}^3/\text{мин}$. Температура приготавливае-

мой парогазовой смеси поддерживается на уровне $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Относительная влажность парогазовой смеси $(70 \pm 2) \%$.

Использование новейших разработок в области измерительных приборов для разработки стенда для определения ВЗД противогазовых СИЗОД (фильтров) позволило обеспечить высокую точность измерений и стабильность характеристик газо(паро)воздушных смесей в соответствии с требованиями новых ГОСТ Р 12.4.192-99 и ГОСТ Р 12.4.193-99.

Литература

1. Рейман Л.В. Техника микродозирования газов. Л.: Химия, 1985.
2. ГОСТ Р 12.4.193-99 (ЕН 141). ССБТ. СИЗОД. Фильтры противогазовые и комбинированные. Общие технические условия.
3. ГОСТ Р 12.4. 192-99 (ЕН 405) ССБТ. СИЗОД. Полумаски фильтрующие с клапанами вдоха и несъемными противогазовыми и (или) комбинированными фильтрами. Общие технические условия.
4. ГОСТ 12.4.158-90. ССБТ. СИЗОД фильтрующие. Методы определения времени защитного действия фильтрующе-поглощающих коробок по парообразным вредным веществам.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОДСОСА ПОД ЛИЦЕВЫЕ ЧАСТИ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ ИЗ ИЗОЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИК-ФУРЬЕ СПЕКТРОМЕТРА И ГЕКСАФТОРИДА СЕРЫ В КАЧЕСТВЕ ТЕСТ-ВЕЩЕСТВА

Т.С. Костилян, И.В. Курчин

Введение в январе 2003 г. новых российских стандартов на средства индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД), гармонизированных с европейскими, привело к необходимости внедрения этих стандартов как в испытательных центрах, так и на производстве для контроля за качеством СИЗОД.

Средства индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) по принципу действия подразделяют на фильтрующие (зависящие от окружающей среды) и изолирующие (дыхательные аппараты, не зависящие от окружающей среды).

В соответствии с новым стандартом, гармонизированным с европейским, ГОСТ Р 12.4.195-99 «ССБТ СИЗОД Классификация», фильтрующие СИЗОД классифицируются следующим образом (рис. 1).

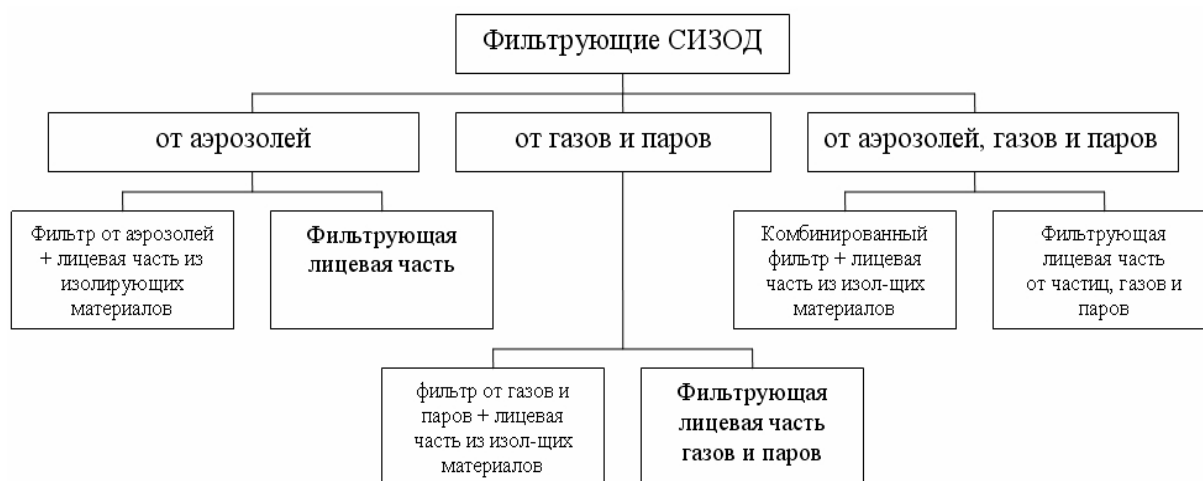


Рис. 1. Классификация фильтрующих СИЗОД

Коэффициент подсоса под лицевую часть из изолирующего материала является одним из важнейших защитных показателей. Коэффициент подсоса определяется отношением концентрации тест-вещества под лицевой частью, надетой на испытателя, к концентрации тест-вещества в окружающей атмосфере. В соответствии с новыми стандартами [1] в качестве тест-веществ могут быть использованы как аэрозоль хлорида натрия (из-за его нетоксичности), так и гексафторид серы (обладает хорошей детектируемостью и имеет высокую ПДК – 5000 мг/м)³.



Рис. 2. Классификация лицевых частей из изолирующих материалов

Для определения коэффициента подсоса под полумаски из изолирующих материалов ранее был разработан и в настоящее время функционирует стенд с использова-

нием аэрозоля хлорида натрия в качестве тест-вещества. В состав стенда входит пламенный фотометр для определения массовой концентрации аэрозоля хлорида натрия. Данное оборудование обеспечивает определение минимального значения коэффициента подсоса - 0.3%, что не позволяет проводить испытания масок по этому же показателю в соответствии с ГОСТ Р 12.4.189-99 «ССБТ СИЗОД Маски. Общие технические условия», регламентирующего определение коэффициента подсоса на уровне 0.01%. Кроме того, использование аэрозолей при определении коэффициента подсоса при малых его значениях – довольно сложная задача, поскольку аэрозоль оседает в пробоотборных трубках, приводя, таким образом, к существенному увеличению погрешности измерений.

Принимая во внимание вышесказанное, было решено разработать и ввести в эксплуатацию еще один стенд для проведения испытаний по определению коэффициента подсоса под лицевые части в соответствии с требованиями ГОСТ Р 12.4.189-99 с использованием гексафторида серы (SF_6) в качестве тест-вещества. В настоящее время такой стенд, обеспечивающий определение коэффициента подсоса под маску в полном соответствии с требованиями ГОСТ Р 12.4.189-99, введен в эксплуатацию.

Испытательный стенд состоит из следующих основных блоков: блока дозирования SF_6 , испытательной камеры, тредбана (беговой дорожки), системы подачи чистого воздуха, прибора для определения содержания SF_6 в испытательной камере и в подмасочном пространстве.

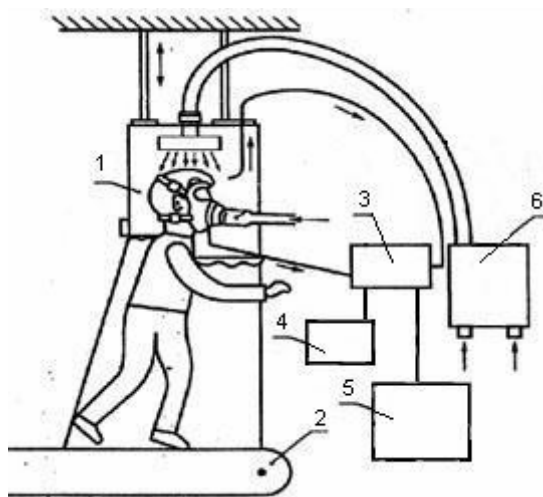


Рис. 3. Схема испытательной установки для определения коэффициента подсоса под маску с использованием SF_6 : 1 – испытательная камера, 2- тредбан, 3 – многоходовая газовая кювета, 4 – ИК-Фурье спектрометр, 5 – вакуумный насос, 6 – генератор газовых смесей

При проведении испытаний маска надевается на испытуемого, который в дальнейшем передвигается по тредбану, выполняя последовательность упражнений, регламентируемых ГОСТом. В камеру подается газовоздушная смесь SF_6 , при этом обеспечивается подача чистого воздуха для дыхания испытуемого. Объемная доля гексафторида серы в газовоздушной смеси устанавливается, равной 1%.

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 12.4.189-99 при определении коэффициента подсоса для каждого типа масок, подвергающихся испытаниям, необходимо использовать устройство, имитирующее сопротивление и массу фильтров, разрешенных для использования с масками данного типа. С учетом сведений, предоставляемых производителем маски, имитатор фильтра имеет максимально возможную массу и сопротивление воздушному потоку. Имитатор фильтра соединяется с источником чистого воздуха посредством гибкого шланга. Крепление шланга сконструировано таким образом, что оно не нарушает прилегания маски к лицу испытуемого.

В испытательную камеру, выполненную из оргстекла, помещается только голова испытуемого, что позволяет значительно снизить расход гексафторида серы. Дно камеры изготовлено из воздухонепроницаемой ткани с отверстием для головы типа манжеты, что обеспечивает свободу перемещения и безопасность испытуемого. В конструкции камеры предусмотрен разъем с шиббером для подсоединения системы вытяжной вентиляции. Еще одним преимуществом выбранной конструкции является то, что испытательная камера легко устанавливается и демонтируется, не требуя дополнительного места в испытательной лаборатории.

Для создания необходимой газовой смеси гексафторида серы используется генератор газовых смесей ГГС-03-03, специально разработанный и изготовленный в ООО «Мониторинг». Генератор ГГС-03-03 представляет собой динамический газовый смеситель, принцип действия которого заключается в смешении потоков целевого газа (гексафторида серы) и газа-разбавителя, расход которых регулируется и измеряется с помощью регуляторов массового расхода газа. Для приготовления газовой смеси тест-вещества на вход генератора подаются SF_6 повышенной чистоты и чистый воздух от линии подачи сжатого воздуха. Приготовленная смесь SF_6 поступает в испытательную камеру. Расход газовой смеси SF_6 на выходе из генератора может изменяться в диапазоне от 5 до 100 $\text{дм}^3/\text{мин.}$ и составляет на начальном этапе испытаний 100 $\text{дм}^3/\text{мин.}$, что позволяет продуть и равномерно распределить SF_6 по всему объему испытательной камеры. Для поддержания концентрации тест-вещества в испытательной камере далее устанавливается расход газовой смеси, равный 10 $\text{дм}^3/\text{мин.}$ Генератор ГГС-03-03 обеспечивает изменение коэффициента разбавления в диапазоне от 5 до 2000, при этом пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения коэффициента разбавления не превышают $\pm 2,5\%$. С помощью генератора ГГС-03-03 при использовании баллона с газовой смесью SF_6 с содержанием 0,05% готовятся смеси с различным содержанием SF_6 для калибровки прибора, измеряющего содержание тест-вещества. Работа генератора может осуществляться как в ручном режиме (управление с лицевой панели), так и в автоматическом (управление с персонального компьютера).

Во время испытания производится последовательный отбор проб из подмасочного пространства испытываемой лицевой части и из испытательной камеры. Таким образом, коэффициент подсоса рассчитывают по результатам измерений по формуле:

$$K = \frac{C_2}{C_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где C_1 – концентрация тест-вещества в камере, C_2 – концентрация тест-вещества в подмасочном пространстве.

Для измерения концентрации гексафторида серы используется ИК-Фурье спектрометр ФСМ 1202 производства ООО «Мониторинг», оснащенный газовой многоходовой кюветой с длиной оптического пути 4.8 м. Использование метода ИК-Фурье спектроскопии обусловлено простотой эксплуатации, высокой чувствительностью и высокой производительностью. Для ускорения процесса пробоотбора из газовой кюветы с помощью вакуумного насоса откачивается воздух, а затем кювета заполняется отобранной пробой.

Гексафторид серы обладает высокой детектируемостью, что позволяет производить измерения содержания SF_6 на уровне 1 ppb. Измерения поглощения проводились в спектральном диапазоне от 500 до 1400 см^{-1} , характерном для SF_6 . Для малых концентраций на уровне 1–10 ppb использовался интервал 910–970 см^{-1} . Для концентраций свыше 10 ppb в этом интервале происходит полное светопоглощение. Поэтому измерения концентраций SF_6 на уровне 1000–10000 ppb проводились в интервале 1220–1280 см^{-1} . Таким образом, имея заранее подготовленные «реперные» спектры и используя программу FSPEC[®], производят обработку полученных данных, и определе-

ние содержания SF_6 в подмасочном пространстве лицевой части и в испытательной камере.

В настоящее время с помощью разработанного и введенного в эксплуатацию испытательного стенда уже проведены испытания для целей сертификации ряда масок как российских, так и зарубежных производителей. По итогам эксплуатации стенда планируется внесение ряда усовершенствований. Так, используемая кювета с длиной оптического пути 4,8 м позволяет измерять концентрацию тест-вещества с большим запасом чувствительности, но, обладая излишним объемом, значительно увеличивает продолжительность процесса измерения. Изготовление кюветы меньшего объема позволит значительно сократить время пробоотбора, тем самым увеличив число измерений, производимых в ходе испытания. Хорошая детектируемость SF_6 , возможно, позволит снизить объемную долю гексафторида серы в камере до 0,1%, что должно значительно уменьшить расход исходного газа. В последующем предполагается автоматизация всего стенда, т.е. объединение всех блоков стенда под управлением единой программы, что позволит снизить трудоемкость испытаний.

В заключение необходимо отметить, что разработанный и изготовленный стенд является первым в России стендом для определения коэффициента подсоса, основанным на методе с использованием гексафторида серы. Введение стенда в эксплуатацию позволило ИЦ СИЗ ФГУП «ВНИИ метрологии им. Д.И. Менделеева» проводить испытания масок по показателю коэффициента подсоса под лицевую часть с высокой точностью и в полном соответствии с требованиями ГОСТ Р 12.4.189-99.

Литература

1. ГОСТ Р 12.4.189-99 ССБТ. СИЗОД. Маски. Общие технические условия.
2. ГОСТ Р 12.4.190-99 ССБТ. СИЗОД. Полумаски и четвертьмаски из изолирующих материалов. Общие технические условия.
3. ГОСТ Р 12.4.195-99 ССБТ. СИЗОД. Классификация.
4. Белл Р.Дж. Введение в Фурье-спектроскопию. М.: Мир, 1975.

ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ РАСХОДОВ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

А.В. Мальгинов, А.А. Нечаев

При проведении газоаналитических измерений часто возникает необходимость точного измерения малых расход газа (в данном случае под малыми расходами подразумеваются расходы от $1 \text{ см}^3/\text{мин}$ до $50 \text{ дм}^3/\text{мин}$, а погрешность измерения не превышает 1%). Необходимость такого рода измерений связана с задачами построения динамических систем для приготовления газовых (парогазовых) смесей, необходимостью контроля расхода газа, подаваемого в газоанализаторы, хроматографы и газоаналитические системы различных типов.

Все методы измерения расхода газа можно разбить на две группы. Первичные методы опираются на измерения основных единиц системы СИ (масса, длина, время) и позволяют получить значение расхода по процедуре измерения. Вторичные методы требуют калибровки по первичным методам.

Рассмотрим первичные методы измерения малых расходов газа. Основными первичными методами измерения расхода газа являются гравиметрический метод, метод, основанный на использовании поршня с ртутным уплотнением, графитового поршня, колокольный метод, мыльно-пленочный метод.

Рассмотрим гравиметрический метод. Схема установки для реализации этого метода изображена на рис.1.

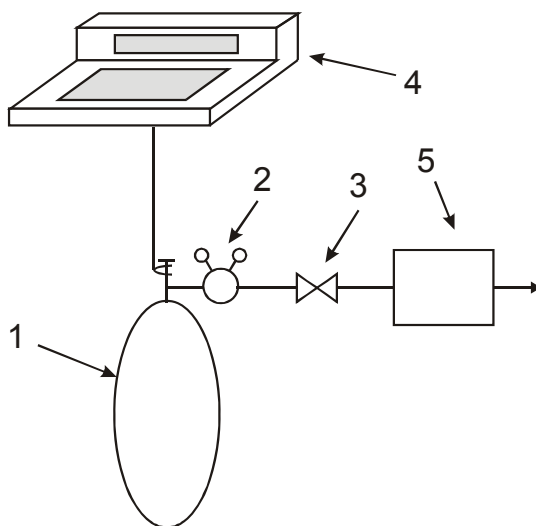


Рис 1. Схема установки для реализации гравиметрического метода: 1 – баллон, 2 – редуктор, 3 – вентиль тонкой регулировки, 4 – весы, 5 – калибруемое устройство

К баллону с газом подсоединяют редуктор, вентиль тонкой регулировки и калибруемое устройство. Баллон с редуктором устанавливается на весы. Газовая линия от редуктора к вентилю тонкой регулировки выполняется из гибкого материала, давление газа в ней поддерживается постоянным с помощью редуктора. Это обеспечивает постоянство влияния массы газовых коммуникаций на показания весов. С помощью вентиля тонкой регулировки (или другого средства стабилизации расхода) задается расход газа на выходе баллона. С помощью весов регистрируется убыль массы газа в баллоне в единицу времени (массовый расход газа). В процессе измерений необходимо контролировать температуру окружающего воздуха и атмосферное давление. Данный метод при условии правильного выбора характеристик весов обладает наивысшей точностью из всех существующих, но он требует для своей реализации наличия целого комплекса дорогостоящего оборудования и большого времени измерений. Гравиметрический ме-

тод не имеет ограничений по роду газа, расход которого требуется измерить. Относительная погрешность измерения расхода $\pm(0,10 - 0,15)\%$.

Схема установки для измерения расхода газа с использованием поршня с ртутным уплотнением изображена на рис. 2.

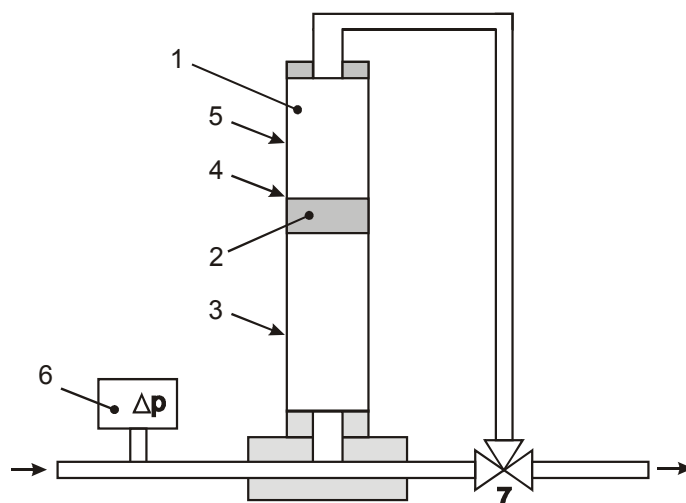


Рис. 2. Схема установки реализации метода поршня с ртутным уплотнением: 1 – стеклянная трубка, 2 – поршень, 3, 4, 5 – фотоэлектрические датчики, 6 – датчик давления

Основными элементами установки являются стеклянный цилиндр (1) и поршень с ртутным уплотнением (2). В цилиндр подается газ, который начинает заполнять весь объем цилиндра под поршнем. В результате поршень под давлением газа начинает подниматься. На стеклянном цилиндре, на определенном расстоянии друг от друга установлены фотоэлектрические датчики (3), (4) и (5). После прохождения поршнем датчика (3) начинается измерение времени. Измерение времени заканчивается, когда поршень поднимается до уровня датчика (4) или (5). Подачу газа в такую систему регулирует трехходовой клапан (6). Во время работы необходимо контролировать температуру и давление газа под поршнем. Зная время, объем цилиндра между датчиками, температуру и давление газа, можно определить объемный расход газа. Примером такой установки может служить установка фирмы MKS Instruments A100. Данная установка входит в состав Государственного первичного эталона единиц молярной и массовой концентрации компонентов в газовых средах ГЭТ 154 и обеспечивает измерение объемного расхода газа в диапазоне от $5 \text{ см}^3/\text{мин}$ до $50 \text{ дм}^3/\text{мин}$ с относительной погрешностью $\pm 0,2\%$. В комплект установки входит термометр и электронный измеритель давления. Установка состоит из двух стеклянных цилиндров с поршнями с ртутным уплотнением, что позволяет охватить широкий диапазон расходов. Управление газовыми потоками осуществляется с помощью электромагнитных клапанов.

Несомненное преимущество такой установки – высокая точность. Но измерения и расчет расхода занимают длительное время в области малых расходов. Установка позволяет производить измерение расхода только инертных газов. Большие габариты установки не позволяют производить калибровку стационарных стендов на месте. Еще одним минусом является сложное техническое обслуживание установки. Установка должна быть обязательно установлена под вытяжку, потому что газ, который проходит через нее, насыщается парами ртути. Со временем происходит загрязнение и окисление ртутных уплотнений в поршне. В результате этого уплотнение может нарушиться, и произойдет потеря герметичности установки. В связи с этими обстоятельствами необходимо периодически заменять ртуть в уплотнениях и производить промывку внутренней поверхности цилиндров.

Метод, основанный на использовании графитового поршня, аналогичен вышеописанному методу, за исключением того, что в данном методе поршень изготовлен из графита и с большой точностью подогнан под внутренний диаметр стеклянного цилиндра. Поскольку требуется свободное перемещение поршня внутри цилиндра, зазор между поршнем и цилиндром составляет несколько микрон, и через этот зазор происходит утечка газа. Величина этой утечки измеряется и в дальнейшем учитывается в результатах измерений. Такая установка позволяет избежать проблем, связанных с использованием ртути, и существенно меньше в габаритных размерах, что позволяет изготовить ее в переносном варианте. Относительная погрешность такой системы от 0,2 до 0,5 % в зависимости от качества обработки поверхности графитового поршня. Метод позволяет измерять расход только инертных газов.

Схема установки для измерения расхода газа с использованием мыльно-пленочного метода изображена на рис 3.

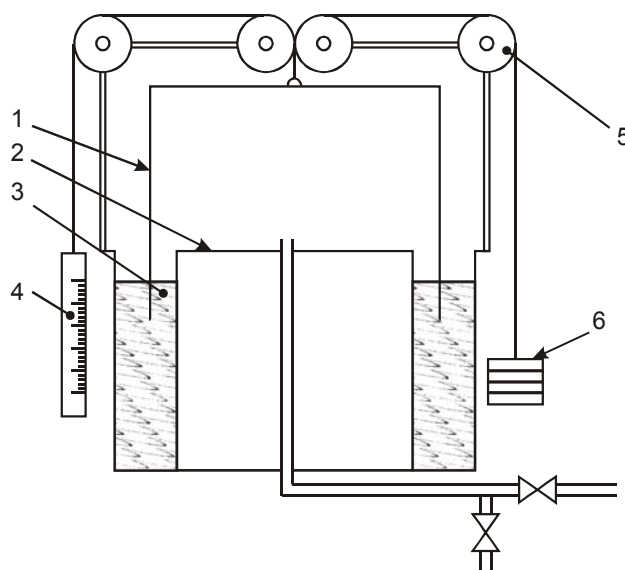


Рис. 3. Схема установки реализации мыльно-пленочного метода: 1 – стеклянная трубка, 2 – фотоэлектрические датчики, 3 – устройство, производящее из мыльного раствора пузыри, 4 – источник света

На стеклянную трубку известного объема (1) устанавливаются фотоэлектрические датчики (2). Трубка устанавливается вертикально. Газ, который будет использован в измерении, предварительно насыщают водяными парами до 100% относительной влажности, соответствующей температуре помещения. Приготавливают специальный мыльный раствор. С помощью устройства, производящего из мыльного раствора пузыри (3), в трубку запускают мыльную пленку, которая подхватывается газом и опускается вниз по трубке. Время прохождения пленки по трубке измеряется фотодатчиками (2). Расход газа рассчитывают по измерениям времени прохождения пленки по трубке, объема трубки, температуры и атмосферного давления. Относительная погрешность данного метода составляет порядка 1%. Основными преимуществами мыльно-пленочного измерителя являются высокая скорость измерения, простота использования, малые габариты. Недостатками данного метода является не очень высокая точность, возможность использования для измерения расхода только инертных газов и необходимость предварительного увлажнения подаваемого газа.

Пример прибора, работающего на таком методе – мыльно-пленочный измеритель фирмы Sensidyne. Прибор состоит из двух частей: основание прибора, содержащее ЖК-дисплей и электронные компоненты, и съемная измерительная ячейка, содержащая измерительную систему. Для увеличения диапазона определения расхода в комплект из-

мерителя входит несколько измерительных ячеек на различные диапазоны, перекрывающие друг друга (от 1 см³/мин до 30л/мин).

Следующий метод измерения расходов основан на использовании установки колокольного типа. Схема установки изображена на рис. 4.

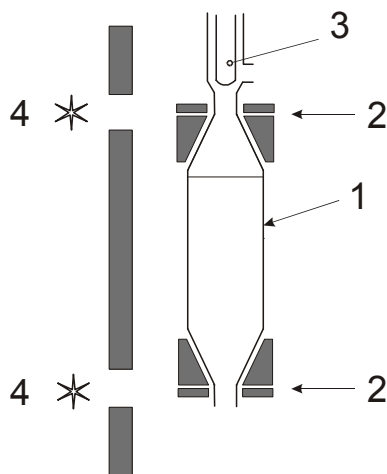


Рис 4. Схема установки реализации колокольного метода: 1 – колокол, 2 – стационарный резервуар, 3 – вода, 4 – измерительная шкала, 5 – ролик, 6 - противовес

На рисунке показан колокол (1), находящийся в стационарном резервуаре (2), заполненном водой (3). Измерительная шкала (4) используется для измерения позиции колокола, который подвешен на специальных подвесах через подвижные ролики (5) и уравновешен противовесами (6). Между показаниями измерительной шкалы и объемом газа под поршнем установлена связь путем точного измерения объема поршня.

Принцип действия установки состоит в следующем. Колокол (1) поднимается и наполняется газом. Определенный объем газа вытесняется опускающимся колоколом (1) в выходную линию, при этом производится контроль давления и температуры. Время вытеснения газа измеряется секундомером. Расход газа рассчитывают, используя значения объема, времени, температуры и давления газа под поршнем (постоянство расхода обеспечивается внешним вентилем тонкой регулировки или иным средством). Относительная погрешность измерения расхода этим методом составляет 0,3%. Недостатками данного метода являются большие габариты установки, возможность использования для измерения расхода только 100% увлажненных инертных газов.

Метрологические характеристики первичных методов измерения расхода приведены в таблице 1.

Метод	Диапазоны, см ³ /мин	Относительная погрешность, %
Гравиметрический	1-50000	0,1
Поршень с ртутным уплотнением	1-50000	0,2
Поршень с графитовым уплотнением	5-50000	0,2 - 0,5
Колокольный	1000-50000	0,3
Мыльно-пленочный	1-30000	1,0

Таблица 1. Первичные методы измерения малых расходов

Рассмотрим вторичные методы измерения расхода газа. Эти методы обладают хорошей воспроизводимостью и стабильностью результатов измерений, но требуют калибровки по первичным методам измерения расхода. Самыми распространенными из них являются метод барабанного счетчика газа, метод, основанный на использовании тепловых измерителей, метод определения расхода по разнице давлений на постоянном пневматическом сопротивлении и метод, основанный на измерении скорости вращения турбины в потоке газа.

Барабанный газовый счетчик («газовые часы») представляет собой барабан, который вращается вокруг своей горизонтальной оси внутри кожуха. Барабан состоит из четырех одинаковых по объему частей, расположенных радиально относительно оси поворота. Каждая часть имеет входное отверстие с одной стороны и выходное с другой. Барабан вращается в воде, которой заполнен внешний кожух. Уровень воды устанавливается так, чтобы заполненные водой части барабана могли непрерывно захватывать и сбрасывать поступающий газ. Барабан вращается, как показано на рис. 5.

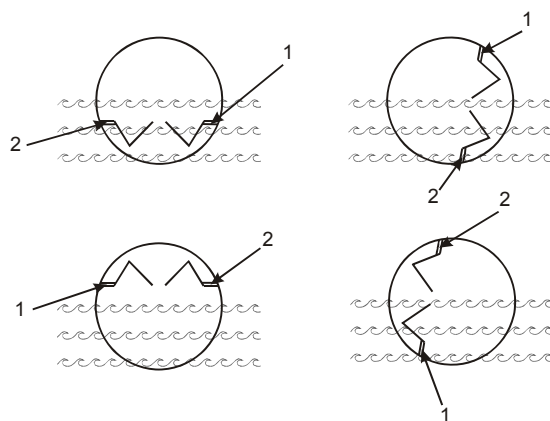


Рис 5 Схема вращения барабана в газовом счетчике

Сначала барабан находится в стартовом положении (а), затем открывается входное отверстие (1), и по мере заполнения газом, барабан принимает положение (б). Когда барабан достигает положения (с), входное отверстие закрывается и открывается выходное отверстие, в результате чего барабан продолжает свое вращение (д). Расход газа вычисляется по значению заполненного газом объема и времени его заполнения. Следует учитывать, что во время прохождения газа через барабан газ увлажняется, и это вносит дополнительную погрешность в расчет. Для того чтобы газ не насыщался водой, вместо воды в некоторых счетчиках газа используют специальное масло. Относительная погрешность измерения расхода газовым счетчиком, работающего на воде, составляет (0,5–1,0)%.

Рассмотрим метод, основанный на использовании тепловых измерителей расхода. Принцип измерения заключается в измерении разности температур по длине капилляра, находящегося в термостате, при прохождении по нему газа. Измерительная ячейка (сенсор) состоит из капилляра (измерительного канала), двух термосопротивлений (RT1 и RT2) и нагревательного элемента (RH) между ними. Часть газа, ответвляемая элементом сопротивления потоку, проходит по капилляру и нагревается с помощью нагревательного элемента (рис 6).

Термосопротивления предназначены для регистрации температуры газа до (T1) и после (T2) нагревательного элемента. Разность этих температур ΔT прямо пропорциональна массовому расходу газа. Относительная погрешность измерения расхода этим методом может колебаться от 0,5% до 1%.

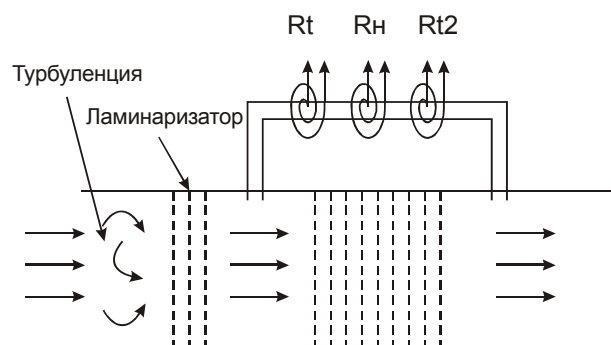


Рис 6. Схема реализации устройства на тепловом методе

Перейдем к методу измерения расхода газа с помощью турбины. Принцип этого метода заключается в следующем. В газовый поток устанавливают турбину, которая под действием потока вращается. С помощью фотоэлектрических датчиков определяют скорость вращения турбины. Относительная погрешность измерения этим методом порядка 1%.

И последний метод, который мы рассмотрим – метод измерения расхода по разнице давлений. Для разъяснения принципа работы обратимся к рис. 7.

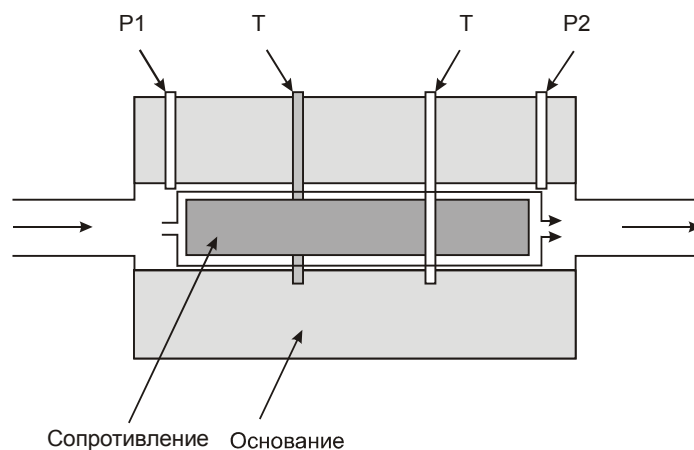


Рис 7. Схема реализации устройства по методу перепада давлений

Метод	Диапазоны, см ³ /мин	Относительная погрешность, %
Газовый счетчик	1000-50000	0,5-1,0
Тепловой	1-50000	0,5-1,0
Турбина	200-5000	1,0
Разница давлений	1-30000	0,3

Таблица 2. Вторичные методы измерения малых расходов

В металлическом основании просверлено сквозное отверстие определенного диаметра. Во внутрь отверстия устанавливают пневматическое сопротивление определенной формы и диаметра. Газовый поток, поступающий в такую систему, равномерно об-

текает сопротивление и при этом становится ламинарным. Температура газа контролируется датчиками Т. Давление перед сопротивлением и после него контролируется датчиками Р1 и Р2, соответственно. Расход газа рассчитывается по результатам измерения давления и температуры. Воспроизводимость данного устройства составляет 0,05%, что позволяет получить итоговую погрешность при калибровке гравиметрическим методом на уровне 0,3%. Основным недостатком данного метода является высокая стоимость оборудования.

Метрологические характеристики вторичных методов представлены в таблице 2.

Описанные методы точного измерения расхода газа отличаются погрешностью измерения, сложностью технической реализации, стоимостью оборудования (в десятки раз), и их выбор зависит от конкретной задачи.

ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗАТОРА ДИОКСИДА СЕРЫ

А.В. Волгузова, Н.Г. Лукомский, В.П. Челибанов

Во флуоресцентных газоанализаторах двуокиси серы референтного типа используется классический метод флуоресцентной спектроскопии. Двуокись серы имеет интенсивную полосу поглощения в УФ области спектра (200–240 нм). Поглощение в этой области приводит к возникновению флуоресценции в области 250–400 нм. Интенсивность флуоресценции прямо пропорциональна концентрации двуокиси серы. Обычно флуоресценция регистрируется с помощью ФЭУ, перед которым устанавливается полосовой оптический фильтр. Полоса пропускания фильтра соответствует тому спектральному интервалу, в котором флуоресцирует двуокись серы. Любое другое излучение, в том числе и излучение накачки, «подавляется» (в полосе подавления величина пропускания таких фильтров составляет примерно 10^{-5}).

Очевидно, что такой газоанализатор будет измерять концентрацию как двуокиси серы, так и любых других веществ, которые поглощают в области примерно 200–240 нм и имеют полосы флуоресценции в области 250–400 нм. Из литературы известно [1, 2], что к таким веществам относятся некоторые углеводороды, окись азота (NO), дисульфид углерода (CS_2), этилен (C_2H_2), окись углерода (CO) и двуокись углерода (CO_2). Наличие в измеряемом газе вышеперечисленных веществ будет приводить к завышению показаний газоанализатора. Целью настоящей работы явилась оценка степени влияния флуоресценции оксида азота на уровень флуоресценции SO_2 и разработка рекомендаций, снижающих перекрестное взаимовлияние указанных компонентов.

Как показывают исследования [3], основным мешающим газом при измерении диоксида серы является окись азота, так как этилен и дисульфид углерода в атмосфере практически не встречаются, углеводороды удаляются из пробы специальным устройством, а флуоресценция окиси и двуокиси углерода полностью тушится молекулярным кислородом. Окись азота может присутствовать в атмосфере в больших количествах, и основной источник – это автотранспортные выбросы.

В качестве примера того, что концентрация NO может достигать в атмосфере больших значений, приведем данные, полученные станцией контроля качества атмосферы (СКАТ), расположенной на территории ЗАО «ОПТЭК» (Санкт-Петербург, В.О., ул. Гаванская, д. 47, корпус «Г»). Комплекс СКАТ может иметь от двух до девяти измерительных каналов. Для определения концентрации двуокиси серы используется газоанализатор «С-310А». Концентрацию окиси азота определяют с помощью газоанализатора «Р-310А». Предел допускаемой основной погрешности измерений 25%. Оба газоанализатора производятся ЗАО «ОПТЭК», принцип работы – хемилюминесцентный. Интерес представляют данные за 13 октября 2005 г. В этот день к вечеру при полном безветрии концентрация окиси азота в атмосфере достигла 425 мкг/м^3 (максимальная разовая ПДК – 400 мкг/м^3 , а среднесуточная – 60 мкг/м^3), концентрация двуокиси серы была на уровне 9 мкг/м^3 (500 мкг/м^3 и 50 мкг/м^3 , соответственно).

В связи с этим нами было проведено тестирование флуоресцентных газоанализаторов таких известных зарубежных компаний, как Teledine API и Monitor Labs, а также газоанализатора «С-105» производства ЗАО «ОПТЭК» на предмет перекрестной чувствительности к окиси азота. Для всех трех газоанализаторов результат оказался примерно одинаковым – концентрацию порядка 500 мкг/м^3 окиси азота они воспринимали как примерно 50 мкг/м^3 двуокиси серы. Таким образом, если вернуться к вышеприведенным данным от 13 октября 2005 г., ошибка в определении концентрации двуокиси серы при использовании этих газоанализаторов в этот день составила бы более 400%.

Так как во всех трех газоанализаторах используется один и тот же полосовой оптический фильтр, мы решили выяснить, как соотносятся между собой спектры флуоресценции окиси азота и двуокиси серы, а также спектр пропускания фильтра. Результат представлен на рис. 1. Спектры флуоресценции взяты из работы [3], спектр пропускания фильтра получен на спектрофотометре, разработанном в ЗАО «ОПТЭК» на базе монохроматора МДР-41 с управлением от ПК.

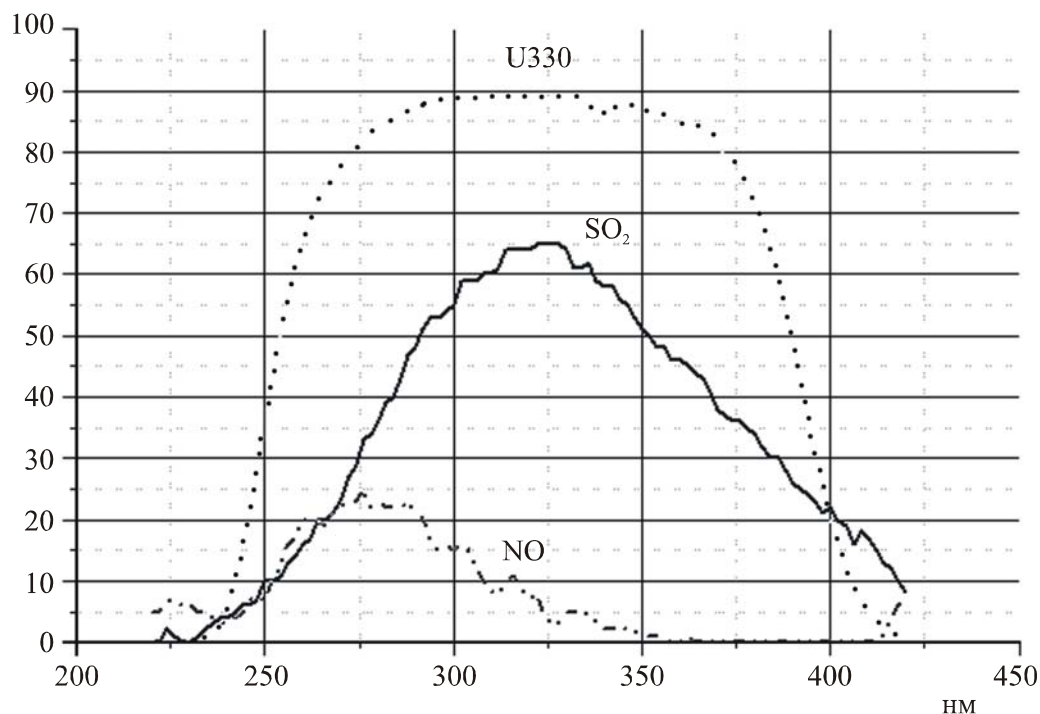


Рис. 1. Спектры флуоресценции SO_2 (сплошная линия), NO (штрих-пунктирная линия) и спектр пропускания полосового оптического фильтра (пунктирная линия)

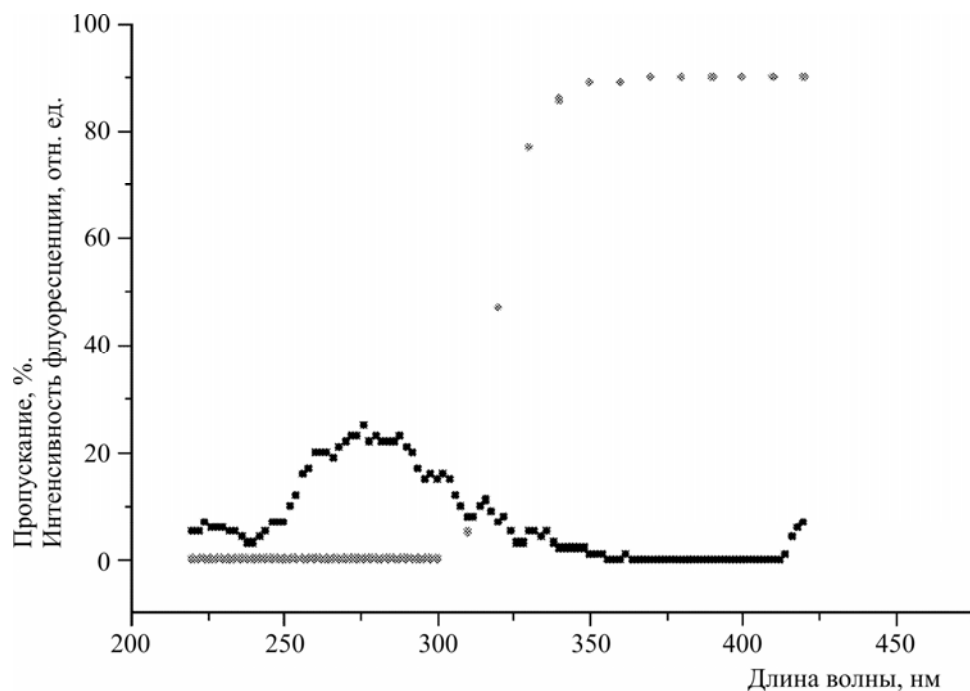


Рис. 2. Спектр пропускания краевого оптического фильтра (показан кружочками) и спектр флуоресценции NO (показан квадратиками)

Из рисунка видно, что оба спектра флуоресценции попадают в полосу пропускания фильтра. Это и приводит к тому, что вышеназванные флуоресцентные газоанализаторы обладают заметной чувствительностью к окиси азота.

Уменьшить эту чувствительность можно путем установки перед ФЭУ дополнительного оптического фильтра, не пропускающего спектральную область флуоресценции окиси азота. В частности, мы предлагаем использовать так называемый краевой оптический фильтр WG320 производства компании EURECA, спектр пропускания которого приведен на рис. 2. Там же для сравнения приведен спектр флуоресценции окиси азота.

Насколько уменьшится влияние окиси азота при использовании такого фильтра, можно количественно оценить следующим образом. Обозначим через $f_i(\lambda)$ огибающую спектра флуоресценции i -го вещества (т.е. либо окиси азота, либо двуокиси серы), а спектральное пропускание полосового и краевого фильтра – через $T_1(\lambda)$ и $T_2(\lambda)$, соответственно. Тогда суммарная интенсивность флуоресценции i -го вещества I_i при использовании только полосового фильтра определится выражением

$$I_i \approx \int f_i(\lambda) T_1(\lambda) d\lambda,$$

а в том случае, когда используются оба фильтра – выражением

$$I_i \approx \int f_i(\lambda) T_1(\lambda) T_2(\lambda) d\lambda.$$

Очевидно, что степень влияния окиси азота определяется отношением ее суммарной интенсивности флуоресценции к суммарной интенсивности флуоресценции двуокиси серы. Чем это отношение меньше, тем влияние будет меньше. Численные оценки показывают, что при использовании рекомендованной комбинации фильтров влияние окиси азота может уменьшиться почти на порядок. Насколько это верно, покажут дальнейшие исследования.

Литература

1. Luke W. T. Evaluation of a commercial pulsed fluorescence detector for the measurement of low-level SO₂ concentrations during Gas-Phase Sulfur Intercomparison Experiment. // Journal of Geophysical Research. 1997. V. 102. p. 16255–16265.
2. Okabe H., Splitstone P. L., Ball J. J. Ambient and source SO₂ detector based on a fluorescence method. // Journal of the Air Pollution Control Association. 1973. V. 23. p. 514–516.
3. Mohn J., Emmenegger L. Determination of sulphur dioxide by pulsed ultraviolet fluorescence. / Proceedings of the 4th International Conference on Emissions Monitoring, Arnhem, 2001.

ПРИБОРНОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ И СПЕКТРОЗОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

В.Н. Кузьмин

Излучение источника как объект измерения можно охарактеризовать неким набором физических величин или их совокупностью. К основным величинам можно отнести:

- спектр излучения (спектральный состав излучения);
- интенсивность излучения – поток излучения (лучистый поток);
- эффективный поток излучения.

Выбор критериев для оценки характеристик источников оптического излучения вытекает из поставленных задач. Измерение характеристик источника в широкой области спектра используется достаточно редко. Как правило, оценка производится в конкретном спектральном диапазоне. При этом источник оценивается по уровню реакции приемника, спектральная характеристика которого строго определена, т.е. эффективной величиной.

Наиболее распространенными на сегодняшний день являются три системы эффективных величин: световая, бактерицидная и эритемная.

В световой системе спектральная характеристика измерительного приемника соответствует относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения $\bar{V}(\lambda)$, или кривым, спектральные чувствительности которых подобны $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ – координатам цвета монохроматического излучения единичной мощности [1].

При измерении параметров ультрафиолетового оптического излучения применяется система эффективных и энергетических величин.

Измерение потоков излучения в эффективных единицах до сих пор является дискуссионным из-за большого количества эффективностей и разночтением некоторых авторов в их табулированных значениях. В связи с этим наиболее распространена система энергетических величин.

Спектрозональные оценки излучения источников предполагает использование фотоприемников с заданной спектральной характеристикой, что является достаточно сложной технической задачей.

При другом, альтернативном методе с помощью спектральной аппаратуры определяют спектральное распределение потока излучения в относительных единицах $\phi_{e,\lambda}(\lambda)$ измеряемого источника света с последующим расчетом необходимых величин. Спектрофотометрический метод позволяет теоретически получить высокую точность, так как отпадает необходимость в коррекции спектральной характеристики приемников излучения, а все необходимые величины находятся расчетным путем.

Под непосредственным научным руководством автора были разработаны приборы по определению характеристик источников оптического излучения в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. В приборах были реализованы оба вышеприведенных метода и проведен сравнительный анализ их метрологических характеристик.

Прибор «ТКА – ИЦТ» предназначен для измерения координат цветности источников излучения, коррелированной цветовой температуры, яркости протяженных самосветящихся источников и освещенности, создаваемой источниками, произвольно расположенными относительно измеряемой плоскости.

Фотоприемное устройство состоит из нескольких фотоприемников, спектральные характеристики которых с помощью светофильтров скорректированы под кривые сложения $x_1(\lambda)$, $x_2(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$. Для коррекции пространственной характеристики при

работе в режиме люксметра используется молочное стекло, установленное перед фотоприемниками. При измерении яркости протяженных, самосветящихся объектов пространственная характеристика формируется навинчивающимся тубусом, геометрические размеры которого определены решаемыми задачами (рис. 1).

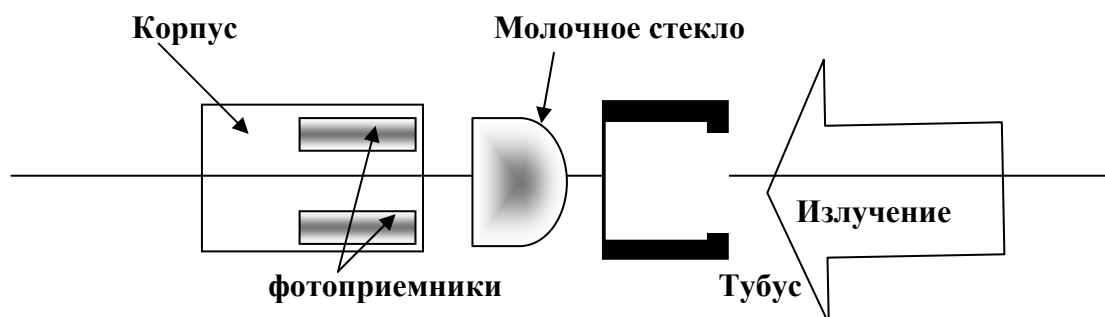


Рис. 1. Устройство ФПУ колориметра «ТКА – ИЦТ»

Сигналы с ФПУ подаются на предварительный усилитель, где происходит одновременно с усилением сигналов и их масштабирование. Усиленные сигналы постоянного тока подаются на входы АЦП для преобразования в цифровую форму. Цифровые сигналы с выходов АЦП подаются в микропроцессор для дальнейшей обработки.

Программное обеспечение позволяет представлять результаты измерений в необходимой форме для вывода их на дисплей прибора и на персональный компьютер. Технические характеристики колориметра приведены в таблице.

Измеряемый параметр	Диапазон измерения	Погрешность
Освещенность, лк	10 – 200 000	3 %
Яркость, кд/м ²	10 – 20 000	5 %
Координаты цветности, x,y	x,y	0,5 %
Коррелированная цветовая температура, К	1500 – 20 000	5 %

Таблица. Технические характеристики колориметра

Спектрофотоколориметр «ТКА ВД» предназначен для определения спектрального состава источника оптического излучения с последующим вычислением цветовых координат в выбранной системе координат.



Рис. 2. Спектрофотоколориметр «ТКА – ВД»

Оптическая схема спектрофотокориметра представлена на рис. 3.

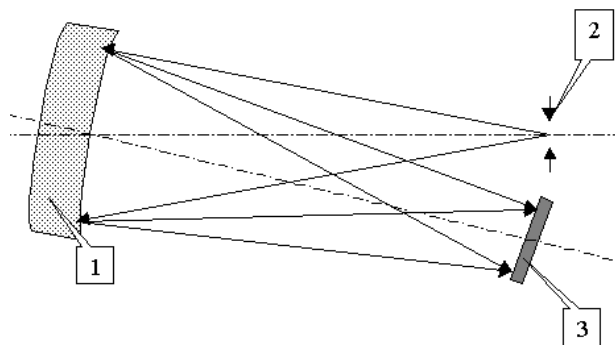


Рис. 3. Оптическая схема спектрофотокориметра «ТКА – ВД»: 1 – дифракционная решетка, 2 – входная щель, 3 – фотодиодная линейка

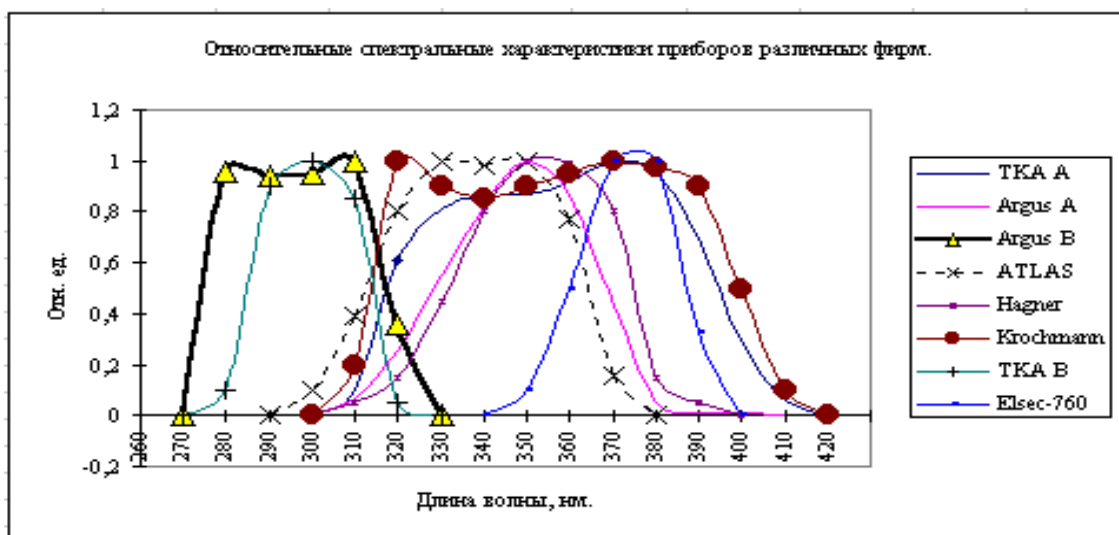
Оптическая схема прибора представляет собой полихроматор на дифракционной решетке с регистрацией разложенного излучения фотодиодной линейкой. Рабочий спектральный диапазон прибора составляет 390–740 нм. Диапазон линейности сигналов достигает шести порядков. В зависимости от конфигурации входного устройства прибор работает как в режиме яркомера, так и в режиме измерения освещенности. Обратная линейная дисперсия составляет 49 нм/мм.

Фотоэлектрические колориметры надежны в эксплуатации, достаточно просты в изготовлении. Недостатком же способа является трудность коррекции фотоприемника под заданную эффективную чувствительность и невозможность обойти явление метамеризма.

Недостатком второго способа является техническая трудность реализации измерительного прибора. В то же время нужно заметить, что знание спектрального состава исследуемого источника оптического излучения позволяет решить практически все колориметрические задачи, стоящие перед исследователем. Современные методы обработки информации дают возможность смоделировать с достаточной точностью любые эффективные спектральные характеристики приемников. При этом основная нагрузка по метрологическому обеспечению цветовых измерений ложится на точность измерения спектральной характеристики спектрофотокориметра в целом. Градуировку можно произвести с помощью источника с известным спектральным распределением или чисто спектрофотометрическим методом. В этом случае появляется возможность реализации поверочной схемы для средств измерений координат цвета и цветности, основанной на измерении спектральной чувствительности фотоприемника.

Разделение УФ излучения на зоны А, В, С предполагает использование фотометров с П-образной спектральной характеристикой фотоприемных устройств, что является очень сложной технической задачей. Практически невозможно произвести коррекцию спектральной чувствительности единичного фотоприемника с помощью цветных светофильтров в любой из зон под П-образный вид. Так, например, ведущие фирмы мирового уровня выпускают УФ радиометры со спектральными характеристиками, вид которых очень далек от П-образных.

Погрешность таких приборов, определяемая коррекцией спектральной характеристики ФПУ, как правило, имеет значение порядка 10 %. Так, например, при суммарной погрешности измерения энергетической освещенности серийно выпускаемым УФ радиометром «ТКА-АВС», равной 17 %, основной вклад вносит погрешность коррекции, составляющая 10 %. Погрешность коррекции ФПУ для измерения эффективных величин гораздо меньше и находится в пределах 3–5 %. Однако использование эффективных величин тормозит отсутствие нормативной базы на уровне ГОСТов. Думается, что требуется предпринять энергичные усилия по решению этого вопроса.



В целом же напрашивается мысль о необходимости перехода в ряде случаев на принципиально новые методы построения приборов для измерения интегральных параметров источников ультрафиолетового излучения в силу рассмотренных выше причин.

НТП «ТКА» развивает новое поколение измерительных приборов, основанных на измерении спектральных характеристик источников УФ излучения с последующим расчетом их интегральных характеристик в выбранной системе единиц.

На рис. 4 показана принципиальная оптическая схема опытного макета нового УФ радиометра. В качестве диспергирующего элемента используется дифракционная решетка, а приемника – GaP фотодиодная линейка. Так называемая косинусная насадка, формирующая пространственную чувствительность ФПУ, выполнена в виде алюминиевого шара. При этом освещенность внутренней поверхности шара не зависит от угла падения излучения во входное отверстие, т.е. фотометрическое тело, описанное концами вектора падающего излучения, соответствует закону косинуса.

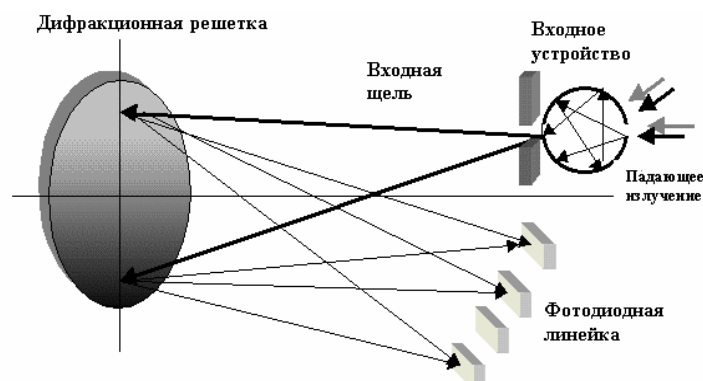


Рис. 4. Оптическая схема нового УФ радиометра

Исследовательские работы в данном направлении кажутся нам наиболее перспективными, так как появляется возможность решить корректно ряд задач измерения зонального УФ излучения спектральным способом с заданными погрешностями.

Литература

1. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. М.:Мир, 1978.
2. Тарасов К.И. Спектральные приборы. Л.: Машиностроение, 1968.
3. ГОСТ 8.205 – 90 Государственная поверочная схема для средств измерения координат цвета и цветности.

АППАРАТУРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ «ТКА» И ИХ МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПРЕПОДАВАНИЯ ОСНОВ ФОТОМЕТРИИ В ВУЗАХ

К.А. Томский

Рассмотрен круг вопросов, связанных с ведением учебного процесса в неоптических технических вузах. Дан перечень средств измерения рекомендуемых для оснащения фотометрических лабораторий. Определен примерный план практических занятий.

Для решения проблем повышения уровня знаний современных выпускников вузов на фирме «ТКА» была поставлена задача материального и методического оснащения образовательных центров, чтобы обеспечить нужный уровень восприятия инженерно-техническим персоналом последних достижений фотометрического приборостроения у нас в стране. С другой стороны, аппаратурные и методические разработки, направленные на совершенствование уровня образованности современных инженеров, позволяли надеяться на большую востребованность в перспективе приборов, выпускаемых фирмой «ТКА».

Широкая номенклатура рабочей фотометрической аппаратуры, разработанная специалистами предприятия «ТКА», позволила внедрить в сферу образования ряд аппаратурных комплексов по следующим дисциплинам.

1. Фотометрия. Величины, единицы, световая и энергетическая фотометрия.
2. Колориметрия. Измерения координат цветности и цвета. Различные колориметрические системы.
3. Метрология оптических измерений.
4. Измерительная техника в полиграфических технологиях (контроль цвета, лоска, белизны, оптической плотности).
5. Экология. Аттестация рабочих мест.
6. Обеспечение безопасности жизнедеятельности.

Во всех перечисленных курсах основой являются фотометрические измерительные приборы, разработанные в течение последних 10 лет. Образовательные учреждения много лет не имели возможности обновлять парк измерительной техники, в том числе и фотометров. В связи с этим от нескольких крупных учебных заведений, например, от ГУ кино и телевидения, от ГУ технологии и дизайна, от Московского ГУ печати на фирму «ТКА» поступали заявки на разработку и изготовление той или иной фотометрической аппаратуры. В результате были разработаны комплексные измерительные приборы («ТКА-ПК»), а также комплектовались по заданию институтов несколько измерительных устройств с учетом специфики данного вуза. Для ГУ технологии и дизайна и для Московского ГУ печати изготовлен, например, комплекс технологических фотометров для измерения цвета, белизны, лоска, оптической плотности. Для ГУ кино и телевидения в комплект приборов включены колориметры, яркомеры, в том числе кинопроекторные, пульсметры. Для других вузов перспективен набор фотометров для преподавания курса обеспечения безопасности жизнедеятельности в составе люксметров, УФ радиометров, оптических гигрометров.

Для успешного внедрения разработанной аппаратуры необходимо было снабдить приборы не только руководством по эксплуатации, но и методическими материалами, поясняющими специфику измерений той или иной характеристики, а также способ оценки погрешности измерений. Кроме того, в каждом конкретном случае требовались разъяснения, в какой области деятельности по профилю данного вуза необходимо использовать тот или иной фотометр. Эти материалы были подготовлены либо в виде руководства по конкретной измерительной задаче, либо в виде сборника методических указаний по выполнению нескольких тематически связанных лабораторных работ.

В качестве примера можно подробно рассмотреть методические материалы для ГУ технологии и дизайна и для ГУ кино и телевидения, в подготовке которых автор принимал непосредственное участие. Для Института печати ГУ технологии и дизайна подготовлено и выпущено два сборника методических указаний по проведению лабораторных работ по дисциплинам «Метрология» и «Экология». Технологические фотометры по отдельным написанным методическим указаниям использовались в курсах «Измерения в полиграфии», «Аттестация рабочих мест». Для ГУ кино и телевидения методические указания по лабораторным работам были составлены по курсу «Светотехника. Фотометрические измерения».

Если формальный перечень дисциплин, для преподавания которых использовались фотометры «ТКА», наполнить научным содержанием, то основные моменты, которым следует обучить студентов, можно представить следующим образом.

1. Наиболее часто используемые на практике фотометрические величины, их связь.
2. Специфика фотометрических измерений в ультрафиолетовой области. Сущность разбиения УФ области на зоны А, В, С. Измерения в вакуумной УФ области.
3. Исследование характеристик излучения экранов телевизоров и мониторов компьютеров: измерение однородности яркости экранов, измерения пульсаций излучения, измерения яркости раздельно в красной, зеленой и синей областях спектра, колориметрические характеристики.
4. Применение фотометрических методов в измерении влажности. Экспериментальная проверка закона Ламберта – Бугера – Бера.
5. Метрологическое обеспечение фотометрических измерений. Фотометрические эталоны, стандартные справочные данные в фотометрии и колориметрии. Стандартные справочные данные в фотометрии и в спектрофотометрии.
6. Исследование характеристик источников света. Стандартные источники типа А, В, С, Д. Спектральные и временные зависимости излучения источников света различных типов.
7. Исследования приемников оптического излучения. Спектральная чувствительность фотоприемников. Калибровка фотоприемников.
8. Контроль качества печатной продукции. Цветовые отличия копии от оригинала, равномерность цветовых отличия копии от оригинала, равномерность цвето- и тонопередачи по площади запечатываемого материала.
9. Аттестация рабочих мест на предприятиях. Измерение уровня освещенности на рабочих местах, контроль соблюдения санитарных и экологических требований при работе с компьютерами.

Список образовательных курсов, в которых полезно использовать фотометры «ТКА», можно расширять и дополнять в зависимости от специфики данного учебного заведения. Можно с уверенностью утверждать, что весьма полезными окажутся фотометры «ТКА» для подготовки специалистов в текстильной промышленности, в кожевенной, в лакокрасочной, в целлюлозно-бумажной промышленности и т. п.

Практически все области внедрения работы в образовательную сферу объединяет тот факт, что большую часть пользователей составляют неоптические вузы. Это означает, что теоретическую подготовку для полноценного восприятия основ фотометрии необходимо начинать с уровня знаний средней школы. Вместе с тем, классические учебники по фотометрии, такие, например, как курсы М.М. Гуревича, нуждаются в изложении, адаптированном к уровню современного студента-практика, студента-технолога. В ряде случаев специалистов по упомянутым специальностям готовят средние учебные заведения – лицеи, колледжи. Для них также необходима учебная литература, знакомство с которой позволило бы выпускникам этих образовательных организаций с пониманием относиться к возможностям практического использования знаний в области фотометрии.

В связи с этим был выполнен еще один, очень важный для перспективного использования фотометрической аппаратуры, этап: в качестве методического пособия написана книга «Светотехнические измерения». Содержание этой книги является введением в фотометрию, подготавливающим читателя к изучению различных ее разделов: фотометрические измерения, температурные источники света, основы теории цвета. Уделено внимание основным физическим явлениям, происходящим в газоразрядных источниках света. Коротко описаны основные характеристики спектральных приборов, использование которых позволяет студентам подготовиться к изучению специфики спектрометрии. Рассмотрены основные типы источников света и приемников излучения с целью подготовить студентов с профессиональными подходами к этой сфере деятельности фотометров. Специальная глава посвящена метрологическому обеспечению фотометрии. Рассмотрена Государственная поверочная схема для средств измерений непрерывных и импульсных световых потоков, а также поверочная схема для средств измерения координат цвета и цветности. Обращено внимание на современные рекомендации ISO по оценке погрешности результатов измерений. Основное отличие современного подхода к этому вопросу состоит в том, что вместо традиционных случайных и систематических погрешностей точность измерения характеризуют неопределенностью по типу А и по типу В. В тип А включают все погрешности, определяемые набором статистики, в тип В включаются все остальные оценки разброса значений измеряемых величин. В современных учебниках по метрологии подобного анализа пока не сделано, поэтому мы остановились на этой проблеме более подробно.

Вторая книга – учебное пособие «Основы светотехники» – посвящена особенностям оптических измерений в сравнении с другими видами измерений. Описана связь фотометрии с другими видами измерения – механическими, температурными, электрическими, физико-химическими – с позиций их использования в современных оптико-электронных приборах. Рассмотрены типовые узлы в измерительных оптических приборах. Оптические измерения рассмотрены в более широком ракурсе, чем фотометрия, т.е. включены основы интерферометрии, поляриметрии, рефрактометрии. Дано общее представление о зрительных трубах, микроскопах, телескопах, приборах с интерференционной модуляцией

В книге «Основы светотехники» в несколько расширенном объеме, в сравнении с книгой «Светотехнические измерения», рассмотрены источники и приемники излучения.

Как итог, следует сказать, что на основе разработанных рабочих фотометров создана материальная и методическая база для преподавания курсов, связанных с фотометрией, в институтах, техникумах (колледжах) и в лицах.

Литература

1. Козлов М.Г., Томский К.А. Светотехнические измерения. СПб: Изд. СПбУТиД, 2004. 307 с.
2. Ишанин Г.Г., Козлов М.Г., Томский К.А. Основы светотехники. Учебное пособие. СПб: Изд. «Береста», 2004. 290 с.

**ПРАКТИКУМ К ВИРТУАЛЬНЫМ ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ
В КУРСЕ «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»****О.А. Приходько, А.Н. Тупик**

В статье описаны основные принципы создания виртуальных лабораторных работ по курсу «Материаловедение». Подробно рассмотрены этапы проведения виртуальной лабораторной работы по закалке стали. Обязательным элементом практикума является интерактивная среда взаимодействия с обучаемым, что обеспечивает постоянный мониторинг знаний по изучаемой теме и объекту исследования.

Существующий в настоящее время лабораторный практикум по курсу «Материаловедение» предполагает в основном традиционный подход к проведению лабораторных работ, который обладает рядом недостатков:

- трудность персонального проведения эксперимента из-за специфических особенностей работы оборудования (повышенная опасность термических установок, токсичность охлаждающих сред, значительное время проведения термических обработок, большая вероятность выхода из строя элементов эксплуатируемого оборудования);
- существенные энергетические затраты;
- отсутствие достаточного количества вариантов проведения экспериментов;
- большая трудоемкость проведения поэтапного контроля за выполнением работы.

Альтернативой проведению студентами реальных лабораторных работ является разработка и применение виртуального лабораторного практикума, который должен быть максимально приближен к условиям реального эксперимента.

К достоинствам данного подхода можно отнести:

- возможность самостоятельного и дистанционного прохождения лабораторной работы (в единой информационно-коммуникационной среде);
- сохранность экспериментального оборудования;
- отсутствие затрат на расходные материалы, а также на содержание и обслуживание лабораторного комплекса;
- постоянный мониторинг знаний по изучаемому объекту исследования и действий обучаемого в процессе выполнения виртуальной лабораторной работы;
- возможность ориентации обучаемых на прогнозирование, обработку и анализ получаемых результатов с использованием физико-математических моделей;
- составление отчета о проведении лабораторной работы в электронном виде непосредственно в ходе выполнения самой работы;
- неограниченная реальными возможностями экспериментальной базы способность к варьированию объектов, методов и режимов экспериментального исследования.

Недостатками проведения лабораторных работ в виртуальном режиме являются:

- недостаточное развитие навыков управления реальными приборами;
- невозможность полностью избавиться от детерминированности процесса выполнения работы.

В основу построения лабораторного практикума курса «Материаловедение» заложены следующие принципы:

- успешное проведение работы возможно только при наличии у обучаемых предварительно сформированных теоретических представлений об изучаемых явлениях;

- обучаемые самостоятельно выбирают последовательность шагов для выполнения лабораторной работы в соответствии с целью ее проведения;
- обязательное использование анимационных, видео- и фотоизображений;
- включение элементов проблемно-эвристического подхода к обучению;
- выполнение очередного этапа работы и переход к следующему производится после прохождении одного из испытаний в виде:
 - решения расчетных задач и корректного сопоставления их результатов с реальными экспериментальными данными;
 - выбора правильного утверждения из нескольких предложенных;
 - проведение с виртуальными объектами действий, соответствующих цели исследования;
 - успешного преодоления небольших «экспериментальных» трудностей, основанных на опыте проведения реальных экспериментов;
- при неоптимальном прохождении этапов допустимо продолжение лабораторной работы с потерей части результатов.

Введение элементов проблемно-эвристического подхода заключается в данном случае в использовании обучаемым инвариантных (заданных, постоянных) знаний в виде предварительно полученной информации и вариативных (получаемых, неизвестных) знаний, которые обучаемый приобретает в процессе выбора верных вариантов ответов, выполнения оценочных расчетов и т.п.

В качестве примера рассмотрим выполнение лабораторной работы по закалке стали, выполняемой в виртуальном режиме.

Лабораторная работа в виртуальном режиме включает следующие этапы:

1 этап. Подготовительный

- 1 шаг: определение обучаемым основного практического предназначения закалки стали;
- 2 шаг: случайный выбор обучаемым одной из четырех целей лабораторной работы;
- 3 шаг: определение методики проведения эксперимента для достижения поставленной цели;
- 4 шаг: выбор марок стали для проведения эксперимента;
- 5 шаг: идентификация исходного фазово-структурного состояния стали.

2 этап. Начальный

- 1 шаг: выбор обучаемым первоначального действия при проведении эксперимента;
- 2 шаг: расчетная оценка твердости стали в исходном состоянии, исходя из твердости основных компонентов;
- 3 шаг:
 - измерение твердости с помощью виртуального твердомера (на анимационной модели твердомера, имитирующей реальный прибор, устанавливается виртуальный образец, и обучаемым производятся действия в соответствии с инструкцией к реальному прибору; возможна имитация некоторых типичных ошибок: измерение на краю образца, приложение слишком большого усилия к образцу, превышающего максимальную нагрузку измерения и т.п.);
 - перевод результатов измерения из твердости Роквелла в твердость по Бринеллю;
 - анализ различия между расчетной и экспериментальной твердостью.

3 этап. Основной

- 1 шаг: выбор температуры нагрева стали под закалку в соответствии с целью работы с помощью анимированной диаграммы состояния;
- 2 шаг: выбор среды охлаждения для осуществления закалки;
- 3 шаг: выявление структуры стали после охлаждения с использованием виртуального оптического микроскопа, включающее подготовку поверхности, химическое травление

образца для выявления структуры, манипулирование органами управления микроскопом,

4 шаг: идентификация полученной структуры стали;

5 шаг: измерение твердости на виртуальном твердомере.

Продолжение основного этапа заключается в повторении эксперимента термической обработки при других параметрах процесса в соответствии с целью работы.

4 этап. Заключительный

1 шаг: построение кривой зависимости твердости от температуры нагрева под закалку с учетом диаграммы состояния;

2 шаг: анализ полученных результатов, заключающийся в их объяснении с использованием теоретических представлений о термической обработке стали;

3 шаг: составление электронного отчета, включающего цель работы, изображения структур, полученных на всех этапах, итоговую таблицу значений твердости, график зависимости твердости от режимов закалки, анализ полученных результатов.

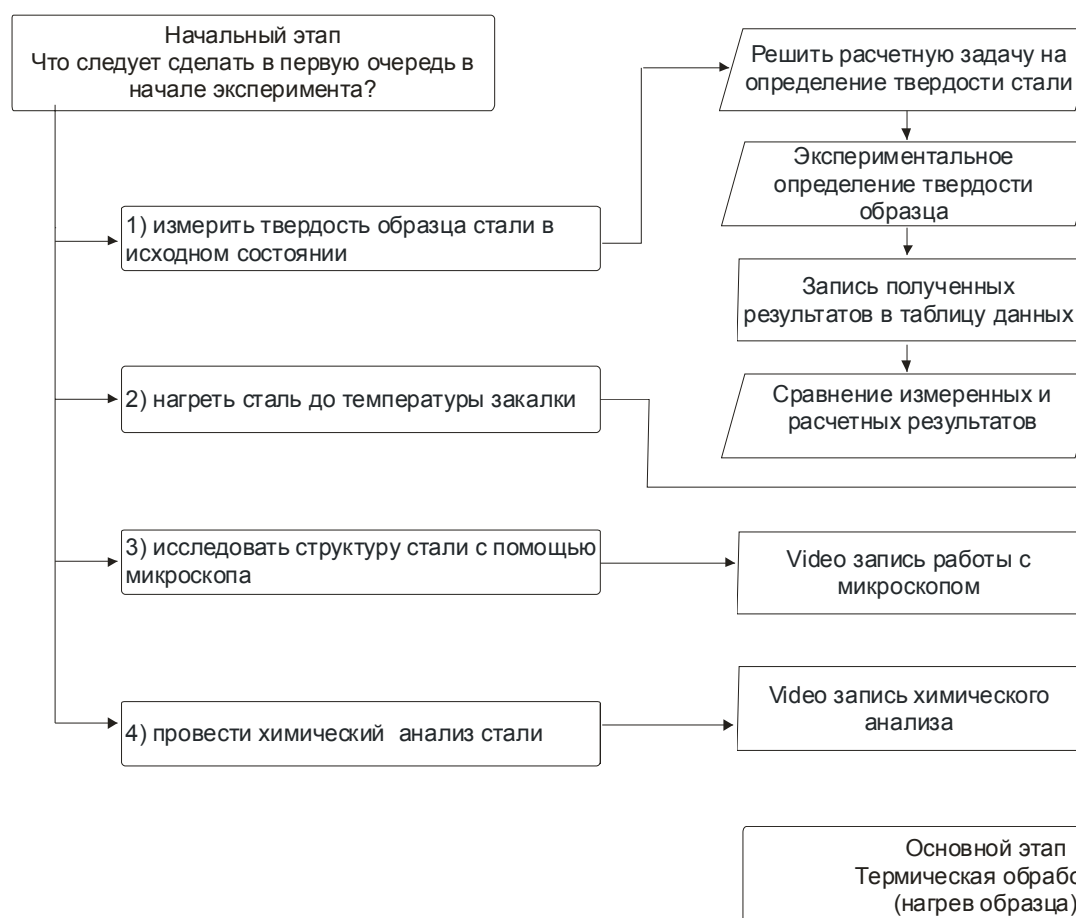


Рис.1. Примерный алгоритм начального этапа лабораторной работы закалки стали, иллюстрирующий варианты продолжения работы в зависимости от самостоятельного выбора обучаемого (неоптимальные варианты 2, 3 и 4 разрешают переход к следующему этапу лабораторной работы, но при отсутствии данных измерения твердости стали в исходном состоянии)

Для приближения виртуальной работы к реальной имитируются термические устройства, приборы и органы их управления: измерение и регулировка температуры, цвет нагретого образца и т.п.

Практикум предполагает, что обучаемый и при выборе неоптимального варианта проведения лабораторной работы может быть допущен к ее дальнейшему продолжению (рис. 1). При этом он не получает результатов или получает результаты, соответ-

вующие выбранному варианту, но которые не соответствуют либо цели работы, либо поставленной задаче, что будет учтено при окончательной оценке.

В процессе создания лабораторного практикума использовались: программный пакет Flash MX (анимация создана с помощью языка ActionScript) и программа ImageReady. Для виртуальной лабораторной установки использовались цифровые фотографии реальных измерительных приборов, обработанные в графическом редакторе Photoshop.

Таким образом, предлагаемый виртуальный лабораторный практикум предполагает:

- постоянный мониторинг знаний и действий обучаемого при выполнении лабораторных работ путем пошагового тестирования;
- проведение лабораторных работ на виртуальных лабораторных установках с учетом реальных экспериментальных данных;
- большое разнообразие траекторий выполнения работ;
- анализ результатов, оценку полученных экспериментальных данных и составление отчета в электронном виде.

Разрабатываемый практикум виртуальных лабораторных работ в курсе «Материаловедение» позволяет оценить знания и умения обучаемого, что может использоваться как критерий допуска студентов к прохождению реальной лабораторной работы. Планируется использовать практикум в системе дистанционного обучения СПбГУ ИТМО по предмету «Материаловедение». Таким образом, традиционные формы проведения лабораторных работ можно успешно дополнить виртуальным лабораторным практикумом.

Литература

1. Зависимость свойств материалов от состава и структуры: Учебное пособие / Голубок А.О., Карташов А.М., Кerpелева С.Ю., Круглов А.А., Приходько О.А. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. 97с.
2. Материаловедение: Учебник для вузов / Под ред. Арзамасова Б.Н. М.: Изд-во МГГУ им. Баумана, 2003. 648 с.: ил.
3. Приходько О.А., Симоненко О.Г., Подгорбунских Е.В. Система дифференциального контроля знаний с помощью ЭВМ МИР-1 / Сб. научно-методических статей по технологии металлов, др. конструкционных материалов и материаловедению. Вып. 6. М.: Высшая школа, 1981. 6 с.

РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ ПРИБОРНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.А. Лукина, А.С. Бахвалов

Проведена оценка применимости приборно-аналитического комплекса на базе современного рентгенофлуоресцентного прибора «РЕАН» в различных областях промышленности. Рассмотрены технические и программно-методические особенности прибора, даны рекомендации по его применению.

Введение

Производство любого типа материалов требует формирования аналитической базы, необходимой, в первую очередь, для исследований вещественного состава материалов на различных стадиях технологического процесса, а также для осуществления актуального в настоящее время экологического контроля. Для решения этой задачи необходимо создание единой информационно-аналитической системы, наиболее рационально обеспечивающей данными о вещественном составе исходного сырья, сопутствующих материалов, готовой продукции и экологических проб.

В последнее время в аналитической практике все большее распространение получает рентгеноспектральный флуоресцентный анализ (РСФА) [1]. Современная рентгенофлуоресцентная аппаратура обладает аналитическими возможностями, обеспечивающими ее широкое распространение в различных областях промышленности: сырьевой, металлургической, в рециклинге вторичного сырья и т.д. При разработке рентгенофлуоресцентных комплексов большое внимание уделяется не только аппаратурно-техническим средствам, но и программно-методическому обеспечению. При этом возможно создание как узкоспециализированных приборов, адаптированных под конкретные аналитические задачи, так и универсальных комплексов, рассчитанных на широкий круг задач. Примером подобного универсального комплекса является разрабатываемый в ОАО «Научные приборы» рентгенофлуоресцентный анализатор «РЕАН», внешний вид которого представлен на рис. 1.

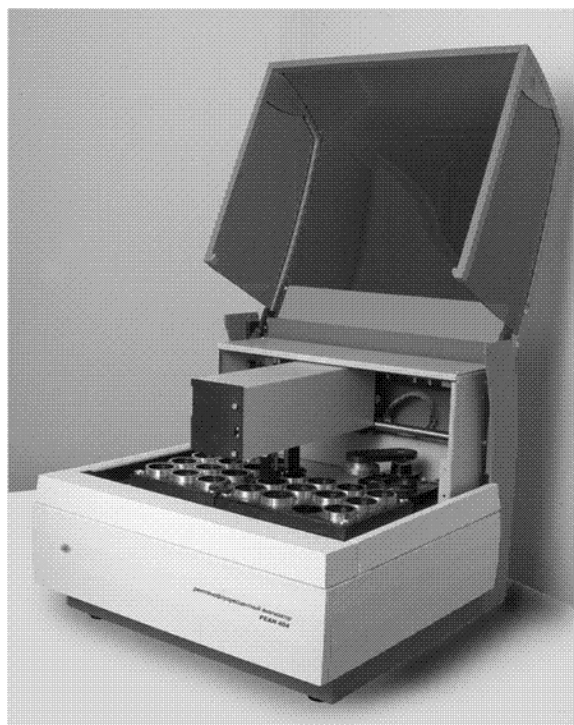


Рис. 1. Внешний вид спектрометра «РЕАН»

Технические особенности

Отличительной особенностью прибора по сравнению с аналогами является наличие узла автоматической подачи образцов (автосамплера). Это позволяет использовать прибор в непрерывном режиме и значительно сократить время анализа одной пробы, что актуально для геологических и металлургических предприятий. Техническое оснащение прибора позволяет анализировать твердые, порошковые и жидкие пробы. Размеры проб соответствуют внутреннему диаметру кювет: 42, 20, 16 или 10 мм. Кюветы диаметром 20, 16 и 10 мм размещаются в специальных держателях, что позволяет одновременно вводить в аналитическую камеру по 2, 3 или 6 проб, соответственно. Для смены проб непосредственно в аналитической камере предусмотрен механизм вращения, который можно также использовать для вращения большой одноместной кюветы с целью усреднения результата по поверхности образца.

Анализ образцов с размерами, существенно меньшими 10 мм, производится с использованием специальных оправок, «прозрачных» для рентгеновского излучения, устанавливаемых в кюветы диаметром 10 мм. Назначение оправки – центрировать объект исследования в облучаемой области.

Предметы, не помещающиеся в кюветы, от которых нельзя отделить пробу подходящего размера, можно разместить на верхней панели прибора при снятом автосамплере. Визуальный контроль области предмета, в которой производится анализ, осуществляется с помощью встроенной видеокамеры.

Таким образом, спектрометр «РЕАН» является универсальным прибором, позволяющим не только проводить валовый анализ специально подготовленных проб, но также исследовать микрообъекты и крупногабаритные образцы произвольной формы и размеров, что делает возможным его применение в криминалистических лабораториях.

Основные технические характеристики спектрометра «РЕАН» приведены в табл. 1. Остановимся подробнее на некоторых из них.

Энергетическое разрешение		< 150 эВ
Статистический предел обнаружения	Na – Ca	0,03% масс.
	Sc – U	0.001% масс.
Погрешность измерения скорости счета (основной аппаратной погрешности)		< 0.5%
Стабильность систем возбуждения и детектирования (среднеквадратическое отклонение)		< 0.3 %
Количество проб, устанавливаемых в автосамплер		до 144
Время измерения одной пробы		от 10 сек
Атмосфера для анализа легких элементов		вакуум, гелий
Вакуум		< 1 мм.рт.ст
Габариты, мм		700*600*400
Масса комплекса		33 кг
Потребляемая мощность		1 кВт
Напряжение питания		220 В
Фильтры первичного излучения		Ti - 0.1 мм; Cu - 0.15, 0.30 мм. Mo - 0.05, 0.1 мм; Ag - 0.02; Al - 0.1, 0.7, 1.4 мм; Zr - 0.1 мм;

Таблица 1. Основные характеристики спектрометра «РЕАН»

Одна из проблем рентгенофлуоресцентного метода – анализ легких элементов (Na–Ca), характеристическое излучение которых поглощается воздухом. Для решения этой проблемы в аналитической камере создается вакуум или атмосфера более легкого, чем воздух, гелия. При этом, анализируя в вакууме порошковые пробы, не обязательно

их прессовать, достаточно лишь вставить в кювету поверх насыпанной пробы специальный фильтр.

Гелиевая атмосфера может применяться при анализе крупногабаритных объектов, когда откачка воздуха невозможна. В таком случае, с помощью специальных напускных клапанов создается поток гелия (гелиевый коридор) от детектора к пробе, что обеспечивает возможность регистрации легких элементов.

Устройство блока регистрации позволяет использовать новейшие энергодисперсионные детекторы с электроохлаждением на Пельтье-элементах: кремниевый дрейфовый (фирма KETEK); Si-Pin (фирма AMPTEK), а также кремний-литиевый детектор с охлаждением жидким азотом (фирма RÖNTEC). Сравнительные характеристики указанных детекторов приведены в табл. 2. Выбор детектора зависит от конкретных аналитических задач. В спектрометре также присутствует отдельный рентгенолюминесцентный канал регистрации характеристического излучения материала анода трубки, некогерентно рассеянного на образце. Эта информация применяется для нормировки спектров и расчета концентраций способом стандарта-фона.

Детектор	Энергетический диапазон, кэВ	Максимальная загрузочная способность, кГц	Энергетическое разрешение по линии MnKa, эВ	Количество уровней дискретизации
KETEK	1÷35	20	130 ÷ 157	4096
AMPTEK	1,5 ÷ 40	3	145 ÷ 200	
RÖNTEC	1 ÷ 40	20	129 ÷ 138	

Таблица 2. Сравнительные характеристики детекторов

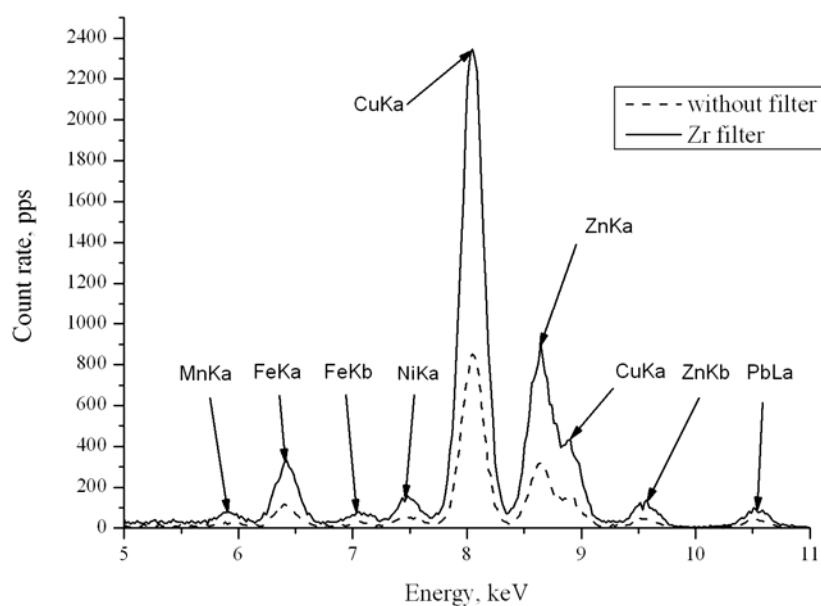


Рис. 2. Спектры сплава 6082 с применением Zr фильтра и без него

В базовом варианте прибора установлена мощная рентгеновская трубка с боковым окном и родиевым анодом, однако возможна установка рентгеновских трубок с другими материалами анодов. Преимуществом прибора также является наличие блока фильтрации первичного излучения. Первичные фильтры применяются с целью:

- снижения уровня фона в заданном диапазоне длин волн;
- снижения интенсивности характеристического излучения анода;
- монохроматизации первичного излучения.

Выбор оптимального фильтра может быть произведен как расчетным, так и экспериментальным путем [2]. Из рис. 2 видно, что применение первичного циркониевого фильтра при анализе алюминиевого сплава 6082 позволило значительно повысить соотношение сигнал/фон.

Программно-математическое обеспечение

Программное обеспечение рентгенофлуоресцентного комплекса РЕАН имеет два основных функциональных модуля – модуль валового анализа и исследовательский модуль.

Модуль валового анализа выполняет следующие функции:

- загрузка параметров измерения для валового анализа;
- потоковые измерения заданного количества проб с загруженными параметрами;
- обработка измеренных спектров по заранее созданным методикам;
- запуск дополнительных технических программ;
- сохранение измеренных спектров и результатов их качественного и/или количественного анализа в заданную директорию и создание отчета с выводом его на печать.

Исследовательский модуль разделен на два блока – качественный анализ и количественный анализ. Блок качественного анализа выполняет следующие функции:

- отображение справочной информации по химическим элементам, в том числе характеристических линий и их графическое представление;
- хранение информации о фундаментальных параметрах;
- поиск элементов, соответствующих заданным критериям;
- быстрое измерение спектра с возможностью его сравнения и предварительного анализа в процессе набора спектра;
- ручной и автоматический поиск линий элементов в спектре;
- проведение энергетической калибровки прибора.

Модуль количественного анализа предназначен для расчета концентраций элементов в неизвестном образце способами стандарта-фона, фундаментальных параметров (в том числе, безэталоного), а также несколькими регрессионными способами: линейной регрессии, Лукаса–Туса, Кляйсе–Квентина и Лачанса–Трейла [3]. Возможно создание собственной регрессионной формулы с помощью встроенного редактора.

При количественном анализе исследуемый спектр моделируется с помощью фоновой модели, на которую накладываются гауссово-подобные характеристические линии. Полуширина гауссовых линий определяется физическими и аппаратными параметрами, а их амплитуда соответствует искомой интенсивности аналитических линий. Полученные интенсивности используются для расчета концентраций с помощью одного из приведенных выше методов.

Конечным результатом работы блока количественного анализа является не только получение концентраций, но и разработка методики, которая в дальнейшем может быть использована для автоматического анализа неизвестных проб в валовом режиме. Таким образом, возможен непрерывный количественный анализ технологических образцов с выводом информации в заданном формате. Структура программного обеспечения предусматривает также подключение дополнительных блоков, специализированных под конкретные задачи (сортировка, разбраковка и т.д.). Гибкая настройка программы позволяет получать необходимую информацию даже неквалифицированному пользователю, с реализацией максимальных возможностей прибора.

В настоящее время рентгенофлуоресцентный комплекс «РЕАН» применяется для исследований алюминиевых, медных и титановых сплавов, сталей, цемента, геологических образцов, криминалистических объектов и продуктов алюминиевого производства. Результаты исследований показывают возможность применения комплекса в ука-

занных областях. Пример результатов метрологической аттестации, проведенной для алюминиевых сплавов, приведен в табл. 3, в которой представлены следующие параметры, полученные при тридцатикратном измерении одного стандартного образца: аттестованное значение концентрации элемента в стандартном образце C_0 ; среднее значение рассчитанных способом стандарта-фона концентраций $\bar{C}^A$; среднее квадратичное отклонение (СКО) результатов измерений σ , относительное СКО (воспроизводимость) σ_r и допустимое значение воспроизводимости σ_{dr} .

Элемент	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
C_0 , % масс.	0,3	0,005	0,14	0,6	0,09	1,9	0,40
$\bar{C}^A$, % масс.	0,21	0,005	0,14	0,43	0,09	1,8	0,39
σ , % масс.	0,02	0,001	0,01	0,03	0,01	0,1	0,03
σ_r , % отн.	9,1	8,2	7	6,3	10	6,3	6,7
σ_{dr} , % отн.	11	8,5	11	13	16,8	11	21

Таблица 3. Оценка метрологических параметров рентгеноспектрального определения Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu и Zn

Заключение

На данный момент создан опытный образец спектрометра «РЕАН» и ведется работа по его модернизации и наладке серийного выпуска. Однако даже на этой стадии можно судить о высоких аналитических возможностях прибора. С целью оценки применимости прибора в промышленности был решен ряд аналитических задач. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения рентгенофлуоресцентного приборно-аналитического комплекса на базе спектрометра «РЕАН» для проведения технологического и экологического контроля в различных областях промышленности.

Литература

1. Рентгенофлуоресцентный анализ / В.П. Афонин, Н.И. Комяк, В.П. Николаев, Р.И. Плотников. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1991.
2. Бахвалов А.С., Лукина В.А. Первичная фильтрация как средство оптимизации рентгенофлуоресцентного анализа примесных элементов в алюминиевых сплавах. // Вестник II межвузовской конференции молодых ученых. Сборник научных трудов / Под ред. В.Л. Ткалич. Том 2. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. С. 258–261
3. Бахтияров А.В. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ в геологии и геохимии. Л.: Недра, 1985.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПАРОФАЗНОЙ ЭКСТРАКЦИИ ДЛЯ ИК-СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

В.Н.Бехтерев, В.М.Золотарев

В работе предложен оригинальный метод фракционирования многокомпонентных водных растворов органических веществ, названный парофазной экстракцией (ПФЭ). Разработанная кинетическая модель и механизм ПФЭ, а также проведенный модельный эксперимент позволяют выделить качественные и количественные отличительные особенности данного метода от газовой и жидкостной экстракции. Метод ПФЭ позволяет увеличить эффективность и интенсифицировать процедуру выделения гидрофильных органических компонентов из водных растворов, а также максимально устранить мешающее влияние воды на спектрофотометрический анализ растворов органических веществ. Получено выражение для количественного определения содержания целевого вещества в исходной пробе при ПФЭ.

При ИК-спектрофотометрических исследованиях многокомпонентных водных растворов органических веществ практически всегда стоит задача устранения мешающего влияния матрицы – воды [1–3]. Кроме того, для повышения информативности и селективности дополнительно требуется решать вопрос предварительного фракционирования изучаемой смеси органических соединений. В этой связи весьма актуальна проблема развития экстракционных методов выделения органических веществ из водной среды.

История жидкостной экстракции органических соединений насчитывает немногим около 50 лет. Накоплен значительный экспериментальный материал, созданы теоретические основы процесса экстракции, что дает возможность прогнозировать эффективность экстракционных систем. Вместе с тем, коэффициенты распределения ($K_p = C_{\text{орг}} / C_{\text{вод}}$) растворимых органических соединений даже в наиболее удачных системах «растворитель – вода» не превышают 50 [4]. Использование в качестве экстрагентов гидрофобных спиртов (пентиловый – дециловый), эфиров уксусной кислоты (бутилацетат – гептилацетат) показало, что с уменьшением числа углеродных атомов в молекулах растворителей-гомологов (спирты, эфиры) их экстрагирующая активность систематически повышается. Однако при этом резко возрастает растворимость экстрагента в воде, что не позволяет (и даже исключает) применение низкомолекулярных гомологов без специальной процедуры «высаливания» (введения в водную пробу больших количеств нейтральных солей). Возникает риск протекания побочных химических процессов, множество технологических трудностей и т.д.

Обсуждение проблемы и анализ результатов

В настоящей работе предложен вариант решения проблемы использования гидрофильных органических жидкостей для выделения водорастворимых органических веществ – парофазная экстракция. Исходным объектом исследования служила заведомо сложная для жидкостной экстракции система – водный раствор низкомолекулярных карбоновых кислот. Действительно, если в водный раствор уксусной, пропионовой и масляной кислот добавить смешивающийся с водой органический растворитель с температурой кипения ниже 100°C и произвести его отгонку, то в дистилляте методом газовой хроматографии регистрируется наличие органических кислот [5]. Эффективность извлечения спиртами в этом случае растет с увеличением молекулярной массы кислоты в рассматриваемом гомологическом ряду (табл. 1), т.е. с увеличением $T_{\text{кип.}}$. Это противоречит теории дистилляции, которая прогнозирует увеличение выхода продукта в конденсате с возрастанием летучести компонента смеси. Более того, как следует из полученных результатов, эффективность процесса (степень извлечения) зависит также и

от применяемого экстрагента (табл. 1): уменьшается с ростом углеводородного радикала. Установленные зависимости экстрактивных характеристик для извлекаемых веществ и экстрагентов объяснимы в рамках теории экстракции.

Действительно, для гидрофильных соединений, особенно ионогенных, таких как низкомолекулярные органические кислоты, молекула экстрагента в «борьбе с молекулой воды за растворенные вещества» должна обладать свойствами конкурента. В экстракции спиртами удлинение углеводородного радикала «уменьшает схожесть» молекулы экстрагента с молекулой воды, как минимум, в размерах и межмолекулярном взаимодействии, ведет к возрастанию свойств, характерных для органических веществ (напр., диэлектрическая проницаемость). Это уменьшает «конкурентную способность», через изменение силы ван-дер-ваальсовских взаимодействий молекул экстрагента с молекулами целевого соединения.

Состав пробы	Масса дистиллята, г	Содержание орг. кислот в дистилляте, мкг/мл (степень извлечения в %)		
		Уксусная	Пропионовая	Масляная
303,5мл вод. раствора О.К.+ 30мл метанола	44,3	24,6 (4,5)	58,3 (11,5)	107,6 (20,7)
303,5мл вод. раствора О.К.+ 30мл этанола	34,8	15,2 (2,2)	40,3 (6,3)	79,9 (12,1)
303,5мл вод. раствора О.К.+ 30мл изопропанола	38,1	12,3 (2,0)	33,6 (5,7)	67,6 (11,2)

Примечание: исходное содержание кислот в воде составляло соответственно: уксусной – 78,9, пропионовой – 73,9, масляной – 75,8 мкг/мл, О.К. – объект контроля.

Таблица 1. Парофазная экстракция органических кислот алифатическими спиртами

Следует также дополнительно указать на отличие парофазной экстракции, как экстракции паром органической жидкости, от газовой экстракции (экстракция газом, выдувание, барботирование газом). Пар – газообразное состояние вещества, в которое оно переходит при испарении, но, в отличие от газа, находится ниже так называемой «критической температуры». Данное обстоятельство указывает на то, что между паром и конденсированной фазой остается ряд общих физико-химических свойств. В частности, известно, что пар индивидуальных органических веществ и их смесей состоит из отдельных молекул и их различных ассоциатов. Критические температуры использованных в работе органических экстрагентов лежат существенно выше температур проведения экспериментов. Сказанное с учетом сложившейся терминологии и общепринятой классификации позволяет дать название экстракции целевых компонентов из воды паром органической жидкости – парофазная экстракция (ПФЭ). Предложенная кинетическая модель механизма изучаемого процесса и получаемые в подтверждение экспериментальные экстракционные параметры на основании теоретических представлений свидетельствуют о справедливости этого.

Механизм наблюдаемого явления, как нам представляется, может быть следующим. При кипении, отгонке добавленного растворителя (в частности, спирта) из водного раствора образующийся пар в газовых пузырьках в объеме пробы и пары над раствором в отгонной емкости («кубе») являются отдельной паровой фазой в гетерогенной системе «жидкость–пар». В результате трансграничного массообмена молекулы органических веществ постоянно переходят из одной фазы в другую и обратно. Пары спирта в нашем случае можно рассматривать как экстрагент по отношению к воде. Иными словами, механизм процесса – экстракционный: экстракция в пар добавленного отгоняемого растворителя, парофазная экстракция органических кислот из водного раствора спиртом.

Из кинетических соображений понятно, что скорости проникновения веществ из одной фазы в другую пропорциональны соответствующим концентрациям экстрагируемого компонента. Традиционно динамику процесса уподобляют квазихимической реакцией первого порядка. Тогда для скорости перехода конкретного вещества из жидкой фазы v_L в пар и обратно v_V справедливы выражения:

$$v_L = k_L \times C_L, \quad (1)$$

$$v_V = k_V \times C_V, \quad (2)$$

где k_L – константа скорости перехода конкретного вещества из жидкой фазы в пар; C_L – концентрация конкретного компонента в жидкой фазе; k_V – константа скорости перехода конкретного вещества из пара в жидкость; C_V – концентрация конкретного компонента в паровой фазе.

При достижении динамического равновесия, когда число перешедших молекул вещества из жидкости в пар в единицу времени равно числу его молекул, возвращающихся из пара в жидкость, можно записать:

$$v_L = v_V, \quad (3)$$

$$k_L \times C_L = k_V \times C_V, \quad (4)$$

$$C_V / C_L = k_L / k_V = K_{eq}, \quad (5)$$

Константа равновесия (распределения) K_{eq} характеризует экстрактивные свойства добавляемого органического растворителя. При $K_{eq} < 1$ равновесная концентрация извлекаемого вещества выше в жидкости (воде), и, наоборот, при $K_{eq} > 1$ равновесная концентрация экстрагируемого соединения выше в паровой фазе. С учетом этого становится понятным, что при традиционной перегонке с водяным паром низкомолекулярных органических кислот количественное выделение последних в дистиллят происходит лишь при 10–15-кратном превышении объема конденсата над пробой [6], т.е. $K_{eq} \ll 1$. Преимущественное направление перемещения извлекаемого компонента через границу фаз с позиции теории экстракции определяется межмолекулярными взаимодействиями: молекулы растворенных веществ перемещаются в ту фазу, где они сильнее (между молекулой экстрагента и целевого соединения, в частности). Действительно, при прочих равных условиях, когда в обоих случаях матрица – это молекулы воды, в конденсированной среде межмолекулярные взаимодействия намного сильнее, чем в паровой.

Далее, с учетом материального баланса, когда в начале опыта целевое вещество все полностью сосредоточено в воде, можно записать:

$$m_0 = m_L + m_V, \quad (6)$$

где m_0 – начальная масса вещества в пробе (воде); m_L – масса в жидкой фазе (водной) после установления равновесия; m_V – масса вещества в паровой фазе (в парах спирта) после установления равновесия.

Учитывая (6), выражение (5) можно представить в виде:

$$K_{eq} = m_V \times V_L / (m_0 - m_V) \times V_V \quad (7)$$

или

$$K_{eq} = V_L / (m_0 / m_V - 1) \times V_V, \quad (8)$$

где V_L – объем жидкой фазы (водной); V_V – объем паровой фазы.

Поскольку в условиях эксперимента пар полностью конденсируют и собирают в приемную колбу, то масса пара M_V равна массе полученного дистиллята M_D :

$$M_V = M_D \quad (9)$$

или

$$V_V \times \rho_V = V_D \times \rho_D, \quad (10)$$

$$V_V = (\rho_D / \rho_V) \times V_D, \quad (11)$$

где ρ_D – плотность получаемого дистиллята; ρ_V – плотность паровой фазы; V_D – объем дистиллята.

С учетом (8)–(11) можно записать следующее выражение:

$$*K_{eq} = K_{eq} \times (\rho_D / \rho_V) = V_L / (m_o / m_D - 1) \times V_D. \quad (12)$$

Величина ρ_D / ρ_V постоянна, так как пар и получаемый из него дистиллят составлены в одинаковых пропорциях из воды и органического экстрагента. Содержание выделяемых органических кислот несоизмеримо мало, и их вкладом в формирование удельного веса пара и соконденсата можно пренебречь. Отметим, что выражение (12) является своего рода интегральной характеристикой процедуры ПФЭ, поскольку в процессе извлечения целевых компонентов наблюдаются флуктуации состава и плотности пара и собираемого соконденсата. Тем не менее, как показал эксперимент, полученное в результате приведенных выше теоретических представлений о механизме явления ПФЭ уравнение (12) выполняется хорошо. В таком случае получаемая константа распределения $*K_{eq}$, являясь константой экстракционного равновесия, не должна зависеть ни от концентрации извлекаемых компонентов, ни от взятых для парофазной экстракции объемов пробы воды и экстрагента. Следует ожидать ее зависимость от барометрических условий эксперимента через изменение плотности пара от внешнего давления и конструктивных особенностей экстракционной ячейки (так называемая «приборная функция») через зависимость удельного веса пара (сжимаемость).

Таким образом, механизм парофазной экстракции гипотетически можно представить классической картиной жидкость–жидкостной экстракции из объема воды в объем добавленного органического растворителя, который, неограниченно смешиваясь с водой, фактически не имеет с ней границы раздела.

Из уравнения (12) может быть получено выражение для определения содержания целевого вещества в исходной пробе:

$$m_o = m_D \times (1 + V_L / *K_{eq} \times V_D). \quad (13)$$

Определяемая $*K_{eq}$ является физико-химической постоянной для системы «извлекаемый компонент–вода–экстрагент». При соблюдении в эксперименте постоянства барометрических условий, «приборной функции» и отношения V_L / V_D (одинаковая взятая порция экстрагента на ПФЭ и постоянный объем собираемого дистиллята-экстракта), осуществив хотя бы двукратное последовательное парофазное извлечение целевого вещества из исследуемого образца воды, можно установить его исходное содержание в пробе. Исключив из системы уравнений (12)–(13) постоянную $*K_{eq}$, получаем:

$$m_o = m_{D,1}^2 / (m_{D,1} - m_{D,2}), \quad (14)$$

где $m_{D,1}$ – масса экстрагируемого методом ПФЭ вещества в первом экстракте-дистилляте; $m_{D,2}$ – масса экстрагируемого методом ПФЭ вещества во втором экстракте-дистилляте (или последующем, если было произведено многократное парофазное извлечение).

Выполнение условия (12) позволяет определять неизвестные константы экстракционного равновесия $*K_{eq}$ для исследуемого органического вещества (назовем его «X») по соответствующей константе соединения (назовем его «A»), для которого она уже была ранее установлена. Для этого необходимо определенное количество вещества «A» $m_{A,o}$ добавить в раствор вещества «X» с его исходной массой в пробе $m_{X,o}$ и произвести парофазную экстракцию. Тогда с учетом (12) отношение констант парофазной экстракции можно выразить уравнением:

$$K_{A,o} / K_{X,o} = (m_{X,o} / m_{X,D} - 1) / (m_{A,o} / m_{A,D} - 1) \quad (15)$$

или

$$K_{X,o} = K_{A,o} \times (m_{A,o} / m_{A,D} - 1) / (m_{X,o} / m_{X,D} - 1), \quad (16)$$

где $m_{A,D}$, $m_{X,D}$ – соответственно массы веществ «A» и «X» в экстракте-конденсате.

Таким образом, определив соответствующие массы веществ «A» и «X» в получаемом экстракте-конденсате и исходном образце по известной константе парофазной экстракции $K_{A,o}$ можно получить ее значение для вещества «X». При этом уже нет не-

обходимости проводить серии экспериментов по парофазной экстракции этого химического соединения для накопления массива данных и статистической обработки. Разумеется, это все справедливо в случае химической нейтральности данных веществ по отношению друг к другу и отсутствия каких-либо физико-химических изменений в матрице связанных с добавлением вещества «А» к веществу «Х».

Заметим, что выражение (13) легко трансформируется в уравнение, напоминающее формулу для определения исходной концентрации вещества в воде при газовой экстракции (парофазном анализе):

$$m_o / V_L = (V_D / V_L + 1 / {}^*K_{eq}) \times m_D / V_D. \quad (17)$$

Однако между величиной m_o/V_L и исходной концентрацией анализируемого вещества C_o нельзя поставить знак равенства. В процессе парофазного извлечения, в отличие от газовой экстракции, объем жидкой фазы меняется за счет остающейся в пробе части экстрагента и испарения воды с последующей конденсацией ее в получаемом парофазном экстракте.

Эта особенность, а также открывающиеся большие перспективы применения ПФЭ для преданалитического фракционирования органических веществ из многокомпонентных водорастворимых систем будут продемонстрированы ниже на примере проведенных экспериментов. Величина ${}^*K_{eq}$ зависит от химической природы применяемого органического растворителя. В отличие от газовой экстракции, где спектр применяемых газов-экстрагентов ограничен, при парофазном извлечении, выбирая из огромного числа органических растворителей необходимый экстрагент, можно:

- избирательно извлекать гидрофильные или гидрофобные органические компоненты (разработана ПФЭ-аппаратура для серийно выпускаемой спектрофотометрической техники, позволяющая вводить в систему и гидрофобные нерастворимые в воде органические экстрагенты);
- извлекать отдельные классы или группы органических соединений;
- применяя последовательно ПФЭ – пере- и -реэкстракцию, селективно изолировать отдельные химические соединения и т.д.

Кроме того, следует отметить еще ряд выгодных качеств ПФЭ. Аппаратурное оформление эксперимента, в отличие от ПФА, существенно проще (герметичность, сжатые газы, бароизмерительные приборы и т.п.). Получаемые парофазные экстракты для снижения предела чувствительности анализа могут быть дополнительно сконцентрированы как традиционным методом упаривания, так и вымораживанием или сочетанием экстракции с вымораживанием.

На основе предложенной кинетической модели механизма парофазного извлечения органических соединений впервые определены константы экстракционного равновесия (константы распределения) ряда гидрофильных и гидрофобных органических веществ (константы экстракционного равновесия) в системах «вода – пары водорастворимого экстрагента» и «вода – пары гидрофобного нерастворимого экстрагента».

В качестве модельной системы изучена парофазная экстракция смеси низкомолекулярных органических кислот $C_2 - C_4$ в воде. Как следует из представленных в табл. 2 экспериментальных результатов, отсутствие учета изменения V_L и V_D в ходе проведения последовательного многократного (от 2 до 5 раз) парофазного выделения карбоновых кислот этанолом отражается на абсолютном значении ${}^*K_{eq}$. Тем не менее, в том и другом случае она является конкретным устойчивым параметром (константой) для каждой из трех приведенных систем «кислота-вода-этанол», характеризующим процесс парофазной экстракции этанолом из воды.

Это свидетельствует о том, что экстракционные свойства паров воды по сравнению с парами спирта ничтожны. Для сравнения в табл. 2 также приведены константы распределения изучаемых органических кислот при газовой экстракции азотом [7].

Как следует из представленных данных, определяемая в эксперименте константа парофазной экстракции $*K_{eq}$ по величине превышает константу газовой экстракции в случае уксусной кислоты более чем в 540 раз, пропионовой – в 1220 и масляной – в 1900 раз, соответственно. Поскольку она используется в уравнении (13) для расчета исходного содержания анализируемого компонента в пробе (аналогично газовой экстракции), то очевиден выигрыш примерно на три порядка в повышении чувствительности их анализа в воде.

Экстрагируемое вещество	Константа $*K_{eq}$, 90±5°C		Константа распределения кислот в системе азот-вода, при 90°C $K = C_{O.K.,газ} / C_{O.K.,вода}$ [7]
	Без учета испарения воды из пробы при ПФЭ	С учетом соконденсации воды в ПФЭ-дистилляте	
Уксусная кислота	0,13±0,011	0,32±0,038	0,00059±0,000025
Пропионовая кислота	0,46±0,051	1,1±0,13	0,00089±0,00004
Масляная кислота	0,84±0,079	2,0±0,20	0,00105±0,000055

Таблица 2. Парофазная экстракция низкомолекулярных органических кислот из воды этиловым спиртом

Вместе с тем, как следует из (12), получаемую характеристику $*K_{eq}$ парофазной экстракции нельзя отождествлять с константой распределения K_{eq} кислоты между парами спирта и конденсированной фазой – вода. Несложные расчеты показывают, что величина множителя ρ_D/ρ_V в (12) может составлять 1000–1500. Таким образом, истинная константа распределения K_{eq} при парофазной экстракции кислот C_2 – C_4 в системе «пары этанола – вода» является величиной такого же порядка, что и константа их распределения в системе «азот – вода».

Предположение, что на константу распределения K_{eq} извлекаемого органического вещества при ПФЭ в системе «пары экстрагента – вода» должна оказывать природа органического растворителя, взятого для проведения парофазного извлечения, нашло свое подтверждение. В частности, замена этанола на метиловый спирт приводит к заметному возрастанию константы парофазной экстракции выше указанных карбоновых кислот из воды. Так, константа $*K_{eq}$ для уксусной кислоты в этом случае составляет уже 0,40±0,050, для пропионовой – 1,47±0,056 и для масляной – 2,8±0,22. При выборе для парофазной экстракции указанных алифатических кислот заведомо очень гидрофобного растворителя – четыреххлористого углерода – происходит резкое падение величины константы парофазной экстракции. Значение $*K_{eq}$ для масляной кислоты при замене этилового спирта на четыреххлористый углерод уменьшается более чем в 30 раз и составляет 0,06±0,009. Если не выходить из используемого концентрационного диапазона содержания кислот в воде, то определение $*K_{eq}$ для уксусной и пропионовой кислот в этих условиях уже сопряжено с ограничениями чувствительности метода (ГЖХ-ДИП). Константа $*K_{eq}$ при парофазной экстракции уксусной кислоты четыреххлористым углеродом составляет 0,005±0,0014, а пропионовой – 0,013±0,0032.

Выводы по работе

Таким образом, перспектива использования парофазной экстракции в физико-химическом анализе органических соединений связана, прежде всего, с возможностью селективного фракционированного выделения исследуемых компонентов из водосодержащей среды на стадии подготовки пробы путем варьирования экстрагента. В работе впервые разработана кинетическая модель и предложен механизм ПФЭ при выделении органических кислот из их смеси в растворе. Проведенный модельный эксперимент показал, что эффективность фракционирования методом ПФЭ по сравнению с газовой экстракцией азо-

том той же пробы выше на два-три порядка. На основе анализа диффузионных трансграничных процессов и материального баланса веществ в растворе получено выражение для количественного определения массы целевого вещества в исходной пробе при ПФЭ.

Совместное применение ПФЭ и ИК-спектрофотометрических методов позволит повысить селективность, точность и достоверность определения конкретных классов органических веществ в водных средах (карбоновые кислоты, сложные эфиры, фенолы и др. в природных и технологических водах), максимально исключить мешающее влияние воды на точность спектрофотометрического анализа водных растворов органических веществ.

Литература

1. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия. М.: Мир, 1982, 328с.
2. Купцов А.Х., Жижин Г.Н. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров. Справочник М.: Физматлит, 2001.
3. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред. Л.: Химия, 1984. 218 с.
4. Коренман Я.И. Коэффициенты распределения органических соединений. Воронеж: Изд. ВГУ, 1992. 336с.
5. Заявка на изобретение № 2005105866 от 02.03.2005 Россия. Способ извлечения органических веществ из водной среды / Бехтерев В.Н., Кабина Е.А.
6. Кирюхин В.К., Мелькановицкая С.Г., Швец В.М. Определение органических веществ в подземных минеральных водах. М: Недра, 1976. 186 с.
7. Витенберг А.Г. Равновесная модель в описании процессов газовой экстракции. // Ж. аналитической химии. 2003. Т.58. №1. С.7–21.

**ЕСТЕСТВЕННОЕ ВОСПРИЯТИЕ ЗРИТЕЛЬНЫХ ОБРАЗОВ
И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ
ТАХЕОМЕТРА****Е.А. Воронцов, А.Д. Иванов, П.А. Липатов**

В работе представлен один из вариантов решения проблемы естественного для человека восприятия пространства техническими средствами, в частности тахеометром со специальным программным обеспечением, а также продемонстрирована методика построений различных вариантов перцептивной (нелинейной) перспективы.

Существуют две системы перспективы [1] (проекционного построения пространства на плоскости): прямая перспектива, открытая в эпоху Возрождения, которой пользуются до сих пор для передачи пространственных форм предметов реального мира на плоскости в виде изображения, и так называемая обратная перспектива, которая применялась в иконописи. Человек воспринимает ближний план в обратной перспективе, неглубокий дальний – в аксонометрии и только дальний план – в прямой перспективе. Причиной этого являются следующие три фактора [2]:

- бинокулярность зрения;
- подвижность точки зрения;
- действие механизма константности.

Совокупность обратной перспективы, аксонометрии и прямой перспективы называется перцептивной перспективой (от перцепция – восприятие) и является продуктом совместной работы зрения и мозга человека.

Зрительное восприятие человека обладает рядом свойств. Вот некоторые из них (важные с точки зрения теории восприятия зрительных образов).

Константность формы заставляет художника изображать мячик круглым, в каком бы месте картины он не находился, несмотря на то, что проективная геометрия требует изображать его в некоторых случаях в виде овала.

Константность величины (размера) объясняет, почему размер наблюдаемых предметов не меняется по законам классической линейной перспективы. Действительно, очень близкие предметы при восприятии автоматически уменьшаются мозгом, в то время как удаленные несколько увеличиваются.

Изображая реальный мир на плоскости, художник, фотограф всегда стремятся к естественной передаче (без заметных искажений) подобий, масштабов и глубины. Это важно и для систем технического зрения. Невозможно правильно передать эти три параметра одновременно.

На основании теории восприятия зрительных образов представляется возможным минимизировать искажения при передаче пространственных образов. Проблему можно решить несколькими способами:

- специальным программным обеспечением;
- добавлением в уже существующие приборы и устройства новых конструктивных элементов;
- созданием принципиально новых приборов и устройств.

Предлагается решение данного вопроса на программном уровне (специальное программное обеспечение). В качестве исходных данных (реальной информации об объекте) используются координаты точек, полученные посредством тахеометра (тахеометр (от греч. *tachýs*, родительный падеж *tachéos* – быстрый и метр), геодезический

прибор, применяемый для измерения на местности горизонтальных и вертикальных углов b и v , расстояний s и превышений h между точкой стояния и определяемой точкой). В зависимости от расстояния до рассматриваемой точки (расстояние также определяется тахеометром) применяется определенный коэффициент преобразования [1].

Таким образом, мы получаем преобразованные координаты, соответствующие образу естественного восприятия объекта. Алгоритм работы программы представлен на рис.1. При написании программы использовался язык программирования Delphi.

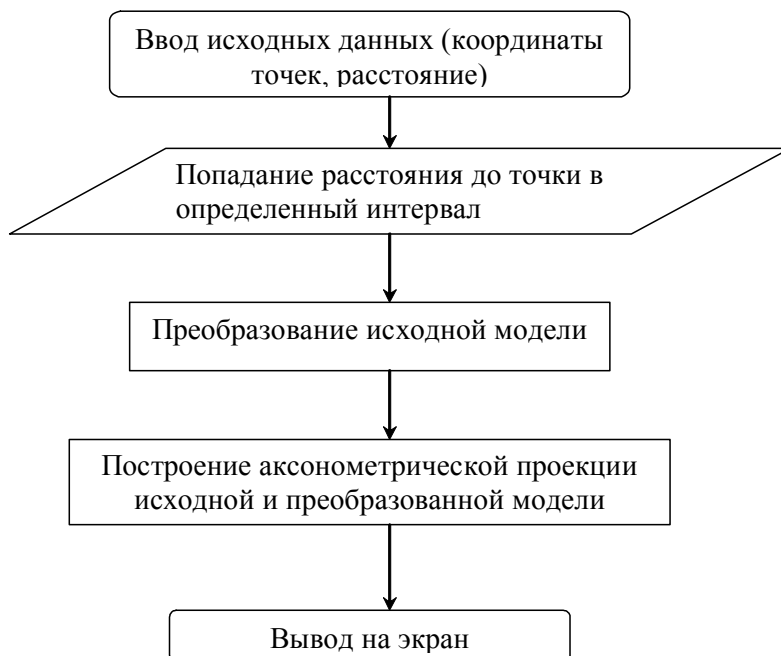


Рис. 1. Алгоритм преобразования

Для получения аксонометрической проекции на экране дисплея [3] мы должны определенным образом сориентировать модель относительно экрана дисплея, т.е. относительно плоскости проекции[3]. Для этого необходимо связать с моделью систему отсчета $M_d (x_d, y_d, z_d, 1)$ и выполнить переход с помощью матрицы $M_{дп}$ от системы $(x_п, y_п, z_п, 1)$ к системе $(x_d, y_d, z_d, 1)$. Далее необходимо:

1. повернуть модель вокруг оси Y_0 на угол $\Phi = -45^\circ$. Это выведет из плоскости экрана ось X_0 системы отсчета, связанной жестко с моделью (т.е. так повернется сама модель), а ось Z_d станет наклонной к плоскости экрана на угол 45° (см. рис. 2.);

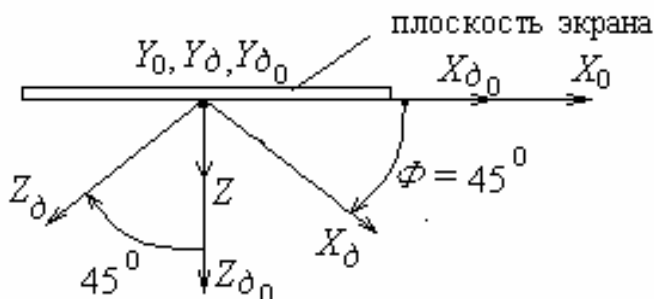


Рис. 2. Вид на экран сверху

2. повернуть модель вокруг горизонтальной оси X_{d0} на угол $\theta = (+35,264)^\circ$. При этом все три оси системы отсчета, жестко связанные с моделью, будут наклонены к плоскости экрана под одинаковыми углами (см. рис. 3).



Рис. 3. Вид на экран справа

Матрица M_y , описывающая вращение вокруг оси X_0 :

$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Часто удобно работать с матрицей, описывающей оба эти вращения:

$$M_{yx} = M_y \cdot M_x = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \phi; & \sin \theta \sin \phi; & -\cos \theta \sin \phi; & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ \sin \phi & -\sin \theta \cos \phi; & \cos \theta \cos \phi; & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Произведение матриц $C_\Sigma^{(3)} \cdot M_d$ и M_{yx} даст

$$C_\Sigma^{(3)} \cdot M_{\text{ЛБ}} \cdot M_{yx} = C_\Sigma^{(3)*} \quad (3)$$

т.е. новую матрицу $C_\Sigma^{(3)*}$, которая содержит значения координат всех точек всех сечений, когда сама деталь сориентирована относительно экрана так, что, выполняя ее ортогональную проекцию, на экране получим изометрическое изображение объекта. Из двухмерного пространства аксонометрическое изображение на плоскость $Z = n$ (параллельную X_0OY_0) может быть получено ортогональным проектированием с помощью матрицы T_{zn} :

$$T_{zn} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Если плоскость проекции есть плоскость экрана, то нужно принять $n = 0$.

Теперь остается только выполнить эту процедуру:

$$C_\Sigma^{(3)*} \cdot T_{zn} = C^*. \quad (5)$$

Элементы матрицы И являются координатами всех точек на плоскости экрана и дают картину изометрической проекции нашей модели на экране. Это точечное изображение. Соединив соответствующие точки отрезками прямых, получим изображение каркасной (проволочной) модели объекта на плоскости экрана дисплея.

Таким образом, преобразуя исходный образ, мы получаем максимально приближенную модель естественного восприятия объекта зрительным анализатором человека, при этом исключая искажения, присущие работе мозга [4]. Данная программа позволяет строить различные варианты перцептивной перспективы (с различным соотношением параметров), а также изображение в классической (ренессансной) перспективе. Результаты работы программы представлены на рис. 4 (исходная модель) и на рис. 5 (модель, преобразованная в нелинейную (перцептивную) перспективу).

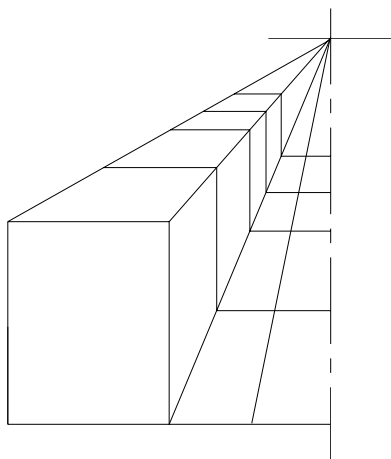


Рис. 4. Модель исходного объекта (аксонометрическая проекция)

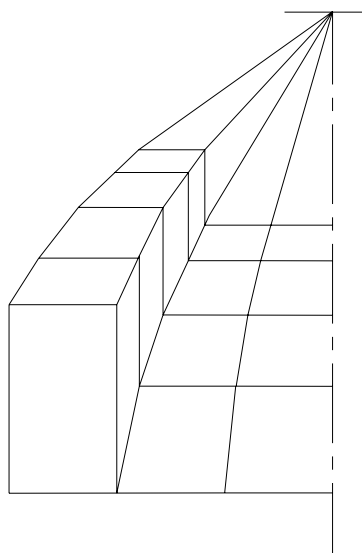


Рис. 5. Преобразованная модель (естественное видение)

На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- решена проблема построения изображения пространства (его объектов), соответствующая естественному восприятию человека;
- получен алгоритм преобразования координат;
- продемонстрированы построения различных вариантов перспективы.

Следует отметить, что данное программное обеспечение может быть установлено непосредственно в тахеометр (сейчас это невозможно в силу того, что программное

обеспечение тахеометра является лицензионным продуктом, и для его изменения необходимо иметь соответствующие права).

Литература

1. Раушенбах Б.В. Системы перспективы в изобразительном искусстве. Общая теория перспективы. М.: Наука, 1986, 256 с.
2. Раушенбах Б. В. Пространственные построения в живописи. Очерк основных методов. М.: Наука, 1980. 288 с.
3. Шпур Г., Краузе Ф.-Л. Автоматизированное проектирование в машиностроении. М.: Машиностроение, 1988, 648 с.
4. Воронцов Е.А. Прямые и обратные перспективы динамических систем на цилиндре и их зрительное восприятие на плоскости. / Материалы конференции Робототехника, мехатроника и интеллектуальные системы, Таганрог: Издательство ТРТУ, 2005. 250 с.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ НЕЛИНЕЙНЫХ МАЯТНИКОВ И ИХ УЧЕТ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

В.М. Мусалимов, М.С. Петрищев, Чан Нгок Чау

В работе проведено численное исследование динамики электромеханического маятника при совместном действии двух внешних возмущений – вибромеханического и магнитного. Построены поверхности в пространстве параметров, которые позволили выявить множество особых точек, связанных с отображениями на плоскость физических параметров.

Введение

Мехатроника является одной из наиболее динамично развивающихся областей техники. В последнее время наблюдается тенденция миниатюризации разрабатываемых мехатронных устройств на базе микросистемных технологий (микро- и наноэлектромеханических), где основным конструкционным материалом является кремний и его соединения с другими материалами [1]. Это дает возможность создавать миниатюрные резонансные чувствительные элементы и приборы – гироскопы, акселерометры, турбинные генераторы и ряд других.

Большинство резонансных систем обладает одной механической степенью свободы. Уравнениями движения одномерного механического осциллятора – маятника – описывается достаточно широкий класс разнообразных объектов – от макро- до микроуровня.

Нелинейные системы обладают рядом особенностей. При определенных условиях возможно хаотическое поведение системы, а также возможны состояния нетривиального равновесия. Одним из таковых для маятника является верхнее положение равновесия – в литературе такой маятник называется перевернутым или маятником Капицы [2].

В работах [3–5] проведено исследование динамики маятниковой системы при раздельном действии вибромеханического и магнитного возмущений в вертикальном и горизонтальном направлениях. При действии возмущения в вертикальном направлении из нетривиальных положений равновесия возможно только перевернутое. При действии возмущения в горизонтальном направлении возможен ряд положений равновесия, предельными из которых являются горизонтальные. Кроме того, при определенных сочетаниях параметров системы в ней наблюдаются переключения между этими положениями квазиравновесия.

Следует отметить, что при стабилизации «физически» неустойчивых положений равновесия внешним воздействием система выводится на границу устойчивости. При этом в ней возникает ряд новых свойств – например, сверхчувствительность, поскольку малейшее изменение параметров внешнего воздействия ведет к изменению положения равновесия.

Целью работы является анализ динамики нелинейных моделей маятников при совместном действии магнитного и вибромеханического возмущений в вертикальном направлении.

Модельная задача для электромеханического маятника

Рассмотрим динамику электромеханического маятника на вибрирующем основании в переменном магнитном поле (рис. 1). Для обобщения возможных ситуаций расположим основание платформы под углом α к горизонтали Oy . Роль твердого тела играет замкнутый контур тока, жестко соединенный с подвесом невесомым стержнем длиной l .

Предположим, что маятник находится в переменном однородном магнитном поле, частота которого ν много больше, чем частота малых свободных колебаний маятника. Обозначим φ угол отклонения маятника от вертикальной оси, принимая, что $\varphi=0$ соответствует его нижнему положению.

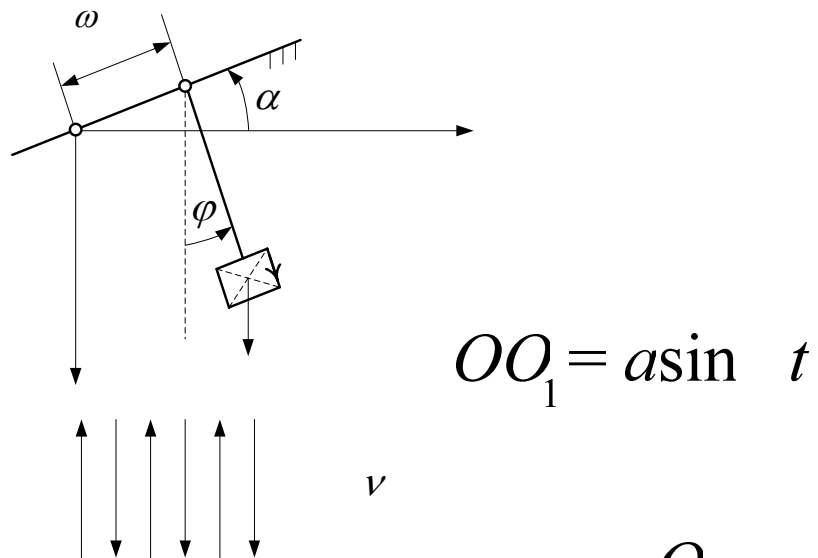


Рис. 1. Маятник в переменном магнитном поле на вибрирующем основании

Взаимосвязанные электромагнитные и механические процессы в электромеханической системе описываются уравнениями Лагранжа-Максвелла и в общем случае имеют вид [6]

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial T}{\partial q_k} - \frac{\partial W}{\partial q_k} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_k} + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial q_k} = Q_k & (k=1, \dots, n), \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial W}{\partial i_r} + \frac{\partial \Phi}{\partial i_r} + \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial g_r} = E_r & (r=1, \dots, m). \end{cases} \quad (1)$$

где $q_1, \dots, q_n$ – обобщенные координаты, n – число степеней свободы; T – кинетическая, Π – потенциальная энергия механической системы; Q_k – непотенциальные обобщенные силы; E_r – алгебраическая сумма ЭДС в r -м контуре; Φ – электрическая диссипативная функция, которая определяет тепловое рассеяние на омических сопротивлениях; i_r – ток в r -м контуре; $\mathcal{E}$ – энергия электрического поля; W – энергия магнитного поля; g_r – заряд r -го конденсатора.

В рассматриваемом случае система имеет только сопротивление проводника рамки R при протекании тока i , которое постоянно, и поэтому для функции Φ можем записать:

$$\Phi = \frac{1}{2} Ri^2.$$

Известно, что переменные магнитные силы могут дестабилизировать устойчивое положение равновесия, приводя к развитию автоколебаний. Этот эффект математически связан с изменением структуры уравнений Лагранжа-Максвелла, в которых при задании переменного внешнего поля кроме гироскопических сил появляются и циркуляционные обобщенные силы.

При решении задачи о медленных движениях проводящего твердого тела в переменном магнитном поле можем записать выражения для энергии магнитного поля W , энергии электрического поля $\mathcal{E}$, потенциальной Π и кинетической T энергий в следующем виде:

$$W = \frac{1}{2} Li^2 + B_0 S \sin \nu t \sin \varphi i; \quad \mathcal{E} = 0; \quad \Pi = mgl(1 - \cos \varphi); \quad T = \frac{1}{2} mV^2,$$

где L – коэффициент самоиндукции контура тока i ; B_0 – амплитуда внешнего поля; S – площадь рамки; m – масса контура; g – ускорения свободного падения; V – скорость перемещения центра масс рамки.

Квадрат скорости перемещения центра масс рамки V определяется следующим выражением:

$$V^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2,$$

где $\dot{x}$, $\dot{y}$ – скорости перемещения центра масс рамки в вертикальном и горизонтальном направлениях, соответственно.

Законы изменения положения точки подвеса при вибрации основания гармонической силой $a \sin \omega t$ в пределах отрезка OO_1 имеют вид

$$\begin{cases} x = l \cos \varphi - a \sin \omega t \sin \alpha, \\ y = l \sin \varphi + a \sin \omega t \cos \alpha. \end{cases}$$

Тогда выражение для кинетической энергии T будет иметь вид

$$T = \frac{1}{2} mV^2 = \frac{1}{2} m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) = \frac{1}{2} m(l^2 \dot{\varphi}^2 + 2l\dot{\varphi} a \omega \cos \omega t \cos(\varphi - \alpha) + a^2 \omega^2 \cos^2 \omega t).$$

Произведя дифференцирование необходимых величин и подставляя их в (1), получаем уравнения Лагранжа-Максвелла исследуемой системы в следующем виде:

$$\begin{cases} ml^2 \ddot{\varphi} - mla \omega^2 \sin \omega t \cos(\varphi - \alpha) - B_0 S \sin \nu t \cos \varphi i + mgl \sin \varphi = 0, \\ Li^{\bullet} + B_0 S \sin \nu t \cos \varphi \dot{\varphi} + B_0 S v \cos \nu t \sin \varphi + Ri = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Считая, что частота магнитного поля много больше собственной частоты колебаний маятника $k = \sqrt{mgl/ml^2} \ll \nu$, введем малый параметр $\varepsilon^2 = k^2/\nu^2$. Введем также безразмерные амплитуды виброперегрузок в вертикальном направлении $n_{mx} = a \cos \alpha \cdot \omega^2 / g$ и горизонтальном $n_{my} = a \sin \alpha \cdot \omega^2 / g$.

Переходя в уравнениях (2) к безразмерному (быстрому) времени $\tau = \nu t$ и безразмерному току $i_u = i/i_*$, где базисное значение тока $i_* = B_0 S/L$, получим следующие уравнения в безразмерных переменных:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} - \varepsilon^2 \gamma \sin \tau \cos \varphi i_u + \varepsilon^2 \sin \varphi - \varepsilon^2 \sin(h\tau)(n_{my} \sin \varphi + n_{mx} \cos \varphi) = 0, \\ i_u^{\bullet} + \sin \tau \cos \varphi \dot{\varphi} + \cos \tau \sin \varphi + r i_u = 0. \end{cases}$$

В этих уравнениях введены безразмерные параметры $\gamma = \frac{(B_0 S)^2}{Lmg}$, $r = \frac{R}{L\nu}$ и $h = \frac{\omega}{\nu}$. При учете в системе внешнего вязкого трения с коэффициентом n можем записать:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} - \varepsilon^2 \gamma \sin \tau \cos \varphi i_u + \varepsilon^2 \sin \varphi - \varepsilon^2 \sin(h\tau)(n_{my} \sin \varphi + n_{mx} \cos \varphi) + \varepsilon^2 n \dot{\varphi} = 0, \\ i_u^{\bullet} + \sin \tau \cos \varphi \dot{\varphi} + \cos \tau \sin \varphi + r i_u = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Система уравнений (3) позволяет исследовать одновременно два случая действия вибрации в вертикальном магнитном поле. Проведем исследование для случая действия вибрации в вертикальном направлении, при этом принимая равной нулю амплитуду виброперегрузок в горизонтальном направлении n_{my} .

Для выражения (3) было проведено численное исследование в пакете Simulink системы Matlab. Следует заметить, что динамика системы исследовалась без примене-

ния асимптотических методов, что позволило исключить методическую погрешность решения. Анализ динамики системы производился по графикам поведения системы во времени и фазовым портретам (рис. 2).

В процессе исследования получается большое число подобных графиков. Однако они не позволяют произвести оценку влияния параметров в целом. В связи с этим результаты моделирования по исследованию одного из параметров были сведены в матрицу, по которой построены поверхности состояний (рис. 3). По сути, при каждом моделировании получается срез подобной поверхности для выбранного параметра.

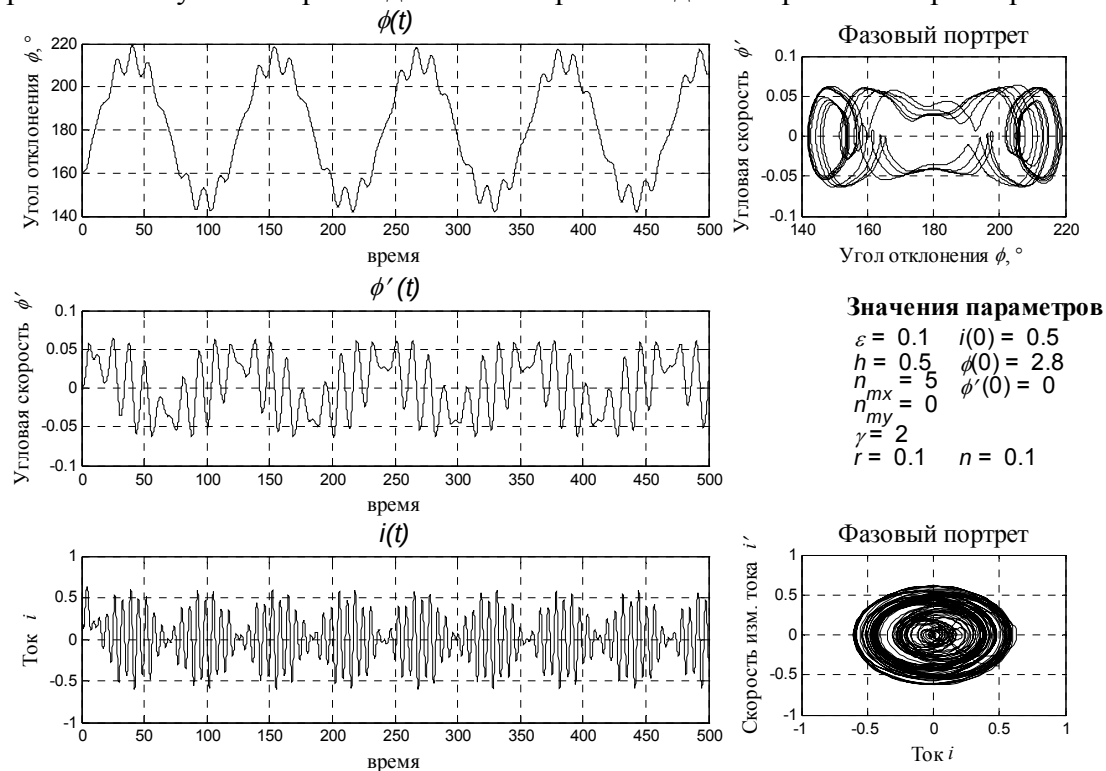


Рис. 2. Режим модулированных автоколебаний маятниковой системы

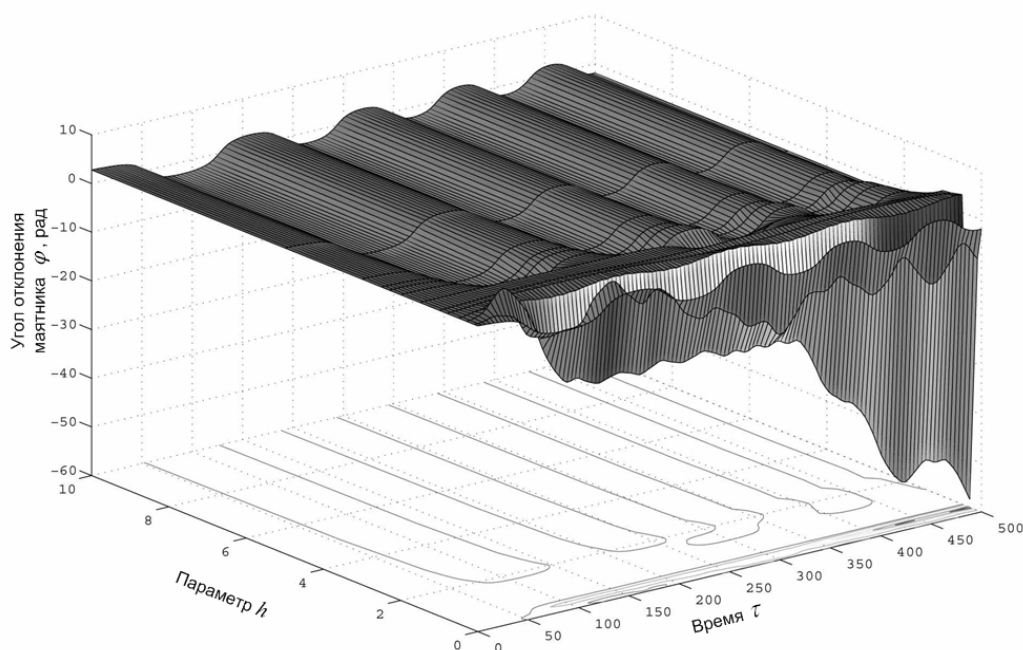


Рис. 3. Влияние частоты вибрации на положения равновесия при $\varepsilon = 0.1$, $n_{mx} = 5$, $\gamma = 2$, $r = 0.1$, $n = 0.1$, $\phi(0) = 2.8$, $\phi'(0) = 0$, $i(0) = 0.5$

Построение поверхностей состояний упрощает визуальный анализ влияния того или иного параметра на поведение исследуемой системы. Однако наиболее рациональным представляется использовать такие поверхности для качественной оценки, а для количественной все-таки использовать «срезы» этой поверхности.

Предпочтительным представляется построение поверхностей, у которых по осям абсцисс и ординат откладываются значения параметров, а по вертикальной оси (уровня) – угол отклонения маятника φ . Пример плоского среза (отображения) такой поверхности приведен на рис. 4. Представленная кривая соответствует сочетаниям параметров n_{mx} и γ , при которых осуществляется выход маятниковой системы в верхнее положение равновесия. С некоторым смещением от этой кривой условно проведены штриховые линии, которые соответствуют погрешностям численных методов. Также представлены колебательные процессы системы для фиксированного значения $n_{mx} = 6$ при переменном γ .

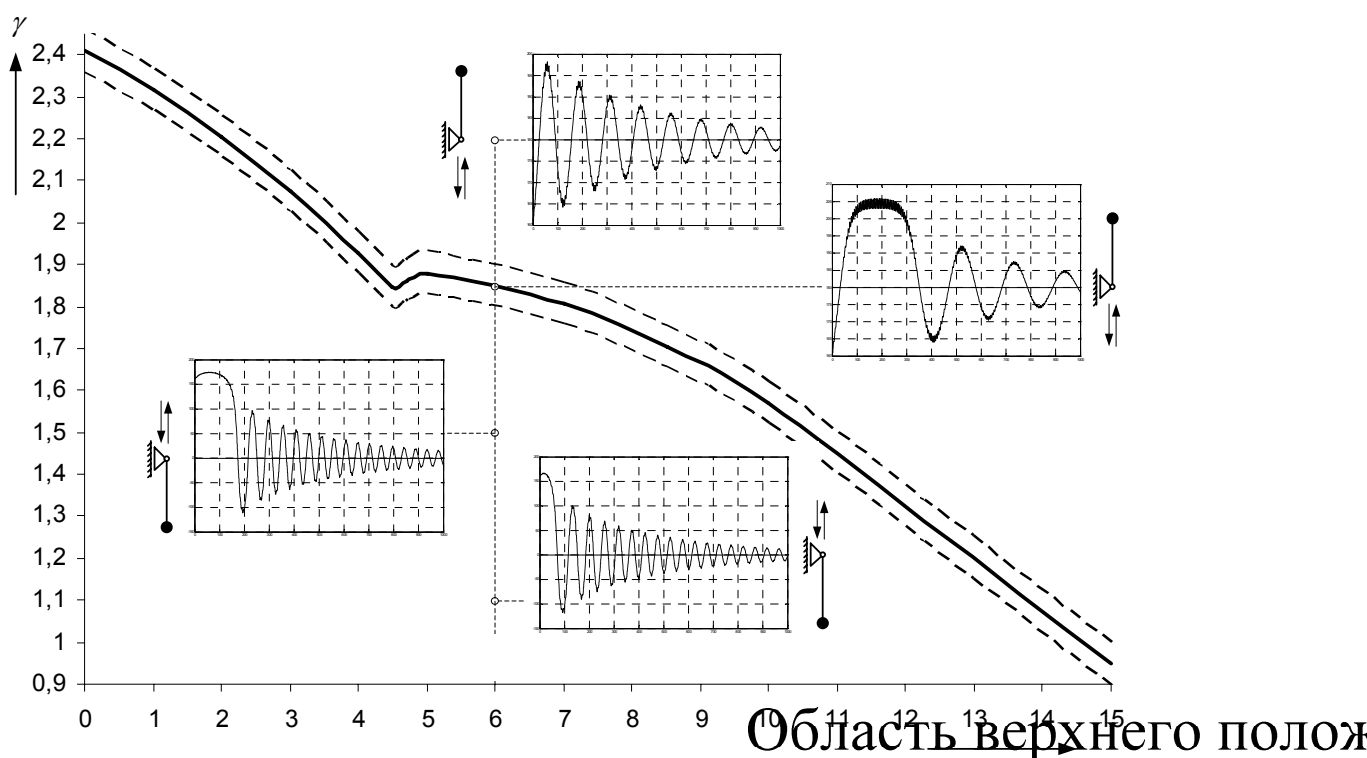


Рис. 4. Влияние амплитуды вибрации и величины поля на выход маятника в перевернутое положение равновесия

Данная кривая позволяет синтезировать чувствительные элементы приборов для измерения как параметров магнитного поля при вспомогательном вибромеханическом воздействии, так и чувствительные элементы приборов для измерения параметров вибрации при вспомогательном магнитном воздействии. Это элементы высокочувствительные, и поэтому малейшее изменение параметров измеряемой величины ведет к изменению параметров колебательного процесса.

Заключение

Проведен анализ динамики электромеханического маятника при совместном действии магнитного и вибромеханического возмущений в вертикальном направлении. Исследование выполнено для нелинейной модели без применения асимптотических методов, что позволило исключить методическую погрешность решения. Построены поверхности в пространстве параметров, которые позволили выявить множество осо-

бых точек, связанных с отображениями на плоскость физических параметров. Результаты исследования позволяют осуществить синтез чувствительных элементов приборов для измерения параметров вибрации и переменного магнитного поля, отличающихся высокой чувствительностью.

Литература

1. Васильев А., Лучинин В., Мальцев П. Микросистемная техника. Материалы, технологии, элементная база. // Электронные компоненты. 2000. № 4. С. 3–11.
2. Капица П.Л. Маятник с вибрирующим подвесом. // Успехи физических наук. 1954. № 44. Т. 1. С. 7–20.
3. Петрищев М.С. Динамика чувствительных элементов магнитометрических систем. / Материалы I Всероссийской научной конференции студентов и аспирантов (с международным участием) «Робототехника, мехатроника и интеллектуальные системы». (12 – 14 октября 2005 г.). Таганрог: ТРТУ, 2005. С. 137–143.
4. Морщинина Н.В., Чан Нгок Чау. Маятник на основании с виброускорениями. / Тезисы докладов Седьмой сессии Международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов» VPB-05. (24 – 28 октября 2005 г.). – СПб: ИПМаш РАН, 2005. С. 110.
5. Петрищев М.С. Динамика маятниковых систем в магнитных полях. / Материалы семинаров политехнического симпозиума «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона». Декабрь 2005 г. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. С. 67–68.
6. Скубов Д.Ю., Ходжаев К.Ш. Нелинейная электромеханика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 360 с.

ВОЛНОМЕРНЫЕ БУИ В РЯДУ СОВРЕМЕННОЙ ВОЛНОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

Д.Г. Грязин, А.В. Бердюгин

В докладе приводится классификация средств измерения волнения, анализируются достоинства и недостатки различных приборов. Рассмотрены характеристики волномерных буйев, представленных на мировом рынке. Указываются тенденции развития волномерных буйев.

Введение

Многие отрасли хозяйственной деятельности человека тесно связаны с морем: гидростроительство и океанология, морская геология и судостроение, мореплавание и военно-морской флот. Знание параметров морского волнения необходимо для безаварийной работы морской техники, прогнозирования погодных условий и решения других задач.

В настоящее время известно множество способов измерения морского волнения. Как отмечал Г.В. Матушевский еще в восьмидесятых годах, дефицита в методах нет. В большей степени ощущается дефицит в средствах измерения волнения.

Существенно отметить, что многие волнографы, особенно в нашей стране, разрабатывались в единичных экземплярах в неспециализированных организациях, что вызвано затянувшимся на многие годы отсутствием серийного выпуска волноизмерительной аппаратуры в России.

Классификация волноизмерительной аппаратуры

Существующие приборы, устройства и измерительные комплексы, которые могут быть отнесены к волноизмерительной аппаратуре, можно классифицировать по следующим признакам рис. 1.

1. По степени связи с пространством – на фиксирующие состояние площади водной поверхности в определенный момент времени и измеряющие характеристики волнения в заданной точке в течение достаточно продолжительного времени.

К фиксирующим состояние поверхности моря за короткое время следует отнести оптические и радиолокационные методы, при которых измерение характеристик волнения производится за промежуток времени не более 2 с.

К определяющим характеристики волнения в точке за продолжительное время относятся методы измерения с использованием электродных, буйковых волнографов или лазерных приборов. Использование этих методов предполагает выполнение измерений за 15–30 минут.

2. По степени взаимодействия датчиков с водой – на контактные и неконтактные.

К контактными методам относятся методы измерения ординат волнения с помощью буйков, свободно плавающих на поверхности воды, и электродных приборов, закрепленных на сваях, вехах или корпусе судна.

К неконтактным методам следует отнести лазерные, радиолокационные, оптические методы, позволяющие производить измерения, при которых чувствительный преобразователь располагается вне поверхности воды.

3. По принципу размещения – на поплавковые приборы, приборы, размещенные на подвижном объекте, и приборы, установленные на сваях.

К поплавковым относятся различного рода буйи и плавающие вехи, к приборам для подвижных объектов – стереофотоаппараты, приставки к судовым радиолокаторам, спутниковая аппаратура. К свайным приборам можно отнести электродные волнографы.

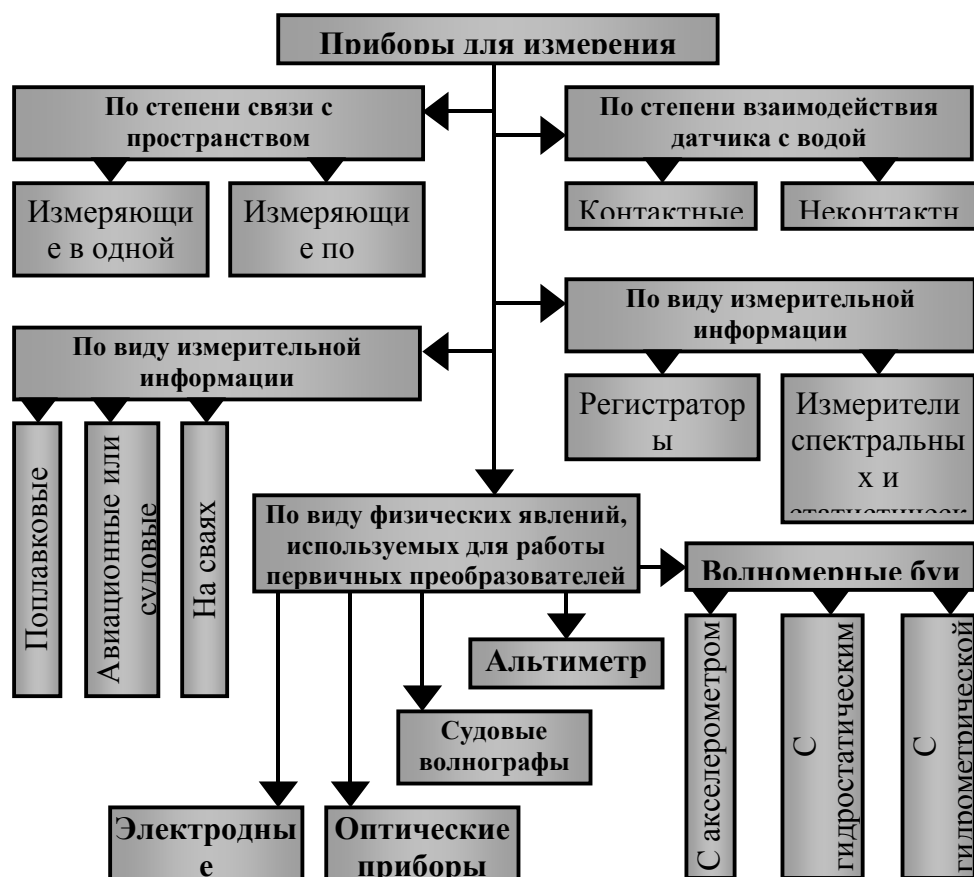


Рис. 1. Классификация приборов для измерения волнения по различным критериям

4. По виду измерительной информации, получаемой от приборов – на средства измерения ординат волновых возвышений и на приборы для измерения статистических и спектральных характеристик волн.

К приборам первой группы следует отнести электродные волнографы, буи с гидростатическим датчиком давления буи, имеющие в качестве датчика акселерометр, а также лазерные волнографы.

К средствам измерения спектральных и статистических относятся разного рода буи, вехи, приборы, измеряющие гидродинамическое волновое давление, а также радиолокационные волнографы.

5. По виду физических явлений, используемых для работы первичных преобразователей – на электродные волнографы, буйковые приборы, альтиметры, судовые и оптические волнографы.

В состав электродных волнографов входят приборы, преобразующие уровень воды в электрический сигнал с использованием резистивного, емкостного, индуктивного, а также электроконтактного датчиков.

К классу альтиметров относится волноизмерительная аппаратура, позволяющая определить неконтактным способом расстояние от некоторого фиксированного уровня до взволнованной поверхности моря. Эти приборы располагаются как на неподвижном основании, так и на подвижном носителе (самолете, корабле, подводной лодке). В последнем случае в приборе учитываются вертикальные перемещения носителя, курсовой угол к направлению бега волн и угловое распределение энергии в спектре. К этим приборам относятся лазерные приборы, инфракрасные альтиметры и сонары (ультразвуковые эхолоты), радары.

Измерение ординат волновых возвышений с борта судна часто выполняется средствами альтиметрии или электродными приборами, к которым добавляется блок, по-

звolyающий вводить поправку на качку судна. Тем не менее, в практике волновых измерений широкое распространение получил волнограф Таккера, в котором для измерения ординат волнения применяются датчики давления, установленные в форштевень судна, а для выработки сигнала коррекции от качки применен акселерометр с двойным интегрированием.

К оптическим средствам измерения волнения следует отнести фотограмметрию (стереофотосъемку) и телевизионные системы.

Волномерные буи (ВБ) представляют собой свободно плавающие или заякоренные буи, оснащенные измерительной аппаратурой. В некоторых случаях эти буи при выполнении измерений имеют связь с судном. По принципу действия ВБ подразделяются следующим образом.

1. Буи с акселерометром, имеющие в качестве чувствительного преобразователя датчик ускорения, стабилизированный в вертикальной плоскости. Сигнал ускорения после двойного интегрирования преобразуется в сигнал, пропорциональный возвышению водной поверхности. Класс буюв, работающих на этом принципе, очень широк, к нему относятся свободно плавающие, теряемые, привязные (к судну или основному бую), заякоренные буи, информация с которых передается по проводной или радиосвязи.

2. Буи с гидростатическим датчиком давления. Эти приборы состоят из бую и гондолы с датчиком давления, подвешенной к бую на кабель-тросе. В том случае, если длина кабель-троса больше половины длины измеряемой волны, прибор регистрирует ординаты волнового профиля. В связи со своей простотой этот прибор получил распространение как в отечественном приборостроении, так и за рубежом.

3. Буи с гидрометрической вертушкой. Приборы, работающие на этом принципе, начали появляться с 60-х годов [16]. Датчиком этого прибора служит вертушка, установленная в цилиндрическую обечайку. При подъеме датчика вслед за буюм на лопасти вертушки набегаеь поток воды, в результате чего она вращается. Указанное вращение преобразуется в измерительный сигнал, который, для получения ординат профиля волны, должен быть проинтегрирован.

Не останавливаясь на достоинствах и недостатках каждого из классов приборов, отметим лишь то, что наибольшее распространение в мировой практике получили волномерные буи. Это связано с рядом преимуществ этих приборов по сравнению с другими. К числу этих преимуществ необходимо отнести:

- значительную автономность этих приборов и их высокую надежность;
- возможность выполнения измерений по заданной программе без участия оператора;
- сравнительно низкую цену;
- высокую достоверность получаемой информации (по точности эти приборы уступают только электродным волнографам);
- возможность их использования на акваториях с различными глубинами.

Указанные преимущества позволили в настоящее время создать сети буюковых станций на акваториях многих морей и океанов.

Современное состояние рынка волномерных буюв

Наибольшее распространение в практике измерения морского волнения приобрели волномерные буи с акселерометрическим датчиком и буи с гидростатическим датчиком давления.

В настоящее время одним из лидеров в производстве акселерометрических буюв является голландская компания Datawell BV, а наиболее распространенным волномерным буюм – Directional Waverider MkIII (рис.2) [1]. Буй имеет шарообразную форму, его диаметр составляет 0,9 метра. Прибор предназначен для измерения параметров двух-

мерного спектра волнения, а также направления бега волн. Кроме указанных характеристик, буй измеряет температуру воды. Передача измеренных данных может осуществляться с помощью УКВ передатчика на расстояние до 50 км или спутниковой системы Argos, а также накапливаться во внутренней памяти прибора. Местоположение буя может быть определено с помощью системы GPS. Заявленные диапазоны измеряемых периодов волн составляют 1,6–30 с, высоты волны до 40 м. Питание буя автономное, автономность в режиме измерений – до 12–30 месяцев, в зависимости от конфигурации установленного оборудования. Акселерометр для измерения вертикальных ускорений размещен на стабилизированной платформе с собственным периодом колебаний 40 с, представляющей собой демпфированный маятник. Сигнал вертикального ускорения преобразуется в сигнал перемещения с помощью двойного интегрирования. Сигналы углов качки вырабатываются по отклонению корпуса датчика относительно стабилизированной платформы.



Рис. 2. Волномерный буй Directional Waverider MkIII



Рис. 3. Телеметрический буй DB4280

Широко разрекламированным буюм, использующим акселерометр, является прибор DB4280 (рис. 3) норвежской компании Aanderaa Instruments [2]. Этот прибор предназначен для использования в прибрежной зоне, портах, заливах и вблизи океанских платформ. Буй позволяет производить измерения высоты и периода волнения, скорости и направления течения, температуры воды, а также различных метеорологических параметров и передавать измерительную информацию в реальном режиме времени с помощью УКВ радиоканала, GSM-связи или спутниковой системы Orbcomm. Вертикальное ускорение измеряется с частотой 4 Гц и дважды интегрируется для получения пе-

ремещения. Выходным параметром датчика является средняя высота волны за 10 минут. Заявленный диапазон измеряемых высот волн – 0–10 м с точностью $\pm 10\%$ (для периодов от 3 до 10 с). Диапазон измерения периодов волн – 1–30 с. Продолжительность режима измерения – 10–60 мин.

Серийно выпускаемым волномерным бумом, использующим акселерометрический датчик перемещения, является прибор Wavecrest (рис.4) великобританской компании NBA (Controls) Ltd [3]. Буй выполнен в виде сферы диаметром 0,63 м, в которой размещены датчик, электронный блок и аккумуляторные батареи. На верхней крышке корпуса буя расположены лампа-вспышка, антенна радиопередатчика и выключатель. Датчик представляет собой пассивный акселерометр с низким энергопотреблением, размещенный на платформе маятника с низкой собственной частотой колебаний, и позволяет производить измерения волнения высотой 0,3–30 м в диапазоне частот 0,5–0,05 Гц с погрешностью не более 3% во всем диапазоне измерения. Буй оснащен радиопередатчиком, работающим в диапазоне частот 26,905–27,985 МГц для передачи данных на расстояние до 50 км. Срок автономной работы буя составляет 4 месяца.

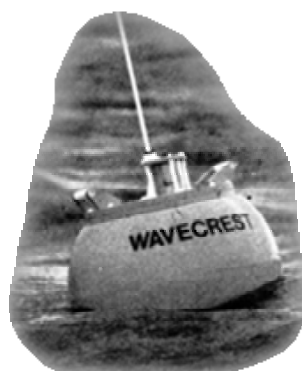


Рис. 4. Волномерный буй Wavecrest

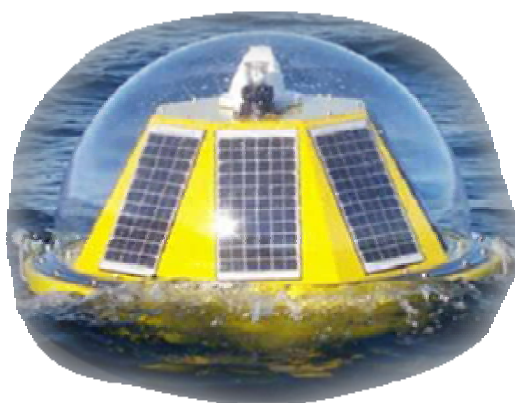


Рис. 5. Волномерный буй Seawatch mini buoy

Волномерный буй Seawatch mini buoy (рис. 5), выпускаемый норвежской компанией Oceanor [4], кроме измерения высоты волнения и направления распространения волн, измеряет температуру и солености воды, а также скорость и направления течения. Производитель дополнительно оснащает прибор рядом датчиков для контроля различных параметров. Корпус буя выполнен в виде сферы диаметром 0,9 м, состоящей из двух половин: верхней и нижней. В нижней половине размещены электронные блоки, датчики и аккумуляторные батареи. Верхняя половина выполнена из оптически про-

зрачного материала и защищает от воздействия влаги расположенные под ней солнечные панели, антенны и сигнальный огонь.

Передача измеренной информации может осуществляться через спутниковые системы Inmarsat или Argos, через GSM-модем или УКВ радиопередатчик по выбору заказчика. Измерение параметров волнения производится с помощью акселерометрического датчика, который, по заверениям производителя, обеспечивает измерение средней высоты волны в диапазоне ± 15 м. с погрешностью не более 10 см., среднего периода волн в диапазоне 2–30 с. с погрешностью не более 2 % от измеренной величины. Обработка сигналов датчиков и расчет характеристик волнения производится расположенным на борту буя микропроцессором.

К числу буюв с гидростатическим датчиком давления, разработанных в последнее время, в первую очередь следует отнести волномерные буюы «Дельфин» (рис. 6) и «Нептун» [5], разработанные в России в ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова.

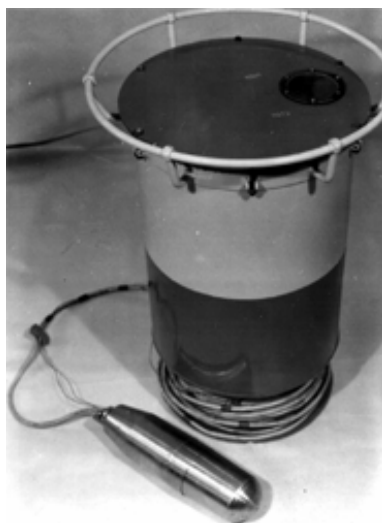


Рис. 6. Волномерный буй «Дельфин»

Оба прибора имеют цилиндрический корпус, к которому на кабель-тросе подвешена гондола с датчиком давления. Длина кабель-троса равна 40 м. Буй «Дельфин» позволяет производить измерения ординат морского волнения в диапазоне длин волн 10–76 м с высотой до 10 м, «Нептун» - в диапазоне 0,1–4 м. с длиной 6–60 м., кроме того, этот прибор рассчитывает такие характеристики, как высота волны 3%-ной обеспеченности, средняя высота волны, средний период волны, число зарегистрированных волн, бальность волнения. Прибор отображает измеренные параметры на собственном дисплее, а также может транслировать измерительную информацию в персональный компьютер. Питание обоих буюв автономное. Время измерения 15 мин. Масса приборов составляет около 27 кг. Указанные приборы являются узкоспециализированными и предназначены для проведения мореходных испытаний судов.

Перспективы развития волнографов

Очевидно, что в развитии волноизмерительной техники наметились явные тенденции, в первую очередь направленные на комплексирование различной аппаратуры в одном приборе. Такие буюы, в первую очередь, призваны решать задачи гидрометеорологии и в основном ограничиваются измерением средней высоты и периода волнения, направления распространения волнового фронта. Примерами таких приборов являются волномерный буй Seawatch mini buoy и телеметрический буй DB4280. Требования к точности измерений такими буюями, как правило, невысоки.

Наиболее точными волномерными буями остаются буи с гидростатическим датчиком давления. Это обусловлено рядом особенностей их конструкции [5]. Отметим лишь одну из них, к сожалению, остающуюся без должного внимания разработчиков. Основополагающим принципом теории поверхностных гравитационных волн, на основе которой рассчитываются все характеристики волнения, является предпосылка о том, что измерения производятся либо за короткое время на значительной площади моря, либо за продолжительное время в одной точке поверхности. Свободно дрейфующие акселерометрические буи могут иметь методическую погрешность, обусловленную неверной интерпретацией результатов их измерений. Буи с гидростатическим датчиком давления, напротив, имеют в своей конструкции кабель-трос с гондолой, который препятствует их дрейфу. Заякоривание буюв также приведет к возникновению еще одной методической погрешности, обусловленной дополнительной связью.

Вторая сохраняющаяся тенденция заключается в создании узкоспециализированных волномерных буюв. Примерами таких приборов являются волномерный буй Directional Waverider MkIII компании Datawell BV, буй Wavecrest великобританской компании NBA (Controls) Ltd., буи «Нептун» и «Дельфин», разработанные ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова. Эти буи обладают высокими метрологическими характеристиками и расширенным рядом измеряемых параметров волнения. Такие приборы, в первую очередь, предназначены для решения задач океанологии, гидростроительства и судостроения.

Третьей тенденцией в развитии волноизмерительных буюв является широкое внедрение новейших средств трансляции измерительной информации потребителю. Для этого, кроме традиционных радиопередатчиков, используются различные спутниковые системы, а также GSM-модемы береговых сотовых телефонных станций. Для определения текущего местоположения буюв в большинстве случаев применяется спутниковая система глобального позиционирования (GPS).

Не следует исключать появления в ближайшем будущем волномерных буюв, использующих новые принципы и методы измерений. Так, например, в 2004 году компания Datawell BV объявила о начале выпуска новой модели волномерного бую Directional Waverider Buoy G4, изготовленного в корпусе рис. 2. В данном приборе измерение параметров морского волнения основывается на использовании спутниковой радионавигационной системы. Прибор использует принцип Доплера и вычисляет скорость перемещений бую, исходя из изменений частоты сигналов GPS спутников. Например, если буй перемещается по направлению к спутнику, то частота сигнала увеличивается, и наоборот. Скорости перемещения бую интегрируются по времени для определения ординат волнового профиля. Заявленная точность измерения координат свободно движущегося бую ± 2 см по трем осям при периодах волн от 1 до 100 с. (а это волны длиной 15600 м.) вызывает определенное недоверие и к прибору в целом. К недостаткам этой измерительной системы можно также отнести возможность потери информации из-за разрыва связи со спутником при прохождении крутых волн и возможность искажений радиосигнала в приповерхностном слое воды и атмосфере.

Следует обратить внимание, что на фоне активного развития волноизмерительной техники в странах ЕЭС в нашей стране эти приборы не производятся.

В заключение отметим, что в связи с тем, что волнографы, и особенно волномерные буи, являются приборами как оборонного, так и гражданского применения, их поставки в Россию зависят от внешнеполитической ситуации. В то же время продажа этих приборов на мировом рынке становится все более выгодным бизнесом. Указанные причины позволяют надеяться на то, что даже в условиях сокращения средств, выделяемых Министерством обороны на разработку новых гидрометеорологических приборов, их производством могут заинтересоваться промышленные холдинги.

Литература

1. <http://www.datawell.nl>
2. <http://www.aanderaa.com>
3. Wavecrest. Promotional material of NBA (Controls) Ltd. 1982
4. <http://www.oceanor.no>
5. Грязин Д.Г. Расчет и проектирование буев для измерения морского волнения. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2000. 133 с.

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОННОГО УЧЕБНИКА «ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ»

Д.Г. Грязин

В докладе анализируется влияние тенденций, происходящих в высшей школе, на качество подготовки специалистов. Предлагается опыт разработки и применения электронного учебника по курсу «Основы проектирования приборов и систем». Указано, что использование этого учебно-методического пособия помогает студентам подготовиться к успешной сдаче экзамена.

Современное развитие компьютерных технологий позволило применять при преподавании дисциплин в вузах такой информационно-обучающий элемент, как электронный учебник.

Электронный учебник представляет собой пакет программных средств, способствующий усвоению учебного материала не только путем последовательного изучения его разделов, но и позволяющий углубленно изучить отдельные наиболее значимые для студента направления, по которым он предполагает специализироваться.

Об использовании в электронных учебниках анимаций, виртуальных лабораторных работ и иных современных обучающих средств говорилось уже не мало. Остановимся подробнее на вопросах качества обучения студентов их основной специальности в условиях сокращения объема и числа дисциплин, при условии развития средств дистанционного обучения.

Как мы хорошо знаем, основным направлением реформирования высшей школы является сокращение объема учебных дисциплин и их числа, при общем увеличении времени, выделяемом на самостоятельную работу студентов. Эта тенденция начала прослеживаться с конца 90-х годов и уже выразилась в том, что в образовательных стандартах по направлению обучения «Приборостроение» ряд разделов, относящихся традиционно к разным дисциплинам, оказались в одной. При этом объем лекционных часов не позволяет их изучать также детально, как ранее. Например, в учебном плане по направлению подготовки «Приборостроение» целиком отсутствуют дисциплины «Измерения электрических и неэлектрических величин», «Планирование эксперимента» и др. Указанная тенденция, очевидно, направлена на приближения методики преподавания в университетах к западным стандартам, но в наших условиях она приводит к ухудшению усвоения материала. Одним из выходов в создавшейся ситуации является использование электронных учебников при изучении дисциплин.

Курс «Основы проектирования приборов и систем» ОПД Ф08, относящейся к числу общепрофессиональных федеральных дисциплин, читается студентам 3-го курса факультета точной механики и технологий, обучающихся по направлению подготовки 653700 «Приборостроение». Он появился в учебном плане также после введения последнего образовательного стандарта и включает всего 165 часов, из них 51 час лекций и курсовое проектирование 17 часов [1].

Целью курса является знакомство студентов с видами измеряемых процессов, способами преобразования измерительных сигналов, методами расчета статических и динамических характеристик приборов, способами расчета надежности, методами решения задач проектирования и конструирования узлов и деталей приборов и ознакомление с рядом других вопросов. В связи с малым количеством аудиторных часов в лекционном курсе приходится охватывать наиболее значимые вопросы из всех этих разделов. Насыщенность курса сказывается и на сложности его усвоения. При традиционной организации обучения 20% студентов не могут сдать экзамен с первого раза, при условии, что на экзамене разрешается использовать конспект.



Рис. 1. Структура курса «Основы проектирования приборов и систем»

Для лучшего усвоения материала в учебнике применены фотографии и анимации. Выполняемый курсовой проект состоит из двух частей, расчета статических и динамических характеристик датчиков и расчета надежности электронной схемы. Для выполнения курсового проектирования учебник оснащен специальными методическими указаниями. Кроме того, программный продукт позволяет скачивать варианты заданий по курсовому проекту из специального раздела. Отметим и то, что для расчета надежности электронных схем в заданиях использованы реальные электронные схемы действующих изделий. Количество вариантов заданий позволяет не дублировать их внутри одной группы, например, для расчета надежности электронных схем предполагается 20 вариантов. Электронный учебник предполагает два тестирования с целью проверки текущего контроля знаний за семестр. Это заставляет студентов обращаться к конспекту не только в конце семестра, но и начинать разбираться в материале курса на ранних стадиях его усвоения.

По результатам использования учебника в осеннем семестре 2006 г. можно утверждать, что повысился уровень усвоения материала, что выразилось:

- в сдаче тестов по текущему контролю успеваемости 80% студентов.

- в увеличении количества отличных и хороших оценок на экзамене в зимнюю сессию.

В заключении отметим, что разработка электронных учебников дает возможность перехода к заочной форме образования, которая является одним из весомых путей развития кафедр.

Литература

1. Рабочая программа дисциплины «Основы проектирования приборов и систем» ОПД.Ф.08. СПб: СПбГУ ИТМО, 2000.

НОВЫЙ УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД И СРЕДСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ИСХОДНОГО КОНТУРА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Б.П. Тимофеев, Д.А. Фролов

В работе описывается методика измерения размера по роликам (шарикам) крупномодульных зубчатых колес с $m \geq 1$. Оценена возможность использования для контроля шариков, выпускаемых в виде отдельных деталей по ГОСТ 3722-81[1]. Приводятся таблицы для определения наименьшего отклонения размера по роликам и таблица полей допусков на размер по роликам. Предложен метод контроля зубчатых колес с нечетным числом зубьев при помощи трех шариков. Описан принцип действия устройства для измерения размера по роликам.

Введение

Метод основан на определении размера по роликам (шарикам) зубчатых колес, который используется для контроля мелко модульных зубчатых колес с $m \leq 1$. Определение размера по роликам осуществляется независимо от оси колеса с помощью комплекта роликов (шариков). Основным положительным моментом этого метода является то, что колесо может контролироваться без снятия со станка. Метод определения размера по роликам (шарикам) является более универсальным, чем измерение длины общей нормали, так как, например, колеса с несимметричным профилем общей нормали не имеют. Всесторонний анализ этого метода приводит к выводу, что он имеет неограниченные возможности и является самым точным. Метод весьма прост и осуществляется применением надежных и точных средств [2].

Универсальность метода заключается в том, что он:

- предназначен для измерения зубчатых колес как с симметричным зубом, так и с несимметричным зубом, т.е. может быть использован для измерения положения как стандартного, так и нестандартного исходного контура;
- позволяет контролировать зубчатые колеса с любыми значениями модуля, числа зубьев, угла профиля, угла наклона линии зуба, с любой шириной зубчатого венца;
- пригоден как для измерения колеса непосредственно на станке в процессе нарезания, так и для контроля готового изделия в лабораторных условиях.

Определение наименьшего отклонения размера по роликам и допуска на размер по роликам

При проверке косозубых колес вместо роликов применяются шарики, они должны касаться боковых сторон зубьев строго на делительной окружности, особенно в колесах с большим углом подъема винтовой линии. [3]. Поэтому далее мы будем говорить только о шариках, как о более универсальном средстве для определения размера по роликам (шарикам) зубчатых колес как прямозубых, так и косозубых.

ГОСТ 3722-81 предусматривает шарики, применяемые в виде отдельных деталей. Устанавливается 10 степеней точности шариков, обозначаемых в порядке снижения точности цифрами: 3; 5; 10; 16; 20; 28; 40; 60; 100; 200. Однако, ГОСТ 3722-81 допускает изготовление шариков, применяемых в виде отдельных деталей, с предельными отклонениями, отличающимися от указанных в таблице 2 этого ГОСТ. Поэтому в зависимости от вида сопряжения и вида допуска зубчатого колеса необходимо подобрать комплект шариков, в соответствии со степенью точности указанной в ГОСТ 3722-81, т.е. точность используемых шариков должна соответствовать виду сопряжения и виду допуска на боковой зазор.

ГОСТ 1643-81[4] рекомендует производить определение наименьшего отклонения размера по роликам в следующем порядке: по известному делительному диаметру, за-

данной степени точности по нормам плавности и виду сопряжения определяем первое слагаемое показателя E_{Wms} ; далее по определенному радиальному биению зубчатого венца F_r , зависящему от делительного диаметра, степени точности и модуля зубчатого колеса, определяем второе слагаемое E_{Wms} . Сложив первое и второе слагаемые, получаем значение E_{Wms} – наименьшее отклонение средней длины общей нормали, показателя нормы бокового зазора. Далее наименьшее отклонение размера по роликам определяется по формуле

$$E_{Ms} = \frac{E_{Wms}}{\sin \alpha_D \cos \beta_b},$$

где α_D – угол профиля в точке на концентрической окружности зубчатого колеса, проходящей через центр ролика, β_b – основной угол наклона.

Для прямозубого колеса данные расчетов первого и второго слагаемых E_{Wms} сведены в таблицы 1 и 2. Для косозубого колеса значение E_{Wms} следует разделить на величину $\cos \beta_b$, где β_b определяется из выражения $\beta_b = \arcsin(\sin \beta \cdot \cos \alpha)$, где β – угол наклона зуба, α – угол профиля зуба.

Таблица 1

E_{Ms} , слагаемое I, мкм													
Вид сопряжения	Степень точности по нормам плавности	Делительный диаметр d, мм											
		До 80	Св 80 до 125	Св 125 до 180	Св 180 до 250	Св 250 до 315	Св 315 до 400	Св 400 до 500	Св 500 до 630	Св 630 до 800	Св 800 до 1000	Св 1000 до 1250	Св 1250 до 1600
H	3-6	17	21	23	25	30	34	38	43	47	53	60	75
	7	21	21	25	30	34	38	43	47	53	60	64	86
E	3-6	43	51	60	64	75	86	96	107	118	129	150	194
	7	53	64	64	75	86	96	107	118	129	150	172	215
D	3-6	64	75	86	107	118	129	150	150	194	215	237	301
	7	75	86	107	118	129	150	150	172	215	237	258	344
	8	86	107	107	129	150	150	172	194	237	258	301	387
C	3-6	107	129	150	172	193	215	237	258	301	344	387	474
	7	118	150	150	172	215	237	258	301	301	344	431	538
	8	129	172	172	215	237	258	301	301	344	431	431	603
	9	150	172	215	237	258	301	301	344	431	431	538	646
B	3-6	172	215	237	258	301	344	387	431	474	538	603	754
	7	215	237	258	301	387	387	431	431	538	603	646	862
	8	215	237	301	301	387	431	431	538	603	646	754	862
	9	237	258	301	344	431	431	538	603	646	646	754	1078
	10	237	301	344	387	431	538	538	603	754	754	862	1078
	11	258	344	387	431	431	538	603	603	754	754	862	1078
A	3-6	258	301	387	431	474	538	603	646	754	862	1078	1185
	7	301	387	431	431	538	603	646	754	754	862	1078	1293
	8	344	431	431	538	603	646	754	754	862	1078	1185	1293
	9	387	431	538	603	603	754	754	862	1078	1185	1293	1509
	10	431	431	538	603	646	754	862	862	1078	1185	1293	1724
	11	431	538	603	646	754	754	862	1078	1185	1293	1509	1724
	12	431	538	646	754	754	862	1078	1078	1185	1293	1724	1724

Таблица 3

T_M , допуск на размер по роликам, мкм						
z	d	D	C	D	m, H	Вид сопряжения
						Вид допуска
Допуск на радиальное биение зубчатого венца, F_r						
130	95	75	60	40	35	До 8
130	105	85	65	50	35	Св 8 до 10
130	105	85	65	50	38	Св 10 до 12
150	115	85	75	50	40	Св 12 до 16
150	125	95	85	60	40	Св 16 до 20
170	125	105	95	65	40	Св 20 до 25
215	170	115	95	75	45	Св 25 до 32
235	190	125	105	85	50	Св 32 до 40
250	215	150	125	85	50	Св 40 до 50
300	235	215	150	85	60	Св 50 до 60
380	300	215	190	125	65	Св 60 до 80
430	320	250	230	150	85	Св 80 до 100
530	380	300	250	170	115	Св 100 до 125
640	510	430	300	215	150	Св 125 до 160
860	600	530	380	250	170	Св 160 до 200
1000	750	640	510	300	215	Св 200 до 250
1200	950	750	600	340	215	Св 250 до 320
1700	1100	950	640	510	300	Св 320 до 400
1700	1500	1100	860	530	340	Св 400 до 500
2300	1700	1500	1100	750	430	Св 500 до 630
3000	2100	1900	1200	1000	600	Св 630 до 800
T_M , допуск на размер по роликам, мкм						

$$T_M \approx \frac{T_{W_m}}{\sin \alpha_D \cos \beta_h}.$$

Для прямозубого колеса расчеты сведены в таблицу 3.

Заключение

В работе предложена методика измерения размера по роликам (шарикам) крупномодульных зубчатых колес с $m \geq 1$. Описана возможность использования для контроля шариков, выпускаемых в виде отдельных деталей по ГОСТ 3722-81. Приведены таблицы для определения наименьшего отклонения размера по роликам и таблица полей допусков на размер по роликам. Предложен метод контроля зубчатых колес с нечетным числом зубьев при помощи трех шариков. Описан принцип действия устройства для измерения размера по роликам.

Литература

1. ГОСТ 3722-81 Подшипники качения. Шарики. Технические условия.
2. Рогачевский Н.И. Выбор роликов (шариков) при измерении зубчатых колес. // Известия вузов. Машиностроение. 1985. №4. С. 27–31
3. Ружичка В. Контроль зубчатых колес с введением в основы геометрического расчета зубчатых зацеплений. / Под ред. Тайца Б.А. М.: Машгиз, 1960.
4. ГОСТ 1643-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ НЕКРУГЛОСТИ И НЕЦИЛИНДРИЧНОСТИ

Б.П. Тимофеев, С.Ю. Млокосевич

В работе рассмотрены основные существующие методы и средства контроля формы поперечного сечения тел вращения. Описаны особенности различных методов, их достоинства и недостатки. Дан ряд рекомендаций по выбору средств измерения.

Введение

Существует несколько общепринятых методов измерения геометрической формы тел вращения – измерения по образцовой поверхности, измерения при прецизионном вращении, разностные измерения.

Измерения по образцовой поверхности заключается в сравнении детали с подобной ей образцовой, погрешности формы которой настолько малы по сравнению с допустимой погрешностью измерения, что ими можно пренебречь. Примером может служить измерение формы вала, когда на его концах установлены два кольца, отклонения от круглости которых пренебрежимо малы. Измерения производятся при помощи трех датчиков. Два установлены на образцовые кольца и позволяют замерить траекторию движения вала в процессе измерения. Один датчик перемещается вдоль вращающегося вала. Показания датчиков определенным образом суммируются, в результате чего удается исключить колебания оси вращения в пространстве.

К проверке по образцовой поверхности можно отнести также способ контроля «на краску». Проверка «на краску» возможна лишь в том случае, если размеры проверяемой и образцовой поверхности одинаковы или очень близки. Примером может служить производство конусных калибров.

Измерения при прецизионном вращении – это самый точный и наиболее широко распространенный в настоящее время в промышленности метод измерения отклонения круглости, позволяющий проводить измерения нецилиндричности. Конструктивно он реализуется в трех вариантах (рис. 1): кругломеры с прецизионным шпинделем, с центрами и со сферическими опорами. Сущность способа прецизионного вращения сводится к тому, что создается независимая от проверяемой поверхности система, одна из деталей которой (или группа деталей) может совершать вращательное движение. Конструкция системы такова, что вращающаяся деталь практически имеет лишь одну степень свободы – возможность поворота вокруг некоторой оси. Тогда траектория любой точки вращающегося элемента будет являться кривой, которая может быть принята за образцовую окружность. Аналогично, если рассмотреть обращенный вариант, то образцовой окружностью будет траектория любой точки пространства, неподвижной относительно вращающегося узла. Чтобы сопоставить профиль проверяемой поверхности с этой окружностью, нужно сцентрировать деталь относительно оси вращения и обкатать ее измерительной головкой, чувствительной к малым линейным перемещениям. При движении головки относительно детали колебания радиуса (т.е. отклонение от круглости) последней вызывают перемещения наконечника измерительной головки, которые преобразуются в электрический сигнал, используемый после усиления и преобразования для управления регистрирующим прибором.

В конструктивном варианте, изображенном на рис. 1, а, измерительная головка жестко закрепляется на прецизионно вращающемся шпинделе, а проверяемая деталь устанавливается под шпинделем на координатном столике, обеспечивающем возможность ее точного центрирования и нивелировки. Во время измерения деталь остается неподвижной. Достоинство этого варианта в том, что наиболее ответственный узел прибора – прецизионный шпиндель – не нагружается весом проверяемой детали. На-

грузка на шпиндель определяется только его собственной массой и массой измерительной головки. В процессе работы эта нагрузка всегда остается постоянной. Тем самым обеспечиваются благоприятные условия для длительного сохранения, точности, достигнутой при изготовлении шпинделя.

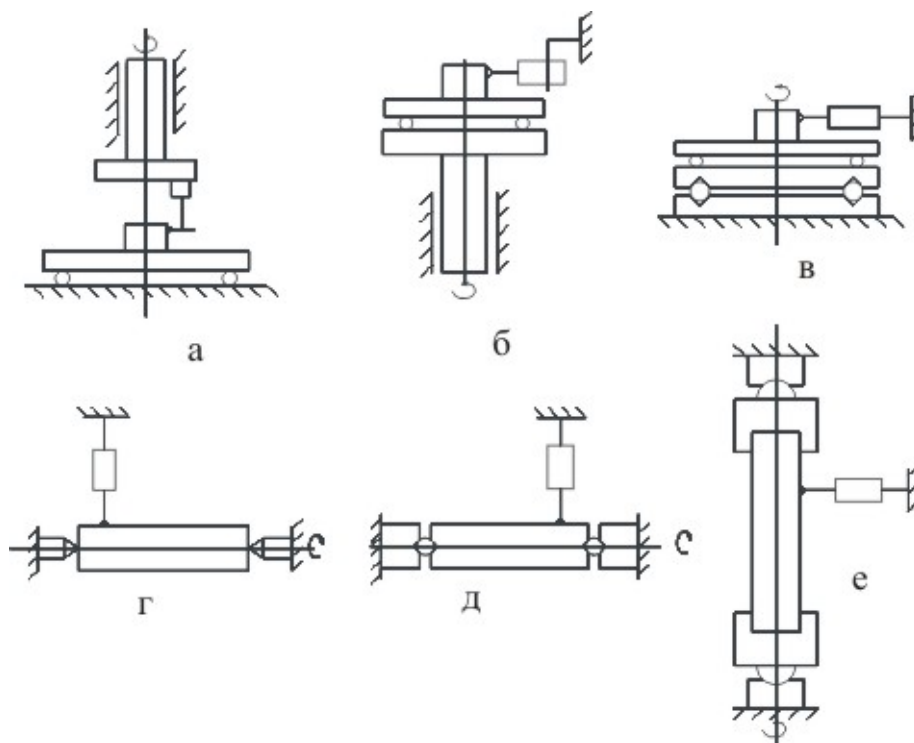


Рис. 1. Измерения при прецизионном вращении

В то же время рассматриваемая схема имеет и ряд недостатков. Во-первых, расстояние от торца детали до проверяемого сечения лимитируется длиной щупа измерительной головки. Длину щупа нельзя увеличивать беспречно, так как при этом пропорционально уменьшается коэффициент усиления прибора и, кроме того, длинные щупы подвержены вибрации, искажающей результаты измерения. Поэтому может оказаться невозможной проверка длинного вала или глубокого отверстия. Во-вторых, схема с вращающейся измерительной головкой ограничивает возможности измерения взаимного расположения отдельных сечений поверхности. На шпинделе практически можно установить только одну измерительную головку, поэтому одновременная проверка нескольких сечений исключается. При необходимости проверить соосность двух поверхностей детали или двух сечений одной и той же поверхности приходится пользоваться приспособлениями или проводить измерения по специальной методике с последующей дополнительной обработкой результатов.

В вариантах, показанных на рис. 1, б, в, проверяемая деталь устанавливается, центрируется, нивелируется на поворотном шпинделе-столике и вращается вместе с ним относительно неподвижной во время проверки измерительной головки, размещенной на отдельной стойке. В данном случае все сечения детали одинаково доступны для измерения, и чтобы перейти от одного сечения к другому, достаточно переместить измерительную головку по стойке. При этом легче сочетать проверку круглости с контролем взаимного расположения различных сечений и поверхностей детали. Принципиально возможно применение двух или более измерительных головок одновременно. Таким образом, данная схема измерения обеспечивает более широкие метрологические возможности, чем схема с вращающейся измерительной головкой. Однако область

применения приборов с вращающимся столом ограничена, так как нагрузка от проверяемой детали воспринимается теми же опорами, которые обеспечивают прецизионное вращение. Требования, предъявляемые к точности работы опор, лимитируют как допустимую массу проверяемой детали, так и в определенной степени ее конфигурацию, поскольку асимметричная нагрузка отрицательно влияет на точность вращения.

Данные схемы позволяют производить измерение отклонения от цилиндричности, однако для этого необходима дополнительная математическая обработка результатов, выделяющая наклон оси детали к оси вращения прибора.

Проверка в центрах (рис. 1, г) также может рассматриваться как один из вариантов контроля круглости способом прецизионного вращения. Независимая от проверяемой поверхности система, обеспечивающая вращение, представлена здесь опорными центрами прибора и центровыми гнездами детали. Конструктивно такая система очень проста, но технологически выполнить ее с высокой степенью точности сложно, тем более что один из основных компонентов – центровые отверстия детали – не является стационарной частью прибора, а принадлежит проверяемой детали и меняется при ее замене. Погрешность вращения в центрах зависит от ошибок формы и взаимного расположения центровых гнезд самой проверяемой детали, центров прибора, на которые она устанавливается при проверке, и центров станка, использовавшегося для окончательной обработки детали. Отдельные звенья этой системы поверхностей выполняются независимо друг от друга, так что точность их сопряжения технологически не обеспечивается. При измерении отклонения от круглости одной и той же детали на нескольких центровых приборах результаты часто расходятся на 1,5–2 мкм. Поэтому обычная проверка в центрах используется лишь для ориентировочной оценки отклонений формы или при контроле деталей невысоких классов точности.

Более высокую точность вращения получают при использовании так называемых «шариковых центров». В этом случае (рис. 1, д) и деталь, и центры прибора имеют центровые гнезда, между которыми закладываются точные шары. Диаметр шаров выбирается так, чтобы контакт между шаром и центровым гнездом осуществлялся не по фаске, а по конической поверхности последнего. Желательно использовать одни и те же шары и при окончательном шлифовании, и при проверке детали.

Дальнейшее повышение точности достигается переходом к вращению детали в сферических опорах (рис. 1, е). Качественное отличие этого способа от традиционных проверок в центрах заключается в том, что центровые гнезда детали полностью исключаются из системы поверхностей, обеспечивающих ее вращение. Концы детали жестко закрепляются в патронах, каждый из которых связан с подвижным элементом соответствующей сферической опоры. Последние выполняются в виде шара и внутренней полусферы, притертых в паре и снабженных системой канавок для подачи смазки. Обе опоры замыкаются в единую систему через проверяемую деталь и обеспечивают прецизионное вращение последней относительно оси, проходящей через центры сфер. Центрирующие механизмы, встраиваемые в патроны, позволяют совместить ось детали с осью вращения. Сопрягаемые поверхности опор могут быть изготовлены с очень высокой точностью и способны выдерживать большие нагрузки, поэтому данный способ удобен при прецизионном контроле крупногабаритных тяжелых валов. Как и при измерении в центрах, оптимальным является вертикальное расположение оси проверяемой детали. Вертикальная компоновка снижает деформации, обусловленные собственной массой детали и влияющие на точность измерения.

Измерения отклонения от цилиндричности в данном случае возможны, однако здесь также необходимо выделять положение оси.

Так или иначе, для определения отклонения от цилиндричности нужно проведение дополнительной математической обработки результатов. Современные измери-

тельные системы, как правило, снабжены необходимым аппаратным и программным оборудованием (рис. 2).



Рис. 2. Talyrond 300

Следующий рассматриваемый метод – разностные измерения. Термин «разностные» отражает основную характерную особенность рассматриваемых измерений: в каждый данный момент измеряется не абсолютное значение интересующей нас функции, а разность между ее последовательными значениями, разделенными определенным промежутком. Различные схемы разностных измерений из ISO 4292 приведены на рис. 3, а–г:

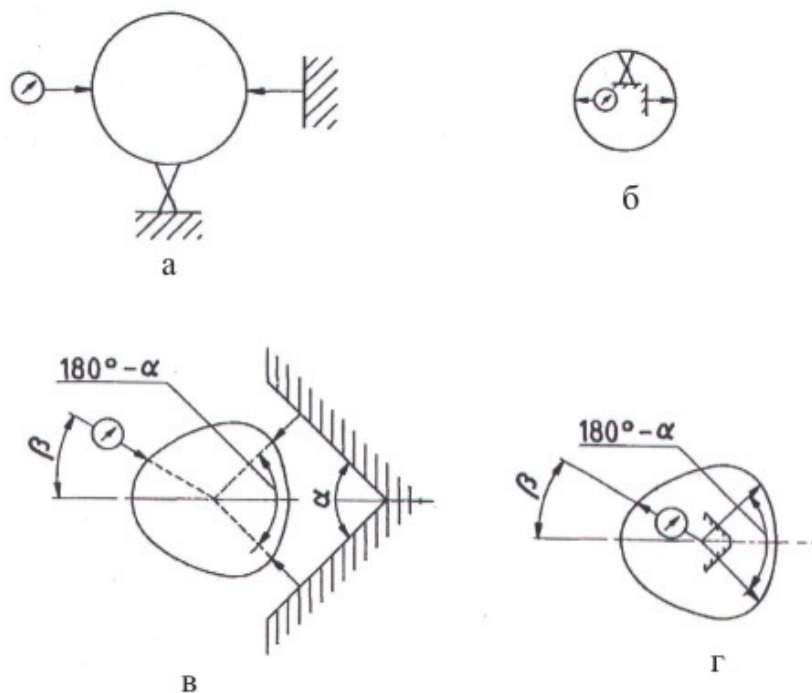


Рис. 3. Разностные схемы

На рис. 3, а, б показаны двухточечные измерительные схемы, в, г – трехточечные.

Основная особенность разностных измерений состоит в следующем. Если считать, что профиль детали является периодической кривой синусоидальной формы, причем на окружности укладывается n периодов отклонений, то показания прибора Δ будут связаны со значением отклонения от круглости Δ_r уравнением:

$$\Delta = \mu_n \Delta_r, \quad (1)$$

где μ_n – коэффициент пропорциональности, называемый обычно «коэффициентом воспроизведения»,

$$\mu_n = f(\alpha, \beta, n). \quad (2)$$

Каждый конкретный прибор с фиксированными значениями α и β имеет разные коэффициенты воспроизведения для разных гармонических составляющих отклонений формы профиля проверяемой детали. Поскольку обычно профиль детали не является геометрически правильной фигурой, а представляет собой сумму различных гармоник, отличающихся друг от друга периодами, амплитудами и фазами, установление зависимости между Δ и Δ_r – сложная математическая задача, и по непосредственным результатам проверки на двух- или трехконтактном приборе судить об отклонении от круглости детали можно лишь весьма приближенно. Применять эти приборы для измерения отклонения от цилиндричности возможно, математически исключая методическую погрешность.

Недостатком всех призматических приборов является наличие некоторой зоны нечувствительности. Чтобы обойти этот неприятный факт, возможно использование нескольких призм (приборы фирмы «Bendix», рис. 4).

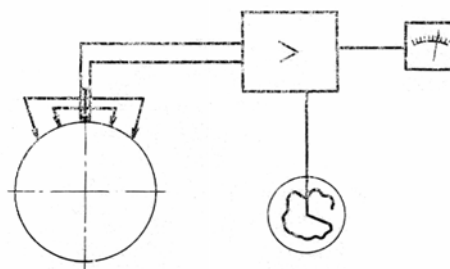


Рис. 4. Схема кругломера фирмы «Bendix»

Другой способ – использование многозвенных призм (кругломеры с многоступенчатыми самоустанавливающимися опорами фирмы «Техномаш», рис 5).



Рис. 5. Кругломер RON-Pilot

Заключение

Выбор измерительного средства определяется исходя из конкретного технического задания. В целом можно сказать, что в первом приближении отклонение от круглости можно оценить в центрах или на призмах. Для проведения более точных измерений можно использовать разностные кругломеры. Наиболее точно форму сечения позволяют измерить кругломеры с прецизионным вращением.

В том случае, если требуется произвести измерение в цеховых условиях (например, сразу после обработки детали непосредственно на станке) можно использовать только разностные кругломеры (в простейшем случае – призмы, схема «наездник»). Эти же приборы – единственные, способные проводить измерения крупногабаритных деталей (массой более тонны).

Следует отметить одну особенность разностных измерений. Погрешность таких приборов не имеет постоянной составляющей (не считая погрешности используемого измерительного преобразователя). Чем меньше измеряемая величина отклонения формы, тем меньше погрешность ее измерения. Кругломеры с прецизионным вращением имеют постоянную составляющую погрешности, обусловленную биением шпинделя. Получается парадокс – простые по конструкции разностные кругломеры позволяют проводить измерения формы точных поверхностей с меньшей погрешностью, чем сложные дорогостоящие кругломеры с прецизионным шпинделем.

Литература

1. Авдулов А.Н. Контроль и оценка круглости деталей машин. М.: Изд. стандартов, 1974.
2. ГОСТ 17353-89. Приборы для измерений отклонений формы и расположения поверхностей вращения. Типы, общие технические требования.
3. ГОСТ 24642-81 (СТ СЭВ 301-76). Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения.
4. Патент №2134404. Накладной кругломер.
5. D.J. Witehouse. Handbook of surface metrology. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 1994.
6. ISO 4291-1985E. Methods for the assessment of departure from roundness - Measurement of variations in radius.
7. ISO 4292-1985E. Methods for the assessment of departure from roundness - Measurement by two- and three-point methods.
8. ISO 6318-1985 E. Measurement of roundness - Terms, definitions and parameters of roundness.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТА КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЕРЕДАЧАХ С НЕСИММЕТРИЧНЫМИ ЗУБЬЯМИ

Б.П. Тимофеев, А.И. Кириченко

Основным методом расчета зубчатых передач на контактную прочность является метод, приведенный в ГОСТ 21354–87. В работе рассматривается альтернативный метод расчета контактных напряжений для передач с несимметричными зубьями – метод конечных элементов. Проводится сравнение между методом по ГОСТ 21354–87 и методом конечных элементов.

Введение

Две стороны зуба зубчатого колеса функционально различны для большинства механизмов. Либо рабочая нагрузка на одном профиле значительно выше, чем на другом, либо нагрузка одинакова, но используется для одного из профилей в течение существенно более длительного периода времени. И в том, и в другом случае несимметричный зуб может обеспечить одинаковый срок службы по обеим сторонам. Главная выгода применения несимметричных зубьев состоит в повышении контактной прочности по мере увеличения угла профиля [1].

В данной работе сравниваются численный и аналитический методы определения контактной прочности зубчатых колес с несимметричным зубом.

Расчет аналитическим методом производился на основе существующего ГОСТ 21354–87 «Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность» [2, 3].

В основе численного метода расчета напряжений лежит метод конечных элементов (МКЭ). Метод конечных элементов в последние десятилетия получил очень широкое распространение и стал одним из основных методов расчета конструкций. Это обусловлено универсальностью подхода, лежащего в основе МКЭ, заключающегося в представлении геометрии любого деформируемого тела в виде совокупности элементов простейшей формы: треугольной, четырехугольной и др. Элементы бывают одномерными, плоскими и пространственными, с прямолинейными или криволинейными сторонами. Вдоль каждой из них может быть два или более узлов, что обуславливает необходимую степень точности расчетов [4].

Методика расчета

Для расчета контактных напряжений методом конечных элементов был использован программный пакет MSC.visualNastran. Данный программный продукт позволяет рассчитывать действующие напряжения в трехмерной модели исследуемого объекта.

Трехмерная модель зубчатого колеса с несимметричным зубом была построена в пакете AutoCad с помощью имеющихся в нем инструментов твердотельного моделирования. Для этого была написана вспомогательная программа на встроенном в AutoCad языке VisualLisp, которая методом обкатки создавала трехмерную модель зубчатого колеса.

Если нарезать все зубья на трехмерной модели, то из-за большого количества образующих граней модель становится очень громоздкой, и для ее расчета требуется большое количество вычислительных ресурсов и времени обработки. Поэтому для ускорения расчетов в модели строился только один зуб с несимметричным профилем.

После построения полученная модель экспортировалась в промежуточный формат ACIS. Это файл ASCII-формата для геометрического ядра твердотельного моделирования.

Далее файл в формате ACIS импортировался в MSC.visualNastran. Для того чтобы MSC.visualNastran смог рассчитать действующие напряжения, необходимо задать исходные данные.

1. Материал твердотельной модели. Материал модели представляет собой совокупность различных характеристик, таких как модуль упругости, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, предел текучести при растяжении, плотность и др. Для расчета напряжений достаточно задать только модуль упругости (Юнга) и коэффициент Пуассона. В данном расчете были применены следующие характеристики:

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}, \mu = 0,33.$$

2. Конечно-элементная сетка является основной составляющей расчета методом конечных элементов, так как именно в узлах этой сетки и определяются действующие напряжения. Таким образом, чем меньше элементы этой сетки, тем точнее будут полученные результаты и тем больше времени и вычислительных ресурсов требуется для расчета. При приближенном расчете можно использовать крупную сетку, а при уточненном сетку можно «сгустить» в интересующих участках. При данном расчете сетка была уточнена в области действия нагрузки на зуб.

3. Действующие нагрузки и наложенные на движение связи. Для расчета необходимо указать место (точку, линию или область), направление и величину действующей нагрузки, а также ограничение на перемещение модели. В данном расчете нагрузкой являлась сила, равномерно распределенная по линии контакта зуба, проходящей через точку пересечения среднего профиля зуба с начальным цилиндром. При этом было наложено ограничение на движение колеса.

Расчет

Расчет действующих контактных напряжений был произведен для трех зубчатых передач. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1. Входная мощность составляет 81 кВт на каждом из двух ведущих зубчатых колес, а частота вращения на входе равна 1440 об/мин.

№ передачи	m , мм	z_1	z_2	b_w , мм
1	5	13	50	55
2	8	14	25	120
3	10	13	27	130

Таблица 1. Исходные данные для расчета

Графическое представление результатов расчета, полученных при анализе построенной модели в пакете MSC.visualNastran, приведено на рис. 1– 3.

На изображениях видно распределение действующих напряжений (в случае черно-белой печати качество отображения диапазона действующих напряжений резко снижается). Максимальные контактные напряжения полученные в результате расчета приведены в табл. 2. Также в табл. 2 для сравнения приведены результаты аналитического расчета контактных напряжений в тех же зубчатых передачах.

№ передачи	σ_H (аналитич.), МПа	σ_H (конечн.-эл.), МПа	$[\sigma_H]$, МПа
1	593	679	1055
2	1095	872	1235
3	1219	945	1383

Таблица 2. Результаты расчета контактной прочности аналитическим методом и методом конечных элементов

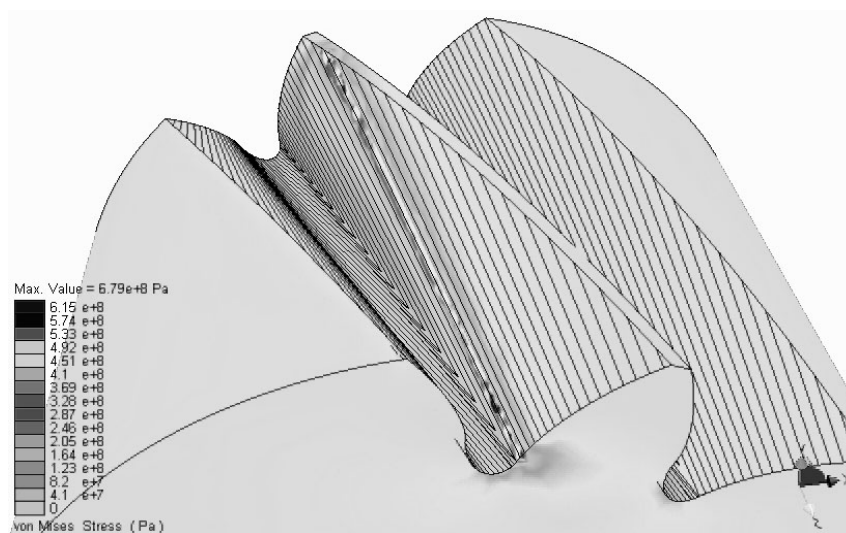


Рис. 1. Результат расчета напряжений в шестерне 1-ой зубчатой передачи

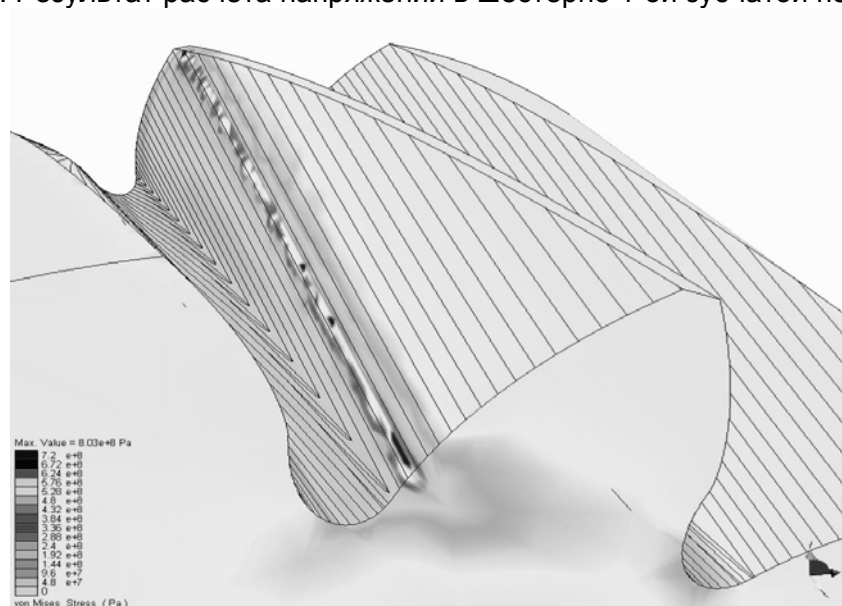


Рис. 2. Результат расчета напряжений в шестерне 2-ой зубчатой передачи

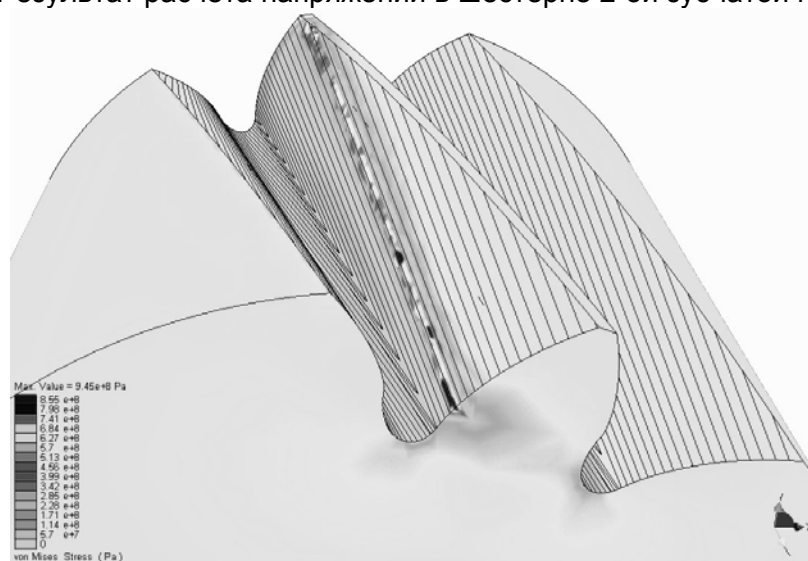


Рис. 3. Результат расчета напряжений в шестерне 3-ей зубчатой передачи

Заключение

Результаты, полученные методом конечных элементов, имеют заметное расхождение с результатами, полученными аналитическим путем (особенно во 2-ой и 3-ей зубчатых передачах). Это частично можно объяснить тем, что при расчете методом конечных элементов были сделаны следующие допущения.

- В зацеплении участвует только один зуб, поэтому коэффициент перекрытия, присутствующий в аналитическом расчете, не учитывается.
- Максимальные контактные напряжения действуют, когда линия контакта зубьев проходит через точку пересечения среднего профиля зуба с начальным цилиндром.
- Сила, действующая на зуб, равномерно распределена по линии контакта зуба.
- Существенно влияние качества построенной сетки конечных элементов. Здесь сказывается влияние таких параметров, как количество, размер и тип конечных элементов, использованных при построении конечно-элементной модели. Для повышения точности решения необходимо разбиение модели на большее число элементов или использование элементов с промежуточными узлами, позволяющими осуществлять аппроксимацию полиномами более высокого порядка.

Также следует принять во внимание тот факт, что метод конечных элементов, как и другие численные методы, имеет собственную погрешность, которую необходимо учитывать при анализе полученных данных.

Таким образом, данные вопросы требуют дальнейшего, более глубокого исследования.

Литература

1. Вулгаков Э. Б., Капелевич А. Л. Возможности несимметричных зубчатых передач. // Вестник машиностроения. 1986. № 4. С.14–16.
2. Тимофеев Б. П., Кириченко А. И. Отыскание параметров зубчатых передач, обеспечивающих минимальные контактные напряжения. // Научно-технический вестник. Выпуск 9. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2003. 159 с.
3. ГОСТ 21354–87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность.
4. Шимкович Д.Г., Расчет конструкций в MSC.visualNastran for Windows. М.: ДМК Пресс, 2004. 704 с.
5. Кудрявцев В.Н., Расчет и проектирование зубчатых редукторов: Справочник. СПб.: Политехника, 1993.

АНАЛИЗ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО РЕДУКТОРОСТРОЕНИЯ В ЧАСТИ ТОЧНОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ПЕРЕДАЧ

Б.П. Тимофеев, М.В. Абрамчук

В данной работе проводился сравнительный анализ требований к точности зубчатых колес и передач в стандартах ISO 1328 и ГОСТ 1643-81. Анализ проводился, во-первых, отдельно по двухпрофильному и однопрофильному методам контроля, а во-вторых, по нормам кинематической точности, плавности работы и нормам контакта в соответствии с классификацией ГОСТ 1643-81. Анализировались лишь те нормы, которые есть в обоих указанных стандартах.

Введение

Базовый стандарт ГОСТ 1643-81 «Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски» [1] не пересматривался уже четверть века. Он не учитывает требований международного стандарта ISO 1328, части которого принимались в 1995–1997 гг. (ISO 1328-1:1995 [2], ISO 1328-2:1997 [3]). Данное обстоятельство делает затруднительным для отечественных производителей выпуск конкурентоспособной продукции. Сравнительный анализ указанных документов позволяет установить те диапазоны изменения основных параметров передач и те степени точности, в которых отечественная продукция уже соответствует нормам ISO 1328, а для других параметров передач указать пути сближения уровня требований.

Анализ допусков в стандартах ISO 1328

Проведем анализ значений допусков в стандартах ISO 1328 и ГОСТ 1643-81 в широком диапазоне изменения значений модуля зубьев, m , делительного диаметра, d и ширины зубчатого венца, b . При этом учтем то обстоятельство, что стандарт ISO 1328 значительно отличается от базового стандарта ГОСТ 1643-81 и имеет иную структуры системы точности [4], в связи с чем, будем использовать только те показатели точности, которые встречаются в обоих стандартах.

3.1. Допуск на колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса, F_i'' (рис. 1, 2).

F_i'' , $\mu\text{км}$

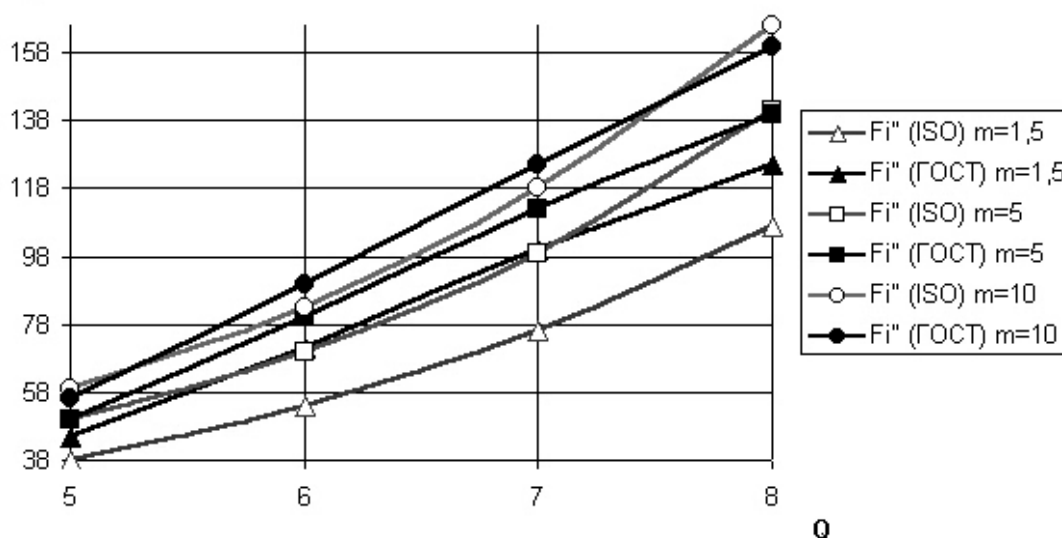


Рис. 1. Допуск на колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса, F_i'' . $d=1000$ мм, $m=1,5 \dots 10$ мм, $Q=5 \dots 8$

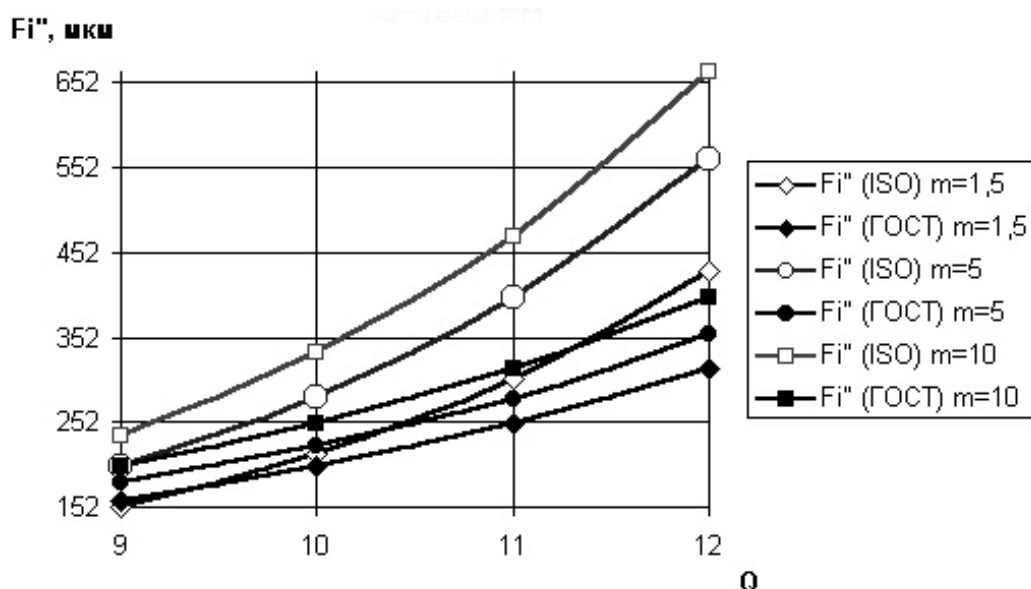


Рис. 2. Допуск на колебание измерительного расстояния за оборот зубчатого колеса, F_i'' . $d=1000$ мм, $m=1,5-10$ мм, $Q=9-12$

С уменьшением значения делительного диаметра и с увеличением модуля зубьев (с $m=1,5$ мм до $m=10$ мм) в средних степенях точности (5–8) значения допуска на колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса в ISO 1328 становятся грубее, чем в ГОСТ 1643-81. В низших степенях точности (9-12) наблюдается схожая картина. При модуле зубьев $m=10$ мм и делительных диаметрах ($d=100$ мм и 1000 мм) значения допуска на колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса в ISO 1328 больше, чем в ГОСТ 1643-81 во всём диапазоне степеней точности (для данной погрешности – от 5 до 12 степени).

Такая же ситуация наблюдается и для допуска на колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе, f_i'' .

Примечание ко всем графикам: Q – степень точности.

3.2. Допуск на накопленную погрешность шага зубчатого колеса, F_p (рис. 3, 4).

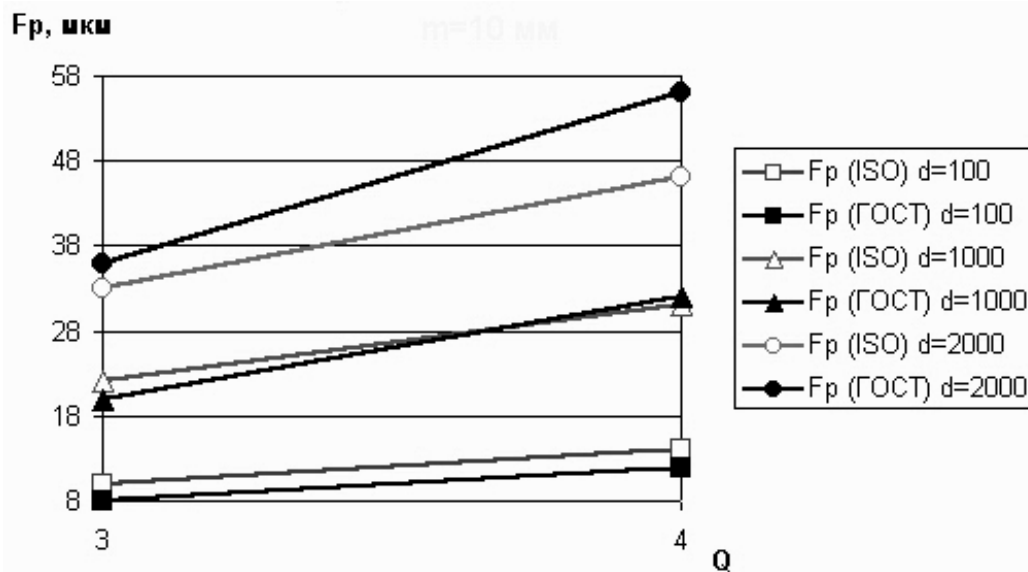


Рис. 3. Допуск на накопленную погрешность шага зубчатого колеса, F_p $m=10$ мм, $d=100 \dots 1000$ мм, $Q=3 \dots 4$

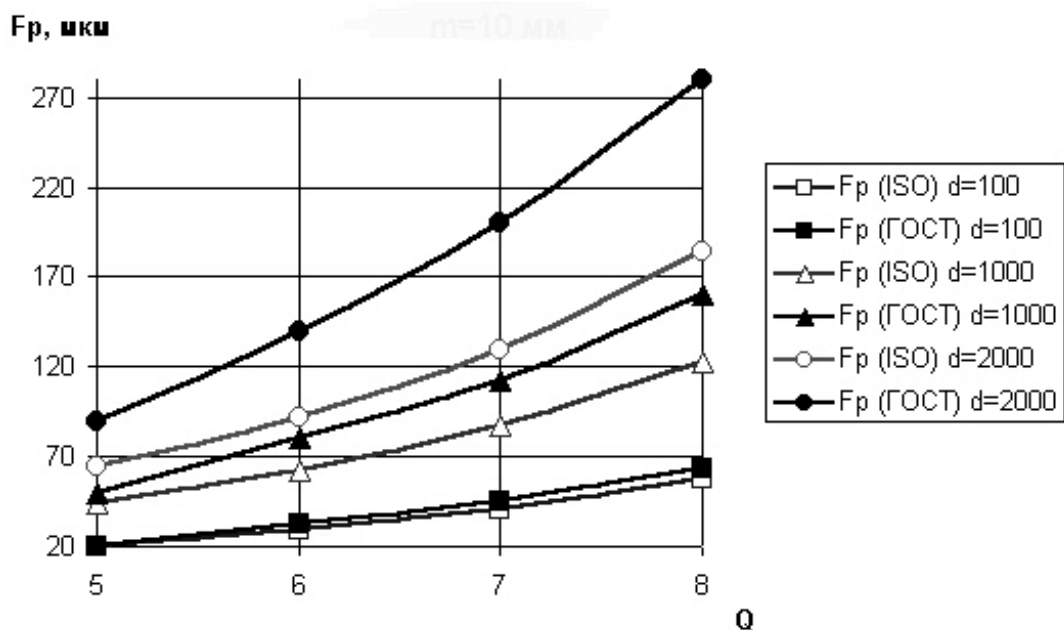


Рис. 4. Допуск на накопленную погрешность шага зубчатого колеса, F_p
 $m=10 \text{ мм}$, $d=100\text{--}1000 \text{ мм}$, $Q=5\text{--}8$

В высоких степенях точности (3–4) при диаметрах колес до $d=2000 \text{ мм}$ величины допусков в обоих стандартах совпадают или незначительно отличаются (в пределах трех микрометров).

В средних степенях точности (5–8) при постоянном значении модуля зубьев и при увеличении делительного диаметра (от $d=100$ до $d=2000 \text{ мм}$) разность значений допусков на накопленную погрешность шага в ISO 1328 и ГОСТ 1643-81 увеличивается с повышением степени точности. В 8 степени точности допуск на накопленную погрешность шага в ГОСТ 1643-81 больше аналогичного допуска в ISO 1328 почти на 100 мкм.

3.3 Допуск на радиальное биение зубчатого венца, F_r (рис. 5–7).

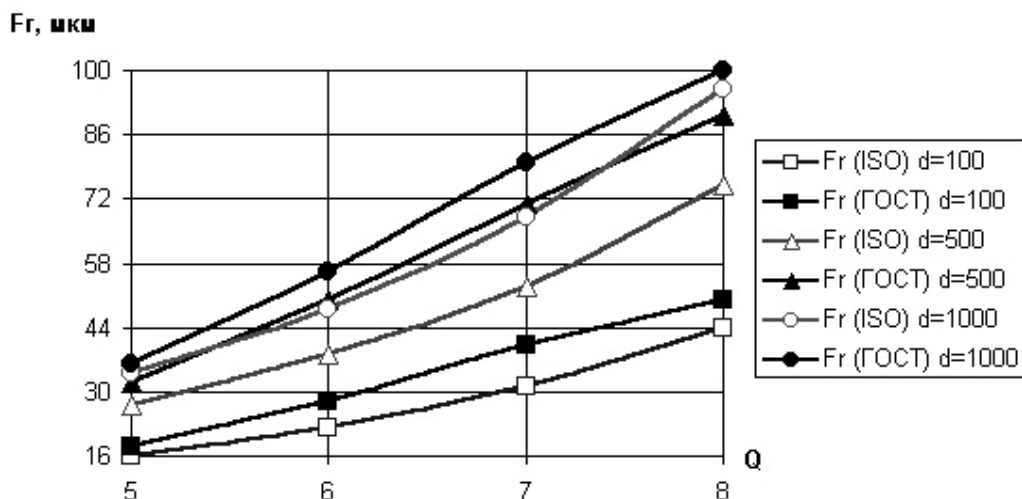


График 5. Допуск на радиальное биение зубчатого венца, F_r
 $m=5 \text{ мм}$, $d=100 \dots 1000 \text{ мм}$, $Q=5 \dots 8$

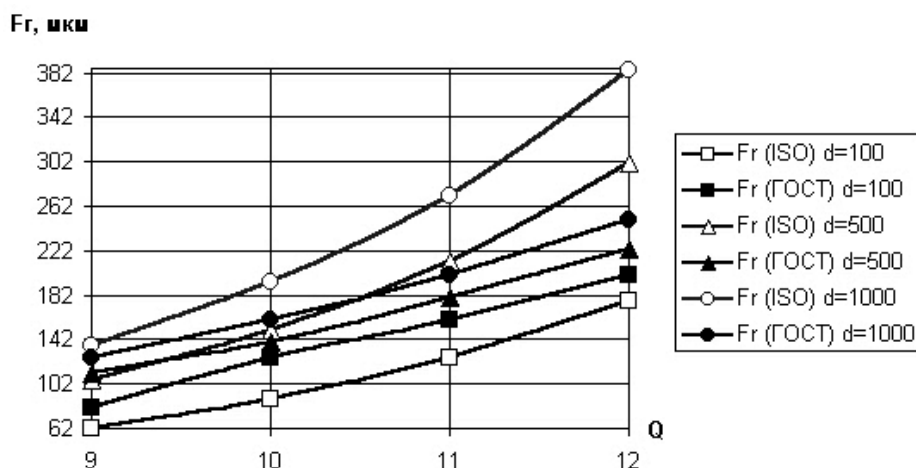


График 6. Допуск на радиальное биение зубчатого венца, Fr
 $m=5$ мм, $d=100 \dots 1000$ мм, $Q=9 \dots 12$

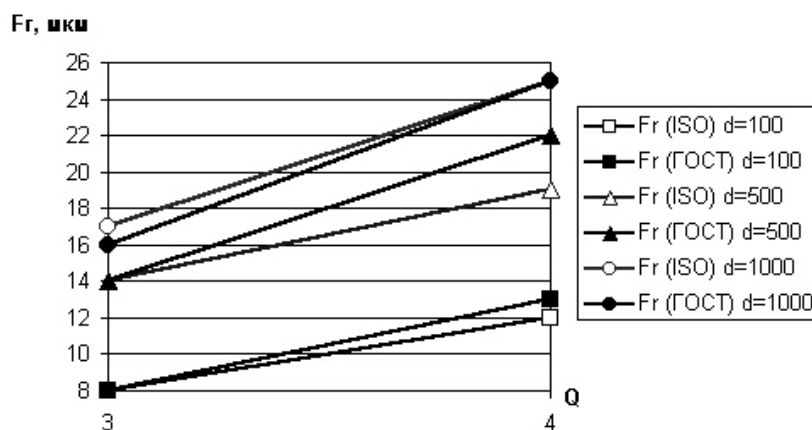


График 7. Допуск на радиальное биение зубчатого венца, Fr
 $m=10$ мм, $d=100\text{--}1000$ мм, $Q=3\text{--}4$

Допуски на радиальное биение в ISO 1328 и ГОСТ 1643-81 в высоких степенях точности (3–4) примерно равны или незначительно отличаются (в пределах 3 мкм). В средних степенях точности (5–8) величины допусков в ГОСТ 1643-81, в основном, больше чем в стандарте ISO 1328. В низких степенях точности (9–12) значения допусков на радиальное биение в ISO больше, чем в ГОСТ 164-81, начиная с $d=500$ мм и выше, и уменьшаются с увеличением модуля зубьев.

3.4. Допуск на погрешность профиля зуба, f_f (рис. 8).

В большинстве случаев при модулях $m=5$ и $m=10$ мм значения допусков на погрешность профиля зуба в стандарте ISO 1328 больше, чем в ГОСТ 1643-81 во всех степенях точности (3–8 для данной погрешности). При малых значениях модуля ($m=1,5$ мм) разница между величинами допусков в обоих стандартах находится в пределах 4 мкм.

3.5. Предельные отклонения шага, $\pm f_{pt}$ (рис. 9–11).

В высоких степенях точности (3–4) для всех исследуемых значений делительного диаметра (от $d=100$ мм до $d=2000$ мм) и модуля зацепления (от $m=1,5$ мм до $m=10$ мм) разность предельных отклонений шага в ГОСТ 1643-81 и ISO 1328 не превышает 1,5 мкм. В остальных случаях (6–12 степень точности) величины предельных отклонений шага в ГОСТ 1643-81 больше, чем в ISO 1328. При этом в средних степенях точности (5–8) в 5–6-й степенях точности разность между величинами допусков колеблется от 0,5 до 6 мкм.

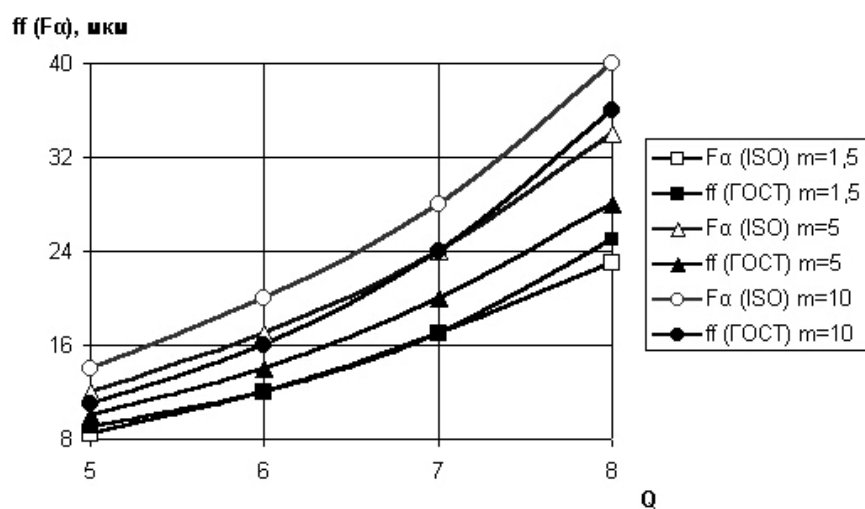


Рис. 8. Допуск на погрешность профиля зуба, ff
 $d=500$ мм, $m=1,5 - 10$ мм, $Q=5-8$

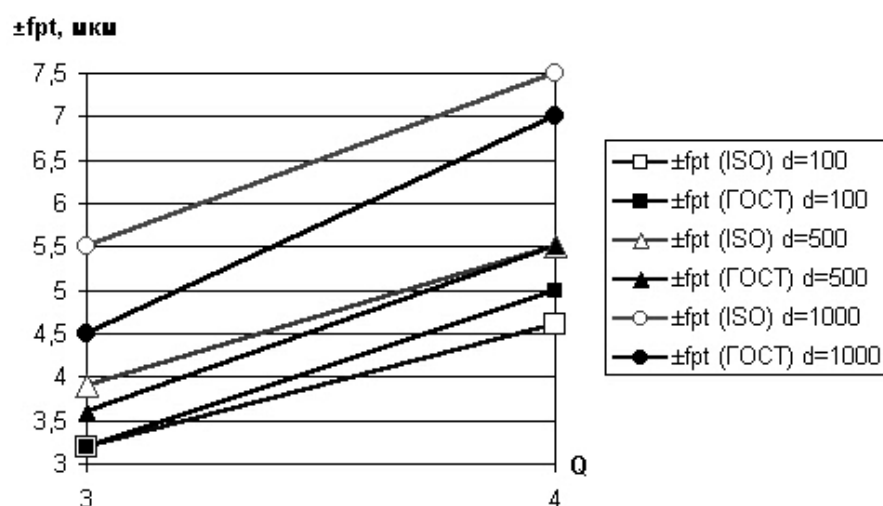


Рис. 9. Предельные отклонения шага, $\pm fpt$
 $m=5$ мм, $d=100 - 1000$ мм, $Q=3-4$

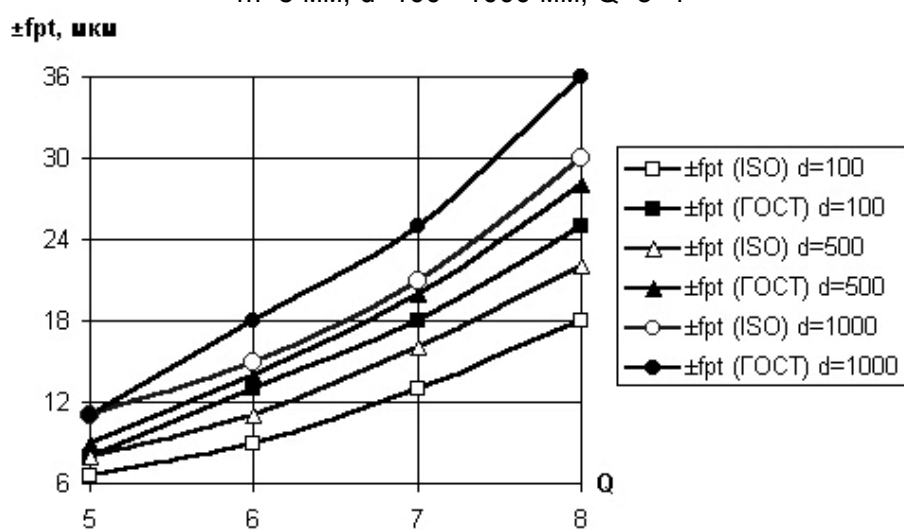


Рис. 10. Предельные отклонения шага, $\pm fpt$
 $m=5$ мм, $d=100 - 1000$ мм, $Q=5-8$

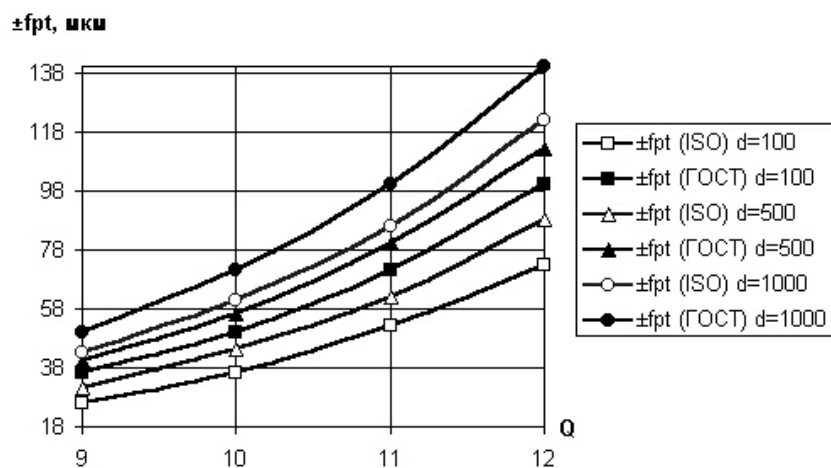


График 11. Предельные отклонения шага, $\pm f_{pt}$
 $m=5$ мм, $d=100-1000$ мм, $Q=9-12$

3.6. Допуск на погрешность направления зуба, F_β (рис. 9–11).

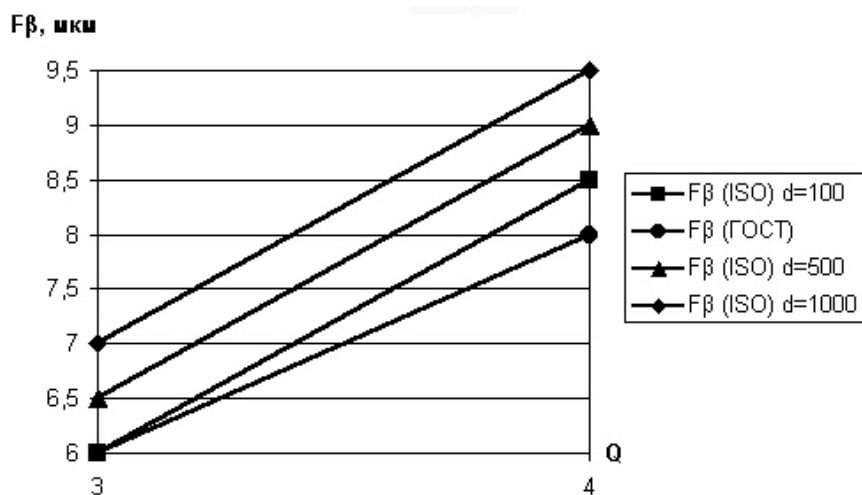


График 12. Допуск на погрешность направления зуба, F_β
 $b=100$ мм, $m=5$ мм, $Q=3 \dots 4$

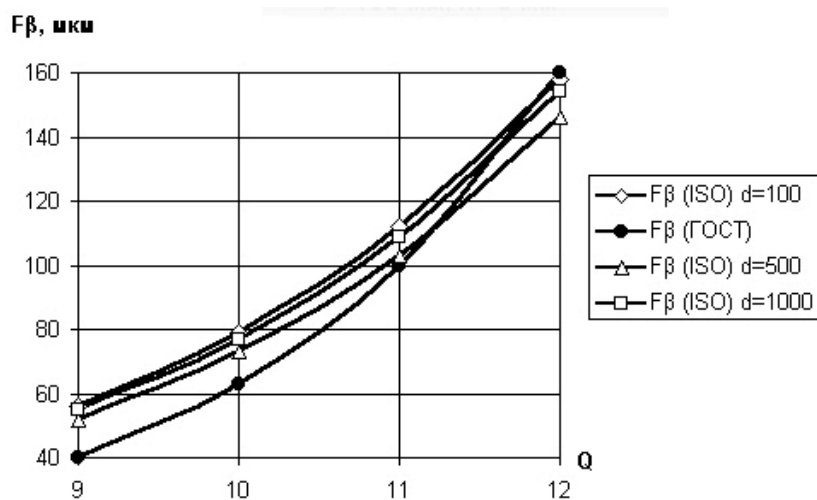


График 13. Допуск на погрешность направления зуба, F_β

$$b=100 \text{ мм}, m=5 \text{ мм}, Q= 9 \dots 12$$

В высоких (3–4) и средних степенях (5–8) точности значения допусков на погрешность направления зуба в ISO 1328 больше, чем в ГОСТ 1643-81 или находятся в пределах 4 мкм. В низких степенях точности (9–12) картина иная, в некоторых случаях величины допусков в ISO 1328 больше, чем в ГОСТ 1643-81, в остальных – разница доходит до 96 мкм. Стоит помнить, что в ISO 1328 величины допусков на эту погрешность приведены для значений ширины венца, b , и делительного диаметра, d , а в ГОСТ 1643-81 – для значений ширины венца, b , и модуля зубьев, m .

Выводы

Можно принять нормы стандарта ISO 1328 для высоких степеней точности (3–4 степень) практически во всех диапазонах делительных диаметров и модулей при незначительной разнице (2–3 мкм) между величинами допусков в ISO 1328 и ГОСТ 1643-81. Исключение составляет накопленная погрешность шага зубчатого колеса, F_{pr} , для которой при больших значениях модуля зубьев и делительного диаметра разница допусков в ISO 1328 и ГОСТ 1643-81 составляет в 4-й степени точности 10 мкм.

В грубых степенях точности (9–12 степени) при увеличении делительного диаметра и модуля зубьев ГОСТ 1643-81 дает гораздо меньшие значения допусков по сравнению с ISO 1328. Поэтому можно констатировать, что отечественная промышленность уже сегодня является конкурентоспособной на мировом рынке при производстве зубчатых колес значительных диаметров в грубых степенях точности. Мало того, мы уже сегодня работаем в условиях более жестких допусков на зубчатые колеса указанных параметров. Исключение составляют погрешность направления зуба, $F_{\beta r}$, и отклонения шага, f_{ptr} . У этих погрешностей допуски в низких степенях точности (9–12) в стандарте ГОСТ 1643-81 превышают аналогичные допуски в стандарте ISO 1328.

В средних степенях точности (5–8) в ГОСТ 1643-81 по следующим нормам:

- погрешность шага зубчатого колеса, F_{pr} ;
- радиальное биение, F_{rr} ;
- колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе, f_i'' (для малых значений модуля зубьев, m);
- колебание измерительного расстояния за оборот зубчатого колеса, F_i'' (для малых значений модуля зубьев, m);
- отклонения шага, f_{ptr}

величины допусков на погрешности больше, а нередко и значительно больше, чем в ISO 1328. По нормам

- погрешность направления зуба, F_{β} ;
- колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе, f_i'' (для средних и больших значений модуля зубьев, m);
- колебание измерительного расстояния за оборот зубчатого колеса, F_i'' (для средних и больших значений модуля зубьев, m);
- погрешность профиля зуба, f_f ;

наоборот, допуски на эти погрешности в средних степенях точности (5–8) в ISO 1328 больше, чем в ГОСТ 1643-81, за исключением некоторых случаев, где разница между величинами допусков находится в пределах 3-х мкм.

Принять полностью нормы ISO 1328 мы не можем, потому что отдельные показатели в средних степенях точности (5–8) не будут обеспечены отечественными станками зубообрабатывающего производства, к тому же возникнут сложности и при измерении этих погрешностей.

Кроме того, у нас принято положение, согласно которому установленная степень точности по какому-либо комплексу показателей точности не может быть оспорена при

измерении показателей другого комплекса. Следует заметить, что в научной литературе доказано, что многие из комплексов показателей точности не равнозначны. Особенно четко это показано в отношении норм контакта.

Необходимо создавать новый документ, учитывающий требования стандарта ISO 1328, ввиду того, что базовый стандарт ГОСТ 1643-81 устарел и создавался до выхода рекомендаций ISO 1328 (ISO 1328-1:1995, ISO 1328-2:1997). Новый стандарт, тем не менее, не должен принимать требования ISO 1328 буквально, поскольку принятие рекомендации международного стандарта по всем параметрам фактически вынудит производителей зубчатых колес и передач, использующих отечественное зубообрабатывающее и зубоизмерительное оборудование, прекратить выпуск продукции. Поэтому создание новых, производительных и эффективных средств контроля – задача важная и актуальная, но при всех изменениях принципов построения стандартов параметров точности нельзя игнорировать сегодняшний уровень производства и контроля [5].

Литература

1. ГОСТ 1643-81. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. М., Издательство стандартов, 1989.
2. ISO 1328-1:1995 Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth.
3. ISO 1328-2:1997 Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information.
4. Абрамчук М.В., Тимофеев Б.П. Рекомендации ISO 1328 в части установления параметров точности зубчатых колес и передач. // II межвузовская конференция молодых учёных. Сборник научных трудов. Том 2. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. С. 127–131.
5. Тимофеев Б.П. Назревшие перемены в нормировании точности зубчатых колёс и передач. / Труды шестой сессии международной научной школы. Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем. Часть 2. СПб, 2003. С. 60.

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЭВОЛЬВЕНТНОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ

Г.Б. Заморюев

В работе получены зависимости для определения мгновенного и среднего КПД всех разновидностей эвольвентных цилиндрических зубчатых передач с учетом переменного воздействия сил трения на ведущее и ведомое звено передачи.

Коэффициент полезного действия эвольвентных цилиндрических зубчатых зацеплений рассчитывается обычно по формуле, вывод которой дается Н.И. Колчиным [1].

$$\eta = 1 - 0.5 \pi f \varepsilon_{\alpha} \left(\frac{1}{z_1} \pm \frac{1}{z_2} \right). \quad (1)$$

При выводе этой формулы были использованы некоторые допущения, наиболее существенным из которых, по нашему мнению, является то, что не было учтено влияние силы трения $P_{mp} = f P_n$ на величину самой нормальной силы (реакции) P_n . Это влияние приводит к изменению силы P_n по величине, а сила трения изменяется и по величине, и по направлению. Все эти факторы приводят к колебаниям скорости вращения, не вызываемым никакими внешними причинами, а только трением в передаче. Учет этих особенностей трения зубьев, по нашему мнению, достоин внимания, особенно при рассмотрении динамики зубчатых передач.

Моменты, приложенные к колесам передачи, являются результатом действия двух сил: нормальной силы, действующей по линии зацепления и силы трения, касательной к профилям и нормальной к линии зацепления. Направления сил, приложенных к зубьям в контактной точке, план скоростей и другие данные показаны на рис.1. Запишем выражения для моментов, приложенных к колесам:

$$M_1(u) = P_{n1} r_{b1} + f P_{n1} \text{sign}(\bar{V}_{12}(u)) u, \quad (2)$$

$$M_2(u) = P_{n2} r_{b2} + f P_{n2} \text{sign}(\bar{V}_{12}(u)) (g - u). \quad (3)$$

В (2), (3) u – параметр по длине линии зацепления; $\bar{V}_{12}(u) = \bar{V}_1(u) - \bar{V}_2(u)$ – относительная скорость в контактных точках; $g = a_w \sin(\alpha_w)$ – длина теоретической линии зацепления; $\text{sign}(\bar{V}_{12}(u))$ – функция, возвращающая знак относительной скорости или 0, если последняя равна 0.

Сила трения, приложенная к зубу ведущего колеса 1, направлена против относительной скорости $\bar{V}_{12}(u)$, а приложенная к зубу ведомого, – по направлению $\bar{V}_{12}(u)$. После прохождения контакта через полюс меняется на противоположное направление и $\bar{V}_{12}(u)$, и силы трения так, что соотношение направлений сохраняется. Силы P_{n1} и P_{mp1} создают моменты противоположного знака: P_{n1} – препятствующий вращению, а P_{mp1} – как бы движущий, и суммарный момент $M_1(u)$ является разностью этих двух моментов. Силы P_{n2} и P_{mp2} также создают моменты противоположного знака относительно оси O_2 (рис.1), но в данном случае сила P_{n2} направлена по направлению вращения ведомого колеса, а P_{mp2} – против вращения.

Из выражений (2) и (3) получим выражения для нормальной силы через соответствующие моменты:

$$P_{n1}(u) = \frac{M_1(u)}{r_{b1} + f \text{sign}(\bar{V}_{12}(u)) u}, \quad (4)$$

$$P_{n2}(u) = \frac{M_2(u)}{r_{b2} + f \operatorname{sign}(\bar{V}_{12}(u))(g - u)}. \quad (5)$$

Дальше возможны три пути:

1. Так как силы P_{n1} и P_{n2} равны как действие и реакция, то, приравнявая выражения (4) и (5), получим важное соотношение моментов.

$$\frac{M_2(u)}{M_1(u)} = \frac{r_{b2} + f \operatorname{sign}(\bar{V}_{12}(u))(g - u)}{r_{b1} + f \operatorname{sign}(\bar{V}_{12}(u))u}. \quad (6)$$

Выражение (6), по существу, является передаточной функцией для моментов с учетом трения и может быть использовано для создания динамической модели зубчатой передачи с учетом трения. Дальше для перехода к соотношению мощностей умножим числитель и знаменатель (6) на соответствующие угловые скорости и, обозначая передаточное отношение i_{12} , получим следующее выражение для мгновенного КПД:

$$\eta(u) = \frac{i_{12} r_{b1} + f \operatorname{sign}(\bar{V}_{12}(u))(g - u)}{i_{12} (r_{b1} + f \operatorname{sign}(\bar{V}_{12}(u))u)}. \quad (7)$$

Выражение (7) получено из рассмотрения передачи внешнего зацепления. В передаче внутреннего зацепления знаки в выражении (7) изменяются, и в общем случае эвольвентной цилиндрической передачи выражение для КПД принимает вид

$$\eta(u) = \frac{i_{12} r_{b1} \pm f \operatorname{sign}(\bar{V}_{12}(u))(g \mp u)}{i_{12} (r_{b1} \pm f \operatorname{sign}(\bar{V}_{12}(u))u)}, \quad (8)$$

где верхние знаки относятся к внешнему зацеплению, а нижние – к внутреннему. Естественно, необходимые геометрические параметры внутреннего и внешнего зацепления должны быть найдены корректно.

2. Мгновенную мощность потерь (сил трения) можно выразить через $P_{n1}(u)$ из (4), а подводимую мощность как $N_1(u) = M_1(u)\omega_1$. Тогда, разделив выражение (4) на $N_1(u)$, получим следующее выражение для коэффициента потерь:

$$\psi(u) = \frac{f |\bar{V}_{12}(u)|}{r_{b1} + f \operatorname{sign}(\bar{V}_{12}(u))u}. \quad (9)$$

С учетом различий для внешнего и внутреннего зацепления, выражение для мгновенного КПД принимает вид

$$\eta(u) = 1 - \frac{f |\bar{V}_{12}(u)|}{r_{b1} \pm f \operatorname{sign}(\bar{V}_{12}(u))u}. \quad (10)$$

3. Соответственно, мощность сил трения можно выразить и через $P_{n2}(u)$ из (5), а именно, $N_{mp2}(u) = P_{n2}(u)f |\bar{V}_{12}(u)|$, а мощность движущих сил – как $N_1(u) = M_2(u)\omega_2 + N_{mp2}(u)$. Используя (5) и последние формулы, получим еще одно выражение для КПД:

$$\eta(u) = 1 - \frac{f |\bar{V}_{12}(u)|}{r_{b1} \pm \frac{1}{i_{12}} f \operatorname{sign}(\bar{V}_{12}(u))(g \mp u) + f |\bar{V}_{12}(u)|}. \quad (11)$$

Таким образом, получены три различные формулы (8), (10) и (11) для расчета мгновенного КПД зубчатого зацепления. Числовые расчеты по этим формулам дают абсолютно одинаковые результаты с точностью до любого знака, что говорит об адекватности всех трех формул, хотя свести их одну к другой путем эквивалентных математических преобразований не удастся. Если в выражениях (10) и (11) убрать члены с двойным знаком, то получившиеся таким образом формулы будут давать результат без учета влияния силы трения на величину нормальной силы (т.е. на саму силу трения). Разница с

точным значением будет тем менее, чем меньше коэффициент трения, и при $f \leq 0.1$ результат расчета по упрощенным формулам будет несколько отличаться (в третьем – четвертом знаке), но вполне приемлем для практики. Представим эти упрощенные выражения:

$$\eta(u) = 1 - \frac{f |\bar{V}_{12}(u)|}{r_{b1}}, \quad (12)$$

$$\eta(u) = 1 - \frac{f |\bar{V}_{12}(u)|}{r_{b1} + f |\bar{V}_{12}(u)|}. \quad (13)$$

В выражения (8), (10), (11), (12) и (13) в той или иной форме входит относительная скорость $\bar{V}_{12}(u)$, которую будем находить следующим образом:

$$\bar{V}_{12}(u) = \bar{\omega}_1 \times \bar{r}_1(u) - \bar{\omega}_2 \times \bar{r}_2(u); \quad (14)$$

$$\bar{r}_1(u) = \bar{r}_{b1} + \bar{u}(u); \quad (15)$$

$$\bar{r}_2(u) = \bar{r}_{b2} + \bar{g} + \bar{u}(u) \quad (16)$$

Текущие радиус-векторы контактной точки $\bar{r}_1(u)$ и $\bar{r}_2(u)$, относительная скорость и т.д. показаны на рис. 1.

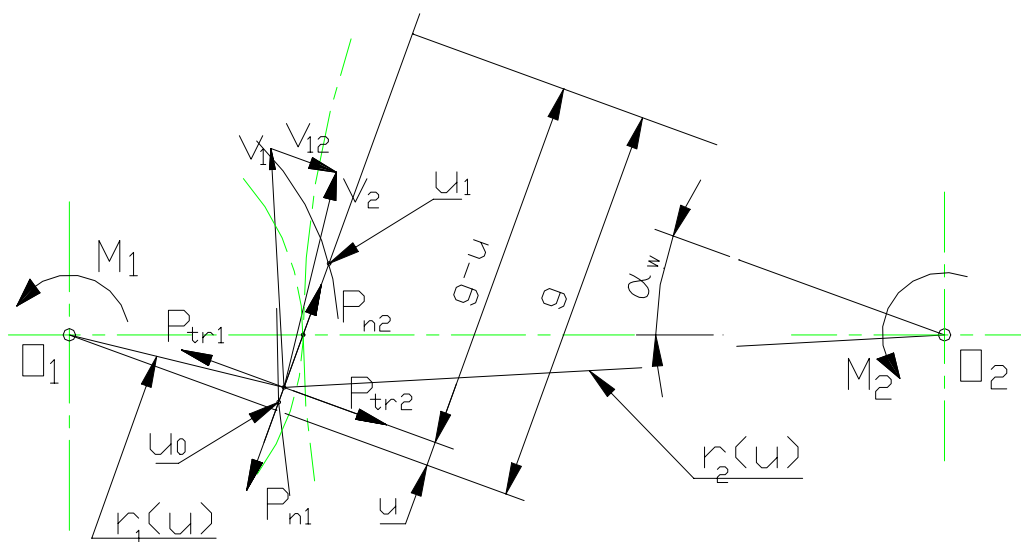


Рис. 1. Основные параметры расчета

Векторы, входящие в выражения (14), (15) и (16):

$$\bar{r}_{b1} = \begin{pmatrix} \pm r_{b1} \cos(\alpha_w) \\ \mp r_{b1} \sin(\alpha_w) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$\bar{r}_{b2} = \begin{pmatrix} -r_{b2} \cos(\alpha_w) \\ r_{b2} \sin(\alpha_w) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (18)$$

$$\bar{g} = \begin{pmatrix} -g \sin(\alpha_w) \\ -g \cos(\alpha_w) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

$$\bar{u}(u) = \begin{pmatrix} \pm u \sin(\alpha_w) \\ \pm u \cos(\alpha_w) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (20)$$

$$\bar{\omega}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (21)$$

$$\bar{\omega}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \mp \frac{1}{i_{12}} \end{pmatrix}, \quad (22)$$

Начальное и конечное значение параметра u в пределах активного участка линии зацепления:

$$u_0 = \pm(g - \sqrt{r_{a2}^2 - r_{b2}^2}), \quad (23)$$

$$u_1 = \sqrt{r_{a1}^2 - r_{b1}^2}. \quad (24)$$

Среднее значение КПД определим из следующего выражения:

$$\eta = \frac{\int_{u_0}^{u_1} \eta(u) du}{u_1 - u_0}. \quad (25)$$

В выражении (25) $\eta(u)$ можно подставлять из выражений (8), (10) или (11) – результат расчета будет абсолютно совпадающим. На рис. 2 показан график величины $\eta(u)$, а также средняя величина КПД, рассчитанная по формуле (25), т.е. та величина, которую и называют коэффициентом полезного действия зубчатой передачи.

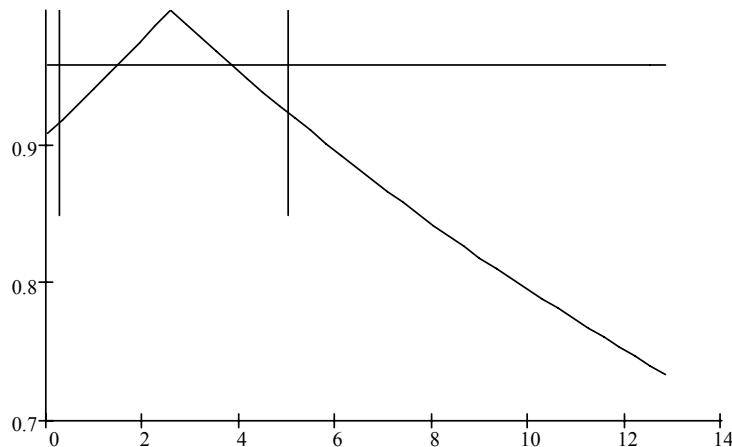


Рис. 2. График величины $\eta(u)$ и средняя величина КПД

В косозубом зацеплении каждая контактная линия соответствует некоторому участку линии зацепления с различными мгновенными условиями трения по длине участка. В пределах одновременного зацепления изменяются скорости скольжения, плечо силы трения и, следовательно, нормальная реакция и сама сила трения. При проходе контактной линии через полюс в пределах этой контактной линии меняется знак относительной скорости, силы трения и момента от трения. Картина усложняется и тем, что на входе и выходе зуба в зацепление контактная линия имеет неполную длину в пределах от нуле-

вой до максимальной. Поэтому для расчета среднего КПД следует разбить всю длину зацепления на n участков и на каждом участке рассчитывать средний КПД участка, а затем определить средний КПД для всех участков, то есть КПД косозубого зацепления. На рис. 3 представлена торцевая картина косозубого зацепления и положенная на плоскость рисунка теоретическая и активная плоскость зацепления с обозначениями, принятыми в тексте.

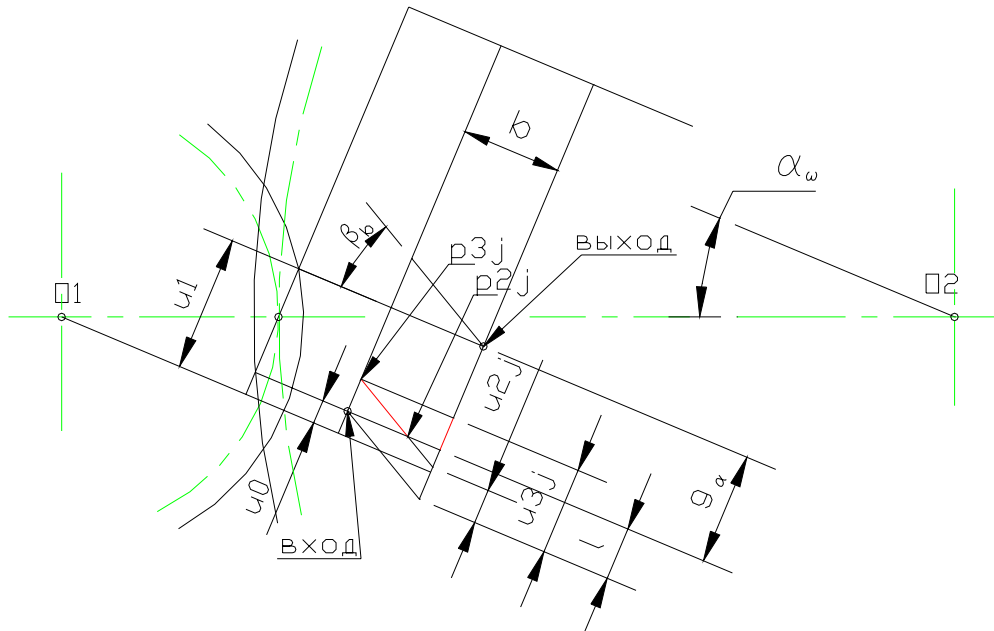


Рис. 3. Торцевая картина косозубого зацепления

Определим максимальную длину контактной линии в проекции ее на торцевую линию зацепления:

$$l = b \operatorname{tg}(\beta) \cos \left(\arctg \left(\frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\cos(\beta)} \right) \right). \quad (26)$$

В выражении (26) b – ширина зубчатого венца косозубого колеса; β – угол наклона зубьев на делительном цилиндре.

Предположим, что число участков равно n (пусть $n=50$). Введем целую переменную $j = 0 \dots n$ для осуществления цикловых расчетов. Тогда длина каждого участка линии зацепления равна

$$\Delta u = \frac{u_1 - u_0 + l}{n}. \quad (27)$$

Текущее начало и конец каждого участка обозначим u_{2j} и u_{3j} :

$$u_{2j} = u_0 + \Delta u j - l, \quad (28)$$

$$u_{3j} = u_{2j} + l. \quad (29)$$

Чтобы учесть неполную длину контактной линии на входе и выходе зуба из зацепления, введем для текущего начала и конца участка линии зацепления, соответствующего реальной контактной линии, обозначения p_{2j} и p_{3j} :

$$p_{2j} = (u_{2j} < u_0) u_0 + (u_{2j} \geq u_0) u_{2j}, \quad (30)$$

$$p_{3j} = (u_{3j} > u_1) u_1 + (u_{3j} \leq u_1) u_{3j}. \quad (31)$$

С учетом представленных зависимостей (26)–(31) и формул (8), (10) или (11) средний КПД косозубой передачи определится следующим выражением

$$\eta = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} \frac{\int_{p_{2j}}^{p_{3j}} \eta(u) du}{p_{3j} - p_{2j}}}{n-1}. \quad (32)$$

Все представленные выше выражения, методики расчетов и алгоритмы проверены числовыми расчетами в среде MathCAD. Приводимые формулы максимально соответствуют их написанию на MathCAD'е. Расчеты производились для следующих параметров передачи: $z_1 = 15$, $z_2 = 60$, $m_n = 1$. Для устранения подрезания 1-го колеса применено смещение: $x_1 = 0.14$, $x_2 = -0.14$. Для расчета косозубого зацепления к имеющимся параметрам добавлено: $\beta = 30^\circ$, $x_1 = 0$, $x_2 = 0$. Проверялось и внутреннее зацепление, параметров которого не приводим. В таблицах приведены некоторые результаты расчетов только по формулам (8), (10) или (11).

Прямая передача	$f=0.1$	$f=0.2$
Прямозубая	0.979479	0.959797
Косозубая	0.979090	0.958660

Обратная (ускоряющая) передача	$f=0.1$	$f=0.2$
Прямозубая	0.979068	0.958119
Косозубая	0.978970	0.958140

Приведем некоторые выводы.

- Упрощенные формулы (1), (12) и (13) «не чувствуют» направление передачи – редуктор или мультипликатор. Точные формулы (8), (10) и (11) фиксируют разницу: КПД понижающей передачи всегда выше.
- Косозубая передача, как правило, имеет КПД несколько ниже, чем прямозубая.
- Чем ниже коэффициент трения f , тем ближе результаты, даваемые точными и приближенными методиками. Для практических расчетов КПД с точностью до 1% пригодны любые из приведенных методик, начиная с формулы (1), но ближе всего к точному результату (при понижающей передаче) приводит формула (13).
- КПД внутреннего зацепления при прочих аналогичных параметрах выше, чем внешнего.
- Зависимость (6) является основанием для построения динамической модели автоколебаний в зубчатой передаче, вызываемых действием сил трения.

Литература

1. Колчин Н.И. Механика машин. Т.2. Л.: Машиностроение, 1972.

НАШИ АВТОРЫ

Абрамчук Михаил Владимирович – ассистент кафедры мехатроники

Алексеев Сергей Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры твердотельной оптоэлектроники

Афанасьев Василий Петрович – студент кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Бахвалов Алексей Сергеевич – аспирант Института аналитического приборостроения РАН

Бердюгин Андрей Викторович – аспирант кафедры мехатроники

Бехтерев Виктор Николаевич – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского центра курортологии и реабилитации, г.Сочи

Бирюлин Гавриил Владимирович – студент кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Божевольнов Владислав Борисович – кандидат физико-математических наук, доцент, Научно-исследовательский институт физики СПбГУ им. В.А.Фока

Веселовский Андрей Борисович – кандидат технических наук, заместитель начальника отделения ЛФТМ кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Волгузова Анна Владимировна – студентка факультета оптико-информационных систем и технологий

Воронцов Евгений Александрович – аспирант кафедры мехатроники

Гладских Дмитрий Аркадьевич – студент кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Горский Владимир Александрович – аспирант СПбГТИ

Гортинская Лидия Вячеславовна – аспирантка кафедры высшей математики

Грязин Дмитрий Геннадиевич – доктор технических наук, профессор кафедры мехатроники

Дейнека Геннадий Борисович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и техники оптической связи

Дмитриев Александр Леонидович – профессор кафедры твердотельной оптоэлектроники

Евдокимов Алексей Алексеевич – инженер ООО «Мониторинг»

Евстропьева Галина Израилевна – доцент СПбГТИ(ТУ)

Егоров Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной теплофизики и энергомониторинга

Ерофеева Мария Сергеевна – аспирантка кафедры твердотельной оптоэлектроники

Загоруйко Елена Игоревна – ассистент кафедры физики

Заморуев Георгий Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры мехатроники

Заричняк Юрий Петрович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Зеленская Марианна Григорьевна – студентка кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Золотарев Владимир Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры компьютерной фотоники

Зубкова Марина Юрьевна – доцент СПбГТИ(ТУ)

Иванов Александр Данилович – кандидат технических наук, доцент кафедры измерительных технологий и компьютерной томографии

Иванов Сергей Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики

Иванова Татьяна Юрьевна – начальник КБ ФГУП НПО «Аврора»,

Ильин Алексей Александрович – инженер ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Качер Екатерина Борисовна – аспирант кафедры физики и техники оптической связи

Кижа Денис Анатольевич – студент кафедры твердотельной оптоэлектроники

Кириллов Кирилл Валерьевич – студент кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Кириченко Андрей Игоревич – инженер, соискатель кафедры мехатроники

Кирьянова Вера Васильевна – доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой физиотерапии МАПО

Китаев Юрий Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники

Кораблев Владимир Антонович – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной теплофизики и энергомониторинга

Коротков Павел Алексеевич – аспирант кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Костилян Татьяна Суменовна – главный специалист ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Кремнёв Дмитрий Валерьевич – аспирант СПбГТИ(ТУ)

Кривошеев Александр Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики

Кузьмин Владимир Николаевич – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по оптике и фотометрии ООО НТП «ТКА»

Курчин Иван Валентинович – инженер ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Лазуренко Наталья Владимировна – аспирантка кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Лебедев Павел Вадимович – инженер-программист «JetSystems»

Левин Сергей Борисович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Стокгольмского университета, Стокгольм, Швеция

Липатов Павел Алексеевич – студент кафедры систем управления и информатики

Лукин Сергей Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры твердотельной оптоэлектроники

Лукина Вера Александровна – аспирантка

Лукомский Николай Георгиевич – старший научный сотрудник ЗАО «ОПТЭК»

Лукьянов Геннадий Николаевич – доктор технических наук, доцент кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Макаров Дмитрий Сергеевич – ассистент кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Малина Наталья Александровна – студентка кафедры высшей математики

Мальгинов Андрей Вениаминович – старший научный сотрудник ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Матвеев Александр Леонидович – инженер ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Матузенко Михаил Юрьевич – доцент СПбГТИ(ТУ)

Мельников Виталий Геннадьевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики

Мельников Геннадий Иванович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной механики

Миронов Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент

Митрофанов Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, профессор кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Мищенко Галина Алексеевна – аспирант СПбГТИ(ТУ)

Зарембо Яна Викторовна – студент СПбГТИ(ТУ)

Млокосевич Станислав Юрьевич – аспирант кафедры мехатроники

Мурашкин Андрей Юрьевич – руководитель сектора высокоточной измерительной аппаратуры ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Мусалимов Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры мехатроники

Назаров Вячеслав Валерьевич – научный сотрудник кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Нелепец Андрей Викторович – студент кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Нечаев Александр Алексеевич – инженер ООО «Мониторинг»

Никущенко Евгений Михайлович – заведующий лабораторией кафедры твердотельной оптоэлектроники

Павлова Наталья Витальевна – студентка кафедры твердотельной оптоэлектроники

Пасяда Александр Васильевич – аспирант кафедры твердотельной оптоэлектроники

Перепелкин Анатолий Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского институт физики СПбГУ им. В.А.Фока

Петрищев Максим Сергеевич – аспирант кафедры мехатроники

Пилипенко Николай Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Платунова Лидия Сергеевна – студентка кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Попов Игорь Юрьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики

Попов Юрий Юрьевич – аспирант кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Приходько Олег Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры материаловедения

Прокопенко Виктор Трофимович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой твердотельной оптоэлектроники

Рассади́на Анна Александровна – аспирант кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Савинцева Людмила Алексеевна – старший научный сотрудник кафедры компьютерной теплофизики и энергомониторинга

Самохина Ирина Александровна – кандидат физико-математических наук, зам. начальника отдела ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»

Сачков Дмитрий Юрьевич – студент кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Сиротинкин Николай Васильевич – доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой СКНЭОС СПбГТИ

Слободов Александр Арсеньевич – доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой физической химии СПбГТИ

Соколов Тимофей Борисович – младший научный сотрудник ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Степанов Александр Николаевич – аспирант кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Тарлыков Алексей Владимирович – программист ОИЦ

Тарлыков Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Тесовская Екатерина Станиславовна – ассистент кафедры высшей математики

Тимофеев Борис Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры мехатроники

Томский Константин Абрамович – доктор технических наук, доцент, генеральный директор ООО НТП «ТКА»

Трофимов Владимир Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры твердотельной оптоэлектроники

Трушков Кирилл Васильевич – аспирант кафедры компьютерной теплофизики и энергомониторинга

Тупик Александра Николаевна – студентка кафедры материаловедения

Успенская Майя Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры физики и техники оптической связи

Фефилов Георгий Дмитриевич – научный сотрудник кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Фролов Дмитрий Александрович – аспирант кафедры мехатроники

Хлопонин Леонид Викторович – старший научный сотрудник кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Храмов Валерий Юрьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой квантовой электроники и биомедицинской оптики

Чан Нгок Чау – аспирант кафедры мехатроники

Челибанов Владимир Петрович – кандидат химических наук, генеральный директор ЗАО «ОПТЭК»

Шарков Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерной теплофизики и энергомониторинга

Шевченко Ольга Юрьевна – старший преподаватель кафедры физики

Яфясов Адиль Маликович – доктор физико-математических наук, профессор, Научно-исследовательский институт физики СПбГУ им. В.А.Фока

СОДЕРЖАНИЕ

1. Математика	3
Левин С.Б., Попов И.Ю., Тесовская Е.С. Функция Грина двухчастичной задачи в волноводе	3.
Гортинская Л.В., Левин С.Б., Попов И.Ю. Квантовый слой с двумя электронами: функция Грина.....	7
Малина Н.А. Электрон в квантовом волноводе с поперечным электрическим полем	10
2. Нелинейные колебания и параметрическая идентификация механических систем	14
Иванов С.Е., Мельников Г.И. Разработка алгоритмов метода многочленных преобразований теории нелинейных систем в среде Matlab	14
Кривошеев А.Г. Критерии устойчивости резонансных колебаний нелинейной механической системы	18
Иванов С.Е., Мельников В.Г. Применение матричной формы уравнений Лагранжа в компьютерном моделировании	22
3. Физика	25
Шевченко О.Ю., Божевольнов В.Б., Яфясов А.М., Перепелкин А.Д. Анализ зависимости дифференциальной емкости области пространственного заряда бесщелевого полупроводника от поверхностного потенциала при комнатных температурах.....	25
Загоруйко Е.И. Процессы кислородного обмена и фазообразование в Вi-содержащей керамике	30
4. Квантовая электроника и биомедицинская оптика.....	33
Степанов А.Н. О путях уменьшения термооптических искажений в твердотельных лазерах с продольной полупроводниковой накачкой.....	33
Коротков П.А., Сачков Д.Ю. О касательных лучевых инвариантах оптических систем.	
Назаров В.В., Хлопонин Л.В., Храмов В.Ю. Исследование яркостных характеристик ПГС при вне- и внутрирезонаторной генерации.....	43
Веселовский А.Б., Кирьянова В.В., Митрофанов А.С., Фефилов Г.Д. Анализ эффективности применения лазерно-светодиодного аппарата «Спектр ЛЦ-02» в лечении ряда заболеваний	48
Фефилов Г.Д. Оценка погрешности определения моментов экстремума в дифракционной картине Эйри при воздействии аддитивной помехи	55
Нелепец А.В., Тарлыков А.В., Тарлыков В.А. Исследование дифракционного поля, формируемого совокупностью идентичных источников тороидальных волн ..	59
5. Энергомониторинг и энергосбережение	66
Лебедев П.В., Кирилов К.В. Программный комплекс для нестационарной теплометрии с использованием расширенного фильтра Калмана	66
Лазуренко Н.В., Пилипенко Н.В. Методика определения сопротивления теплопередачи ограждающих конструкций различного назначения.....	73
Афанасьев В.П., Пилипенко Н.В. Уточнение теплофизических свойств материалов в процессе параметрической идентификации	78

Зеленская М.Г., Пилипенко Н.В. Методика восстановления нестационарного теплового потока и коэффициентов теплоотдачи с помощью датчика Гардона	81
Пилипенко Н.В., Гладских Д.А. Астатические датчики для определения нестационарных условий теплообмена	87
6. Проблемы переноса энергии, массы, импульса и информации.....	91
Кораблев В.А., Макаров Д.С. Устройство термостатирования проб газа в газоанализаторе	91
Кораблев В.А., Макаров Д.С. Электронный манометр для исследования теплогидравлических процессов при пониженных давлениях.....	94
Заричняк Ю.П., Платунова Л.С. Метод измерения теплопроводности анизотропных материалов	97
Егоров В.И., Иванова Т.Ю., Кораблев В.А., Шарков А.В. Выбор параметров системы обеспечения теплового режима пульта управления с учетом эргономических требований	100
Егоров В.И., Попов Ю.Ю., Самохина И.А., Шарков А.В. Влияние локальных неоднородностей грунта на температурное поле его поверхности.....	104
Егоров В.И., Трушков К.В., Шарков А.В. Расчет блоков питания судовой аппаратуры	108
Бирюлин Г.В., Егоров В.И., Попов Ю.Ю., Савинцева Л.А. Тепловой режим микросборок.....	115
Лукьянов Г.Н., Рассадина А.А. Выявление основных закономерностей хаотических процессов при дыхании	118
7. Материалы, компоненты и методы исследования функциональных устройств для волоконно-оптических систем передачи.....	122
Успенская М.В., Сиротинин Н.В., Горский В.А. Абсорбционные характеристики акрилатных композиций с двойным наполнением	122
Дейнека Г.Б. Динамическая модель разрыва химической связи при столкновении молекулярного иона водорода с протоном	126
Слободов А.А., Качер Е.Б., Мищенко А.В., Кремнев Д.В., Зубкова М.Ю. Термодинамический метод исследования и оптимизации процесса синтеза изделий на основе керамики	128
Слободов А.А., Кремнев Д.В., Качер Е.Б., Евстропьева Г.И., Мищенко А.В., Зарембо Я.В., Матузенко М.Ю. Создание и методы работы с базой термодинамических свойств веществ	134
Миронов С.А. Стенд для исследования распространения оптического излучения в планарных интегрально-оптических волноводах	140
8. Информационно-измерительные приборы и системы	144
Алексеев С.А., Пасяда А.В. Поляризационный метод распознавания трехмерных образов.....	144
Никущенко Е.М., Дмитриев А.Л. Оптоэлектронный ключ для бесконтактного дистанционного управления генератором ультразвука	151
Лукин С.Б., Кижя Д.А. Фотолюминесцентные методы контроля качества кофе	154
Павлова Н.В., Прокопенко В.Т., Трофимов В.А. Исследование поляризации света, отраженного лакокрасочными покрытиями	157
Ерофеева М.С., Дмитриев А.Л. Поляризационные искажения, вносимые микрообъективом при возбуждении волоконного световода.....	162

9. Силовая электроника	167
Китаев Ю.В. Инструментальный загрузчик для УМК SDK1.1 с графическим интерфейсом	167
Китаев Ю.В. Дистанционное Интернет-управление лабораторным стендом для снятия вольтамперных характеристик диодов	170
10. Экологическое приборостроение и мониторинг	172
Соколов Т.Б., Матвеев А.Л. Мультисенсор для контроля аварийных выбросов вредных веществ в атмосферу	172
Евдокимов А.А., Мурашкин А.Ю., Ваньчков С.А. Электронный мыльно-пленочный измеритель малых расходов газа	176
Костилян Т.С., Ильин А.А. Метод определения времени защитного действия противогазовых фильтров в соответствии с ГОСТ Р 12.4.192-99 и ГОСТ Р 12.4.193-99	180
Костилян Т.С., Курчин И.В.. Альтернативный метод определения коэффициента подсоса под лицевые части средств индивидуальной защиты из изолирующих материалов при использовании ИК Фурье-спектрометра и гексафторида серы в качестве тест-вещества	185
Мальгинов А.В., Нечаев А.А. Точные измерения малых расходов газовых потоков	189
Волгузова А.В., Лукомский Н.Г., Челибанов В.П. Оптимизация оптического модуля флуоресцентного анализатора диоксида серы	196
Кузьмин В.Н. Приборное и методическое обеспечение измерений спектральных и спектрально-характеристик источников оптического излучения	199
Томский К.А. Аппаратурные комплексы «ТКА» и их методическое обеспечение для преподавания основ фотометрии в вузах	203
11. Физика и физическое материаловедение	206
Приходько О.А, Тупик А.Н. Виртуальный лабораторный практикум в курсе «Материаловедение»	206
Бахвалов А.С, Лукина В.А. Рентгенофлуоресцентный приборно-аналитический комплекс для промышленного применения	210
Бехтерев В.Н., Золотарев В.М. Разработка метода парофазной экстракции для ИК-спектрофотометрического анализа многокомпонентных водных растворов органических веществ	215
12. Прецизионные устройства мехатроники	222
Воронцов Е.А., Иванов А.Д., Липатов П.А. Естественное восприятие зрительных образов и его реализация техническими средствами тахеометра	222
Мусалимов В.М., Петрищев М.С., Чан Нгок Чау. Динамические эффекты нелинейных маятников и их учет при проектировании чувствительных элементов мехатронных систем	227
Грязин Д.Г., Бердюгин А.В. Волномерные буи в ряду современной волномерной аппаратуры	233
Грязин Д.Г. Опыт разработки и использования в учебном процессе электронного учебника «Основы проектирования приборов и систем»	241
Тимофеев Б.П., Фролов Д.А. Новый универсальный метод и средство измерения положения исходного контура при нарезании цилиндрических зубчатых колес	244
Тимофеев Б.П., Млокосевич С.Ю. Методы измерения некруглости	249

Тимофеев Б.П., Кириченко А.И. Влияние распределения нагрузки по длине контактных линий на величину максимального напряжения.....	255
Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В. Анализ конкурентоспособности отечественного редукторостроения в части точности зубчатых колёс и передач	259
Заморуев Г.Б. Коэффициент полезного действия цилиндрической эвольвентной зубчатой передачи	267
НАШИ АВТОРЫ.....	273

Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Выпуск 31.
Исследования и разработки в области физики и приборостроения /
Главный редактор д.т.н., проф. В.Н. Васильев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006.
280 с.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК СПбГУ ИТМО **Выпуск 31**

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Главный редактор
доктор технических наук, профессор
В.Н. Васильев
Дизайн обложки В.А. Петров, А.А. Колокольников
Редакционно-издательский отдел СПбГУ ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99.
Подписано в печать 10.05.06.
Заказ 955. Тираж 100 экз.