

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"

Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси»

№ 49(1221)2016

Збірник наукових праць

Видання засноване в 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2016

Вісник Національного технічного університету «ХПІ».Збірник наукових праць. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х.: НТУ „ХПІ” – 2016р. – No49(1221) – 126 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ No5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015р.

Координаційна рада:

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.; Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А. І. Грабчєнко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.; М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Дьомін Д. О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;

Заст. відповідального редактора: Акімов О. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків,

Відповідальний секретар: Костик В. О., канд. техн. наук, НТУ «ХПІ»;

Члени редколегії: Березуцький В. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Дмитрік В. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Дудніков А. А., канд. техн. наук, ПДАА, Полтава, Заблоцький В. К., д-р техн. наук, ДДМА, Краматорськ, Заміховський Л. М., д-р техн. наук, ІФТУНГ, Івано-Франківськ, Євстратов В. О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Харків, Погрібний М. А., проф., НТУ «ХПІ», Харків, Пономаренко О. І., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Харків, Соболев О. В., д-р фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Шоман О.В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Jozef Voynarovsky, проф., Сілезького політехнічного інституту, Польща, Rab Nawaz Lodhi, проф. Bahria University Islamabad Pakistan, Пакистан, Меркер Е. Е., д-р техн. наук, проф., Старооскольський технологічний інститут – філія Національного дослідницького технологічного інституту «Московський інститут сталі і сплавів», Росія

*У 2015 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)***

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ „ХПІ”

Протокол № 10 від «23» грудня 2016 р.

УДК 539.3

Н. С. ГАСАНОВА

АНАЛИЗ ЗАДАЧИ КРУЧЕНИЯ ДЛЯ РАДИАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОГО СФЕРИЧЕСКОГО ПОЯСА С ЗАКРЕПЛЕННОЙ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Методом однородных решений исследуется задача кручения радиально-неоднородного изотропного сферического пояса. Предполагается, что лицевая поверхность пояса закреплена, а на торцах заданы граничные условия, оставляющие пояса в равновесии. Рассмотрены несколько частных случаев зависимости упругих характеристик от радиуса (линейная зависимость, квадратичная зависимость). Построены однородные решения. Исследовано поведение решения при стремлении параметра тонкостенности к нулю. На основе проведенного асимптотического анализа разъяснен характер напряженно-деформированного состояния. Для перемещений и напряжения получены простые асимптотические формулы.

Ключевые слова: метод однородных решений, пограничный слой, характеристическое уравнение, асимптотическое решение, симметричный оператор.

Методом однорідних рішень досліджується задача крутіння радіально неоднорідного ізотропного сферичного поясу. Передбачається, що лицева поверхня пояса закріплена, а на торцях задані граничні умови, що залишають пояса в рівновазі. Розглянуто кілька окремих випадків залежності пружних характеристик від радіуса (лінійна залежність, квадратична залежність). Побудовано однорідні рішення. Досліджено поведінку рішення при прагненні параметра тонкостінних до нуля. На основі проведеного асимптотичного аналізу роз'яснено характер напружено-деформованого стану. Для переміщень і напруги отримані прості асимптотичні формули.

Ключові слова: метод однорідних рішень, прикордонний шар, характеристичне рівняння, асимптотичне рішення, симетричний оператор.

The method of homogeneous solutions investigate the problem of torsion radial inhomogeneous isotropic spherical zone. It is assumed that the front surface of the belt is secured, and the ends are given boundary conditions, leaving the belt at equilibrium. Let us consider some special cases, depending on the radius of the elastic characteristics (linear relationship, the quadratic dependence). Built homogeneous solutions. We studied the behavior of the solution as the parameter of thin-walled to zero. On the basis of asymptotic analysis clarifies the nature of the stress-strain state. simple asymptotic formula obtained for the displacements and stresses.

Keywords: method of homogeneous solutions, boundary layer, the characteristic equation, asymptotic solution, a symmetric operator.

Введение. В теории оболочек важное место занимают исследования неоднородных тонкостенных конструкций. Разнообразие неоднородных конструкций и сложность явлений, возникающих при деформации неоднородных оболочек породило ряд прикладных теорий. Области применимости прикладных теорий неоднородных оболочек мало изучены. Существование различных прикладных теорий для неоднородных оболочек требует их критического анализа на основе трехмерных уравнений теории упругости. А также актуальным является анализ неоднородных оболочек с позиций трехмерной теории упругости для создания новых уточненных прикладных теорий.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу кручения радиально – неоднородного изотропного сферического пояса. Обозначим через $\Gamma = \{r \in [r_1; r_2], \theta \in [\theta_1; \theta_2], \phi \in [0; 2\pi]\}$ область, занятой поясом в сферической системе координат. Сферические части границы пояса $r = r_s$ ($s = 1; 2$) будем называть лицевыми поверхностями, а конические срезы $\theta = \theta_s$ ($s = 1; 2$) назовем торцами. Будем считать, что $G = G(r)$ - модуль сдвига произвольных положительных непрерывных функций переменной r .

Уравнения равновесия при отсутствии массовых сил в сферической системе координат r, θ, ϕ имеют вид [1]:

$$\frac{\partial \sigma_{r\phi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\phi\theta}}{\partial \theta} + \frac{3\sigma_{r\phi} + 2\sigma_{\phi\theta} \operatorname{ctg} \theta}{r} = 0, \quad (1)$$

где $\sigma_{r\phi}, \sigma_{\phi\theta}$ – компоненты тензора напряжений, которые выражаются через компоненты вектора перемещений следующим образом [1]:

$$\sigma_{r\phi} = G \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial r} - \frac{u_\phi}{r} \right); \quad \sigma_{\phi\theta} = \frac{G}{r} \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial \theta} - u_\phi \operatorname{ctg} \theta \right). \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получаем уравнение равновесия в перемещениях:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[G \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial r} - \frac{u_\phi}{r} \right) \right] + \frac{3G(r)}{r} \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial r} - \frac{u_\phi}{r} \right) + \frac{G}{r^2} \left(\frac{\partial^2 u_\phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial u_\phi}{\partial \theta} \operatorname{ctg} \theta - \frac{\cos 2\theta}{\sin^2 \theta} u_\phi \right) = 0. \quad (3)$$

Здесь $u_\phi = u_\phi(r, \theta)$ – компоненты вектора смещения.

Предположим, что лицевые поверхности пояса закреплены, т.е.

$$u_\phi = 0 \quad \text{при } r = r_s, \quad (4)$$

а на конических поверхностях (торцах) выполняются следующие граничные условия

$$\sigma_{\phi\theta} = \frac{G(r)}{r} \left(\frac{\partial u_\phi}{\partial \theta} - u_\phi \operatorname{ctg} \theta \right) = f_s(r) \quad \text{при } \theta = \theta_s, \quad (5)$$

где $f_s(r)$ ($s=1,2$) – достаточно гладкие функции, удовлетворяющие условиям равновесия.

$$m''(\theta) + \operatorname{ctg}\theta \cdot m'(\theta) + \left(z^2 - \frac{1}{4} - \frac{1}{\sin^2\theta}\right)m(\theta) = 0. \quad (7)$$

Решение задачи. Решение (3) будем искать в виде

$$u_\phi(r, \theta) = v(r) \cdot m(\theta), \quad (6)$$

После подстановки (6) в (3), (4) с учетом (7), имеем

где $m(\theta)$ – решение уравнения Лежандра [2]:

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) \right]' + \frac{3G(r)}{r} \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) + \frac{G(r)}{r^2} \left(\frac{9}{4} - z^2 \right) v(r) = 0, \quad (8) \\ & v(r)|_{r=r_s} = 0. \quad (9) \end{aligned} \right.$$

(8), (9) представим в следующем виде:

$$Av = \lambda v, \quad (10)$$

где

$$Av = \left\{ -\frac{r^2}{G(r)} \left[G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) \right]' - 3r \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) \right\}; v(r) = 0 \text{ при } r = r_s;$$

$$\lambda = \frac{9}{4} - z^2.$$

Введем гильбертово пространство $L_2(r_1, r_2)$ со скалярным произведением

$$(v, w) = \int_{r_1}^{r_2} G(r) v(r) w(r) dr.$$

Лемма: Оператор $A: H \rightarrow H$ – положителен.

Доказательство: Для $\forall u(\rho), v(\rho) \in D_A$ имеем

$$\begin{aligned} (Au, v) - (u, Av) &= \int_{r_1}^{r_2} G(r) Au \cdot v(r) dr - \int_{r_1}^{r_2} G(r) u(r) Av dr = \\ &= \int_{r_1}^{r_2} \left\{ r^2 \left[G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) \right]' u(r) - r^2 \left[G(r) \left(u'(r) - \frac{u(r)}{r} \right) \right]' v(r) + 3rG(r)(u(r)v'(r) - u'(r)v(r)) \right\} dr = \\ &= \int_{r_1}^{r_2} r^2 u(r) d \left(G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) \right) - \int_{r_1}^{r_2} r^2 v(r) d \left(G(r) \left(u'(r) - \frac{u(r)}{r} \right) \right) + 3 \int_{r_1}^{r_2} rG(r)(u(r)v'(r) - u'(r)v(r)) dr = \\ &= G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) r^2 u(r) \Big|_{r_1}^{r_2} - \int_{r_1}^{r_2} G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) d(r^2 \cdot u(r)) - G(r) \left(u'(r) - \frac{u(r)}{r} \right) r^2 v(r) \Big|_{r_1}^{r_2} + \\ &+ \int_{r_1}^{r_2} G(r) \left(u'(r) - \frac{u(r)}{r} \right) d(r^2 \cdot v(r)) + 3 \int_{r_1}^{r_2} rG(r)(u(r)v'(r) - u'(r)v(r)) dr = \\ &= \int_{r_1}^{r_2} G(r) \left(u'(r) - \frac{u(r)}{r} \right) \cdot (2rv(r) + r^2 \cdot v'(r)) dr - \int_{r_1}^{r_2} G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) (2ru(r) + r^2 \cdot u'(r)) dr + \\ &+ 3 \int_{r_1}^{r_2} rG(r)(u(r)v'(r) - u'(r)v(r)) dr = \int_{r_1}^{r_2} G(r) (3ru'(r) \cdot v(r) - 3ru(r)v'(r)) dr + \\ &+ \int_{r_1}^{r_2} G(r) (3ru(r) \cdot v'(r) - 3rv(r)u'(r)) dr = 0 \end{aligned}$$

т. е. $(Au, v) = (u, Av)$ и оператор A симметричен.

Далее

$$\begin{aligned}
(Av, v)_H &= \int_{r_1}^{r_2} G(r) Av \cdot v dr = \int_{r_1}^{r_2} G(r) \left\{ -\frac{r^2}{G(r)} \left[G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) \right]' - 3r \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) \right\} v(r) dr = \\
&= -\int_{r_1}^{r_2} r^2 v(r) \left[G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) \right]' dr - \int_{r_1}^{r_2} 3r G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) v(r) dr = \\
&= -r^2 v(r) G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) \Big|_{r_1}^{r_2} + \int_{r_1}^{r_2} G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) (r^2 v(r))' dr - \int_{r_1}^{r_2} 3r G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) v(r) dr = \\
&= \int_{r_1}^{r_2} G(r) \left[v^2(r) - 2rv(r)v'(r) + (rv'(r))^2 \right] dr = \int_{r_1}^{r_2} G(r) (rv'(r) - v(r))^2 dr = \\
&= \int_{r_1}^{r_2} G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right)^2 r^2 dr \geq 0.
\end{aligned}$$

Допустим $(Av, v)_H = 0$. Это означает, что

$$\int_{r_1}^{r_2} G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right)^2 r^2 dr = 0.$$

Подинтегральная функция неотрицательна, а из обращения в нуль интеграла, имеем

$$G(r) \left(v'(r) - \frac{v(r)}{r} \right) r^2 = 0,$$

т. е.

$$v'(r) - \frac{v(r)}{r} = 0$$

Следовательно,

$$v(r) = Cr.$$

В силу краевых условий (9), получаем, что $v(r) = 0$.

Равенство $(Av, v) = 0$ выполняется только при $v = 0$. Таким образом, оператор A положителен.

Собственные значения λ_k оператора A положительны и $\lambda_k \rightarrow \infty$ при $k \rightarrow \infty$. Множество собственных функций $\{v_k(r)\} (k = \overline{0; \infty})$ образует ортогональный базис в пространстве H [3]. Отметим, что

$$(v_k, v_l)_H = d_k \cdot \delta_{kl} \quad (11)$$

где

$$d_k = (v_k, v_k) = \int_{r_1}^{r_2} G(r) \cdot v_k^2(r) dr$$

и для всех $v(r) \in H$ справедливо представление

$$v(r) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k v_k(r), \quad c_k = \frac{(v, v_k)_H}{d_k}.$$

Рассмотрим несколько частных случаев зависимости упругих характеристик от r [4–7].

Линейная зависимость. Допустим модуль сдвига заданы в виде:

$$G(r) = G_0 \cdot r, \quad (12)$$

где G_0 – постоянная.

С учетом (12) из (8), (9) имеем:

$$\left\{ \begin{aligned} r^2 v''(r) + 3rv'(r) - \left(\frac{3}{4} + z^2 \right) v(r) &= 0, \\ v(r) &= 0 \quad \text{при} \quad r = r_s; \quad (s = 1, 2). \end{aligned} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{aligned} v(r) &= 0 \quad \text{при} \quad r = r_s; \quad (s = 1, 2). \end{aligned} \right. \quad (14)$$

Общее решение (13) имеет вид:

$$v(r) = C_1 r^{-1-a} + C_2 r^{-1+a}. \quad (15)$$

где C_1, C_2 – произвольные постоянные;

$$a = \sqrt{z^2 + \frac{7}{4}}.$$

С помощью (15) удовлетворяя граничным условиям (14), получаем однородную линейную систему относительно C_1, C_2 . Из условия существования нетривиальных решений этой системы имеем характеристическое уравнение:

$$sh \left(2\varepsilon \sqrt{z^2 + \frac{7}{4}} \right) = 0. \quad (16)$$

где $\varepsilon = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$ – малый параметр, характеризующий толщину оболочки.

Уравнение (16) имеет счетное множество корней

$$z_n^{\pm} = \pm i \sqrt{\frac{7}{4} + \frac{\pi^2 n^2}{4\varepsilon^2}}, \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (17)$$

Перемещения и напряжения, соответствующие корням (17), имеют вид:

$$u_\phi(r, \theta) = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{r} \sin\left(\frac{\pi n}{2\varepsilon} \ln\left(\frac{r_2}{r}\right)\right) \cdot m_n(\theta),$$

$$\sigma_{r\phi} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_0}{r} \left[\frac{\pi n}{2\varepsilon} \cos\left(\frac{\pi n}{2\varepsilon} \ln\left(\frac{r_2}{r}\right)\right) - 2 \sin\left(\frac{\pi n}{2\varepsilon} \ln\left(\frac{r_2}{r}\right)\right) \right] \cdot m_n(\theta),$$

$$\sigma_{\theta\phi} = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_0}{r} \sin\left(\frac{\pi n}{2\varepsilon} \ln\left(\frac{r_2}{r}\right)\right) (m'_n(\theta) - m_n(\theta) \operatorname{ctg}\theta).$$

Квадратичная зависимость.

Допустим модуль сдвига задан в виде:

$$G(r) = G_0 r^2. \tag{18}$$

С учетом (18) из (8), (9), имеем:

$$\left\{ \begin{aligned} r^2 v''(r) + 4r v'(r) - \left(\frac{7}{4} + z^2\right) v(r) &= 0, \end{aligned} \right. \tag{19}$$

$$\left\{ \begin{aligned} v(r) &= 0 \quad \text{при} \quad r = r_s; \quad (s = 1, 2). \end{aligned} \right. \tag{20}$$

Общее решение (19) имеет вид:

$$v(r) = C_3 r^{-\frac{3-t}{2}} + C_4 r^{-\frac{3+t}{2}}; \tag{21}$$

где C_3, C_4 – произвольные постоянные; $t = \sqrt{z^2 + 4}$.

После подстановки (21) в (20), получаем характеристическое уравнение:

$$\operatorname{sh}\left(2\varepsilon\sqrt{z^2 + 4}\right) = 0. \tag{22}$$

Уравнения (22) имеет счетное множество корней

$$z_n^\pm = i\sqrt{4 + \frac{\pi^2 n^2}{4\varepsilon^2}}, \quad (n = 1, 2, \dots) \tag{23}$$

Перемещения и напряжения, соответствующие корням (23), имеют вид:

$$u_\phi(r, \theta) = -\sum_{n=1}^{\infty} r^{-3/2} \sin\left(\frac{\pi n}{2\varepsilon} \ln\left(\frac{r_2}{r}\right)\right) \cdot m_n(\theta),$$

$$\sigma_{r\phi} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_0}{\sqrt{r}} \left[\frac{5}{2} \sin\left(\frac{\pi n}{2\varepsilon} \ln\left(\frac{r_2}{r}\right)\right) + \frac{\pi n}{2\varepsilon} \cos\left(\frac{\pi n}{2\varepsilon} \ln\left(\frac{r_2}{r}\right)\right) \right],$$

$$\sigma_{\theta\phi} = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_0}{\sqrt{r}} \sin\left(\frac{\pi n}{2\varepsilon} \ln\left(\frac{r_2}{r}\right)\right) \cdot (m'_n(\theta) - m_n(\theta) \operatorname{ctg}\theta).$$

Для группы корней (17), (23) главный член асимптотического решения уравнения (7) имеет вид [5]:

$$m_n(\theta) = \begin{cases} \left(\frac{\pi n}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sin\theta}} \exp\left[\frac{-\pi n}{2\varepsilon}(\theta - \theta_1)\right] \cdot (1 + O(\varepsilon)), & \text{в окрестности } \theta = \theta_1 \\ \left(\frac{\pi n}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sin\theta}} \exp\left[\frac{\pi n}{2\varepsilon}(\theta - \theta_2)\right] \cdot (1 + O(\varepsilon)), & \text{в окрестности } \theta = \theta_2. \end{cases}$$

Напряженное состояние, соответствующее группе корней (17), (23), имеет характер пограничного слоя [5;8-10]. Решение (3), удовлетворяющее граничным условиям (4), можно представить в виде

$$u_\phi(r, \theta) = \sum_{k=1}^{\infty} v_k(r) m_k(\theta), \tag{24}$$

где

$$m_k(\theta) = A_k P_{z_k-1/2}^1(\cos\theta) + B_k Q_{z_k-1/2}^1(\cos\theta);$$

$P_{z_k-1/2}^1(\cos\theta), Q_{z_k-1/2}^1(\cos\theta)$ – присоединенные функции Лежандра, соответственно первого и второго рода; A_k, B_k – произвольные постоянные; $z_k = \sqrt{9/4 - \lambda_k}$.

На основании (24) имеем:

$$\sigma_{\theta\phi} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{G(r)}{r} v_k(r) [m'_k(\theta) - m_k(\theta) \operatorname{ctg}\theta]. \tag{25}$$

(25) подставляем в (5):

$$\sum_{k=1}^{\infty} G(r) v_k(r) [m'_k(\theta) - m_k(\theta) \operatorname{ctg}\theta] = r f_s(r),$$

при $\theta = \theta_s, (s = 1, 2).$ \tag{26}

Умножая (26) скалярно на $v_t(r) (t = 1, 2, \dots)$, при учете условий (11), имеем:

$$m'_k(\theta) - m_k(\theta) \operatorname{ctg}\theta = \frac{1}{\int_{r_1}^{r_2} G(r) v_k^2(r) dr} \times \int_{r_1}^{r_2} r f_s(r) v_k(r) dr \tag{27}$$

при $\theta = \theta_s, (s = 1, 2).$

Постоянные A_k, B_k определяются из системы (27)

Выводы

Полученные решения имеют характер пограничного слоя и локализованы у торцов оболочки. Первые члены решения эквивалентны краевому эффекту Сен-Венана неоднородной плиты.

Список литературы:

1. Лурье, А. И. Теория упругости [Текст] / А. И. Лурье. – Москва: Наука, 1970. – 939 с.
2. Бейтмен, Г. Высшие трансцендентные функции [Текст] / Г. Бейтмен, А. Эрдейи. – Москва: Наука, 1967. – 296 с.
3. Колмогоров, А. Н. Элементы теории функций и функционального анализа [Текст] / А. Н. Колмогоров, С. В. Фомин. – ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 572 с.
4. Ломакин, В. А. Теория упругости неоднородных тел [Текст] / В. А. Ломакин. – Москва: МГУ, 1976. – 367.
5. Akhmedov, N. K. Studying the problem of torsion of a spherical shell with variable shear module [Text] / N. K. Akhmedov, N. S. Gasanova // Transactions of NAS of Azerbaijan. – 2016. – № 36 (7). – P. 3–10.
6. Ахмедов, Н. К. Задача кручения для радиально-неоднородной трансверсально-изотропной сферы малой толщины [Текст] / Н. К. Ахмедов, Т. Б. Мамедова // Вестник Бакинского Университета. – 2011. – № 1. – С. 83–91.
7. Акперова, С. Б. Анализ задачи кручения трансверсально-изотропного цилиндра малой толщины с переменными модулями сдвига [Текст] / С. Б. Акперова // Вестник Донского Государственного Технического Университета. – 2010. – Т. 10, № 5 (48). – С. 623–629.

8. Мехтiev, М. Ф. Асимптотический анализ некоторых пространственных задач теории упругости для полых тел [Текст] / М. Ф. Мехтiev. – Баку: «Элм», 2008. – 320 с.
9. Мехтiev, М. Ф. Метод однородных решений в анизотропной теории оболочек [Текст] / М. Ф. Мехтiev. – Баку: Чашыоглу, 2009. – 336 с.
10. Ахмедов, Н. К. Асимптотический анализ трехмерной задачи теории упругости для радиально – неоднородного трансверсально - изотропного полого цилиндра [Текст] / Н. К. Ахмедов, С. Б. Акперова // Известия Российской Академии Наук. Механика твердого тела. – 2011. – № 4. – С. 170–180.
5. Akhmedov, N. K., Gasanova, N. S. (2016). Studying the problem of torsion of a spherical shell with variable shear module. Transactions of NAS of Azerbaijan, 36 (7), 3–10.
6. Ahmedov, N. K., Mamedova, T. B. (2011). Zadacha kruchenija dlja radial'no-neodnorodnoj transversal'no-izotropnoj sfery maloj tolshhiny. Vestnik Bakinskogo Universiteta, 1, 83–91.
7. Akperova, S. B. (2010). Analiz zadachi kruchenija transversal'no-izotropnogo cilindra maloj tolshhiny s peremennymi moduljami sdviga. Vestnik Donskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta, 10(5(48)), 623–629.
8. Mehtiev, M. F. (2008). Asimptoticheskij analiz nekotoryh prostanstvennyh zadach teorii uprugosti dlja polyh tel. Baku: «Jelm», 320.
9. Mehtiev, M. F. (2009). Metod odnorodnyh reshenij v anizotropnoj teorii obolochek. Baku: Chashyoglu, 336.
10. Ahmedov, N. K., Akperova, S. B. (2011). Asimptoticheskij analiz trehmernoj zadachi teorii uprugosti dlja radial'no – neodnorodnogo transversal'no – izotropnogo pologo cilindra. Izvestija Rossijskoj Akademii Nauk. Mehanika tverdogo tela, 4, 170–180.

Bibliography (transliterated):

1. Lur'e, A. I. (1970). Teoriya uprugosti. Moscow: Nauka, 939.
2. Bejtmen, G., Jerdeji, A. (1967). Vysshie transcendentnye funkicii. Moscow: Nauka, 296.
3. Kolmogorov, A. N., Fomin, S. V. (2006). Jelementy teorii funkcij i funkcional'nogo analiza. FIZMATLIT, 572.
4. Lomakin, V. A. (1976). Teoriya uprugosti neodnorodnyh tel. Moscow: MGU, 367.

Поступила (received) 18.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз завдання кручення для радіально-неоднорідного сферичних пояс з закріпленою бічний поверхнею/ Н. С. Гасанова// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.3–7. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Анализ задачи кручения для радиально-неоднородного сферического пояса с закрепленной боковой поверхностью/ Н. С. Гасанова// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.3–7. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Analysis torsion problem for radial-inhomogeneous spherical belt with a side surface of the fixing/ N. S. Gasanova//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.3–7. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гасанова Натаван Сабір кизи – старший викладач кафедри «Геометрія», Гянджінський державний університет, вул. Гейдар Алієв, 187, м Гянджа, Азербайджан, AZ2000, e-mail: raufhesenovgence@gmail.com.

Гасанова Натаван Сабир кызы – старший преподаватель кафедры «Геометрия», Гянджинский государственный университет, ул. Гейдар Алиев, 187, г. Гянджа, Азербайджан, AZ2000, e-mail: raufhesenovgence@gmail.com.

Hasanova Natavan Sabir – Ganja State University, senior lecturer in "Geometry", str. Heydar Aliyev, 187 Ganja, Azerbaijan, AZ2000; tel.: 050-333-61-14; e-mail: raufhesenovgence@gmail.com.

УДК 546.814-31

К. С. РЕБРОВА, Т. А. ДОНЦОВА, І. М. АСТРЕЛІН

СТАНУМУ (IV) ОКСИД, ОТРИМАНІЙ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ, ЯК МАТЕРІАЛ ДЛЯ ГАЗОВИХ СЕНСОРІВ

В статті розглядається золь-гель синтез чутливих металоксидних шарів на основі стануму (IV) оксиду, перевагою якого є висока однорідність та розвинена площа поверхні синтезованих матеріалів. Синтезовані нанокристалічні порошки SnO₂ було досліджено термічним аналізом, електронною мікроскопією та дифракційними методами аналізу. Показано, що тип розчинника чинить значний вплив на розміри ОКР та частинок SnO₂. Вивчені вольт-амперні характеристики плівок з порошків стануму (IV) оксиду свідчать про суттєву відмінність в їх електропровідності. Винайдені результати свідчать, що отримані порошки можна використовувати в газових сенсорах за більш низьких температур.

Ключові слова: стануму (IV) оксид, золь-гель метод, газові сенсори, нанокристалічні порошки, вольт-амперні характеристики.

В статье рассматривается золь-гель синтез чувствительных металоксидных слоев на основе олова (IV) оксида, преимуществом которого является высокая однородность и развитая площадь поверхности синтезированных материалов. Синтезированные нанокристаллические порошки SnO₂ были исследованы термическим анализом, электронной микроскопией и дифракционным методами анализа. Показано, что тип растворителя оказывает значительное влияние на размеры ОКР и частиц SnO₂. Исследованные вольт-амперные характеристики пленок из порошков олова (IV) оксида свидетельствуют о существенных отличиях в их электропроводности. Полученные результаты свидетельствуют, что синтезированные порошки можно использовать в газовых сенсорах при более низких температурах.

Ключевые слова: олова (IV) оксид, золь-гель метод, газовые сенсоры, нанокристаллические порошки, вольт-амперные характеристики.

© К. С. Реброва, Т. А. Донцова, І. М. Астрелін. 2016

The article discusses the advantages of metal oxide gas sensors based tin (IV) oxide. For the tin (IV) oxide synthesis was chosen sol-gel method, it is advantage a high uniformity and a developed surface area of synthesized materials. Synthesis and characterization of tin (IV) oxide was conducted.

The result of the study is: SnO₂ powders obtained by sol-gel method and their physical and chemical properties that are investigated by thermal analysis, electron microscopy and diffraction methods of analysis. It is shown that the type of solvent has a significant impact on the size of crystallites and particles of SnO₂. The current-voltage characteristics of the SnO₂ films studied and significant difference in their electrical conductivity is showed.

As scientific innovation first investigated electrical properties of tin oxide powders obtained by sol-gel method in different environments.

The practical significance of the results that obtained data allow the use of tin (IV) oxide layers as sensitive gas sensors at lower temperatures. It will significantly reduce energy consumption metal oxide gas sensor as a whole.

Keywords: tin (IV) oxide, sol-gel method, gas sensors, nanocrystalline powders, current-voltage characteristics.

Вступ. Дослідження в області газових сенсорів та їх розробка диктуються потребами контролю стану довкілля і середовища життєдіяльності персоналу в хімічних, металургійних, газо-, вугле- і нафтодобувних виробництвах. Серед різних типів газових сенсорів твердотільні мають ряд переваг, основною з яких є їх портативність. Поміж останніх особливої уваги заслуговують металоксидні газові сенсори через їх низьку вартість та простоту виготовлення [1]. Однак, такі сенсори мають й суттєві недоліки: малий ресурс роботи і невисоку селективність в аналізі газових сумішей. У зв'язку з цим виникає необхідність більш глибокого дослідження процесів створення чутливих шарів та аналіз їх фізико-хімічних характеристик з метою більшої керованості їх властивостями.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Стануму (IV) оксид (SnO₂) – напівпровідник з шириною забороненої зони 3,6 eV, що має досить широку область практичного використання: прозорі і електропровідні плівки різного призначення, каталізатори та фотокаталізатори, електроди, газові сенсори тощо [2–4]. Особливий інтерес до стануму (IV) оксиду обумовлений його використанням в газових сенсорах резистивного типу, чутливих до слідових концентрацій горючих та токсичних газів [5, 6].

Зазвичай SnO₂ одержують такими способами як хімічне осадження з водних та неводних розчинів, золь-гель метод з різними варіаціями, розкладання термічно нестабільних сполук стануму та специфічними методами синтезу [7–10]. Золь-гель технологія на сьогоднішній день є однією з найбільш перспективних, суттєвою перевагою якої є можливість досягнення високої однорідності та розвиненої площі поверхні синтезованих матеріалів [11]. Тим не менш, залишається не дослідженим вплив багатьох факторів в процесі синтезу стануму (IV) оксиду золь-гель методом на його фізико-хімічні характеристики, а, отже, й електричні та сенсорні властивості, які є визначальними для SnO₂ при використанні його як чутливий шар в газових сенсорах.

Ціль та задачі дослідження. Метою даної роботи було дослідження впливу типу середовища процесу на фізико-хімічні характеристики нанокристалічних порошків SnO₂, при їх отриманні золь-гель методом.

Для досягнення поставленої мети були поставлені завдання:

1. синтезувати порошки золь-гель методом;
2. дослідити їх фізико-хімічні та електричні характеристики.

Матеріали та методи. Для синтезу порошків SnO₂ використовували стануму (IV) хлорид п'ятиводний, аміак 25 % мас., ізопропіловий спирт, бензило-

вий спирт та дистильовану воду. Всі реактанти були кваліфікації «хч».

Синтез зразків SnO₂ проводили згідно методики, що наведена в [11]. При цьому синтез здійснювали в трьох середовищах: в дистильованій воді, ізопропіловому та бензиловому спиртах. Синтезовані зразки SnO₂, що отримані в різних середовищах та за різних температур прожарювання, наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Синтезовані зразки SnO₂

Зразки	Середовище	T _{прож.} , К
1	Вода	Без прожарювання
2		673
3		773
4	Ізопропіловий спирт	Без прожарювання
5		673
6		773
7	Бензиловий спирт	Без прожарювання
8		673
9		773

Термічний аналіз отриманих зразків SnO₂ проводили на повітрі в термоаналізаторі Derivatigraф Q-1500 (Угорщина) в платиновому тиглі з використанням прожареного Al₂O₃ як стандарту при швидкості нагріву 10 град/хв.

Розміри частинок отриманих зразків визначали за допомогою просвічуючого електронного мікроскопа ПЕМ 100-01. Прискорююча напруга при роботі ПЕМ становила 80 кВ.

Одержані зразки стануму (IV) оксиду досліджували методом рентгенофазового аналізу (РФА) на дифрактометрі Rigaku Ultima IV у мідному випромінюванні ($\lambda=0,154056$ нм) зі швидкістю розгортки 0,02 град·с⁻¹ при напрузі 40 кВ та силі струму 40 мА.

Вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) проводилися на оригінальних тестових зразках газових датчиків. Принципова схема конструкції датчика газу показана на рис. 1, яка складається із скло-керамічною підкладки, покритої нікелевими електродами і приєднаними до неї посрібленими мідними дротами, вкритими тефлоновим покриттям. Чутливий шар стануму (IV) оксиду наносили на підкладку шляхом осадження із спиртового розчину.

На рис. 2 показана блок-схема, за якої досліджували електричні властивості чутливих шарів. При цьому зразок стануму (IV) оксиду розміщували в трубчастій печі для створення температури повітря до 150 °С.

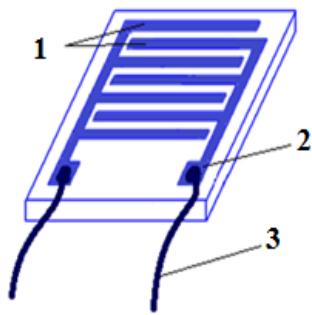


Рис. 1 – Схема газового датчика: 1 – нікелеві електроди, 2 – контактна площадка, 3 – дроти

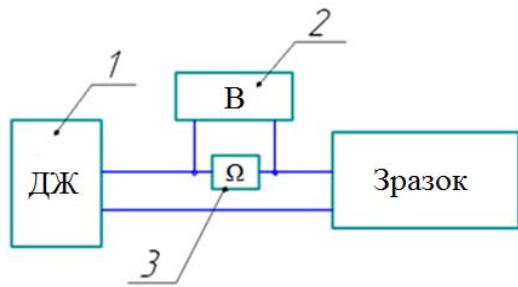


Рис. 2 – Блок-схема для вивчення вольт-амперних характеристик зразків: 1 – джерело живлення, 2 – вольтметр, 3 – резистор

Результати дослідження порошків SnO₂. Характеризацію синтезованих порошків SnO₂ було проведено термічним аналізом, електронною мікроскопією та дифракційними методами аналізу. На рис. 3 наведені термограми зразків 1, 4 та 7.

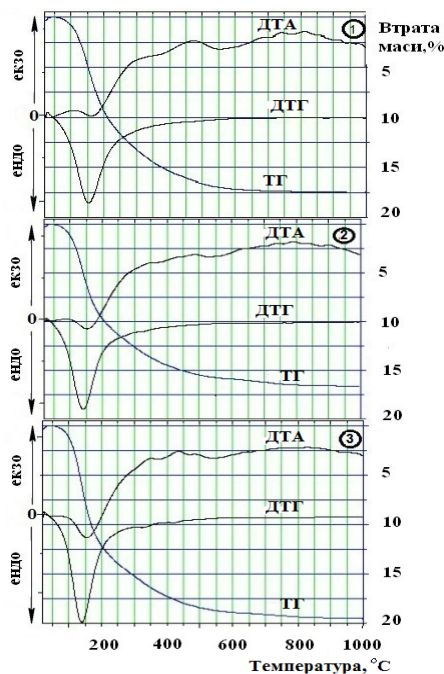


Рис. 3 – Термограми зразків SnO₂: 1 – зразок 1, 2 – зразок 4, 3 – зразок 7

На рис. 4, а представлені дифрактограми зразків SnO₂, термооброблені за двох температур, а на рис. 4, б – електронні зображення кристалічних порошків SnO₂, одержані в різних середовищах.

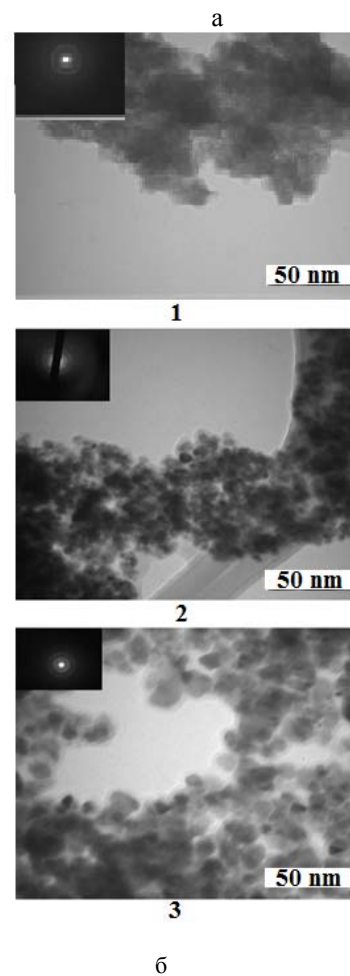
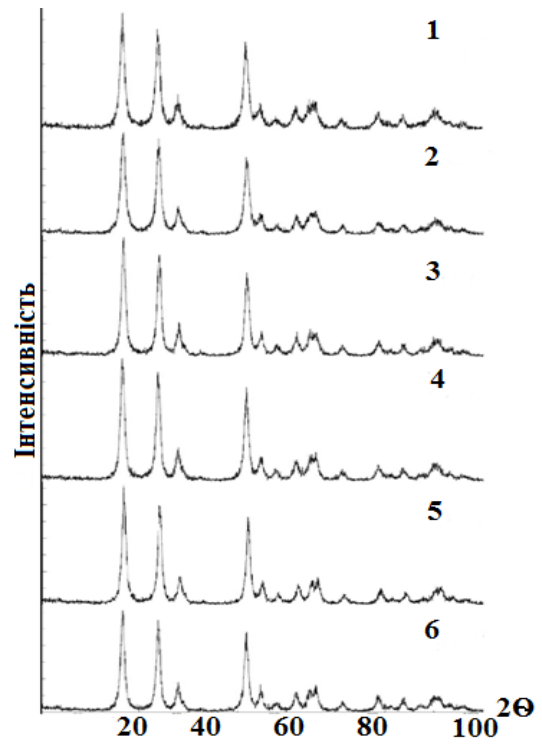


Рис. 4 – Характеризація порошків SnO₂: а – дифрактограми (1 – зразок 2, 2 – зразок 3, 3 – зразок 5, 4 – зразок 6, 5 – зразок 8, 6 – зразок 9); б – електронні фотографії (1 – зразок 3; 2 – зразок 6; 3 – зразок 9)

Також, зразки SnO₂, що термооброблені за температур 400 °С, досліджувались на вольт-амперні характеристики. На рис. 5 наведені відповідні результати.

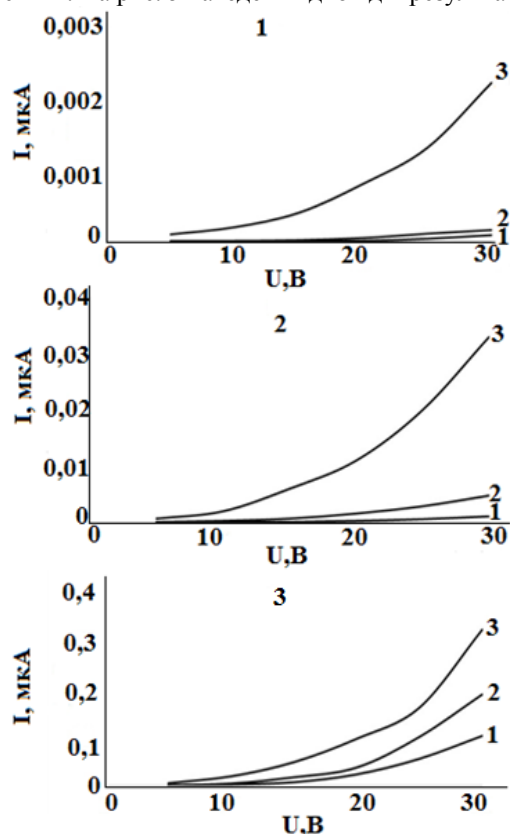


Рис. 5 – Вольт-амперні характеристики плівок SnO₂ за різних температур (1 – 50 °С, 2 – 100 °С, 3 – 150 °С) на повітрі: 1 – зразок 2; 2 – зразок 5; 3 – зразок 8

Обговорення результатів. Як видно з рис. 3, в усіх випадках за температур 110-150 °С втрачається волога (зразок 1 – до 17,5 % мас., зразок 4 – до 16 % мас., зразок 7 – до 19 % мас.), що також додатково підтверджується відповідним ендотермічним ефектом. Далі, за температури близько 350 °С, фіксується слабкий екзотермічний ефект, який пов'язаний з кристалізацією стануму (IV) оксиду. Таким чином, на підставі цього, були обрані подальші температури термообробки отриманих гелів, а саме, 400 та 600 °С (зразки 2, 3, 5, 6, 8 та 9).

Представлені дифрактограми (рис. 4, а) термооброблених за двох температур зразків SnO₂ були автоматично проаналізовані пакетом програм PDXL з використанням баз даних ICDD/PDF2 і COD. Всі зразки ідентифіковані як чистий SnO₂ (стандартна картка № 00-041-1445).

Розмір областей когерентного розсіювання рентгенівського випромінювання (ОКР) дослідних зразків розраховували за формулою Шерера, які становили: 4,6 і 5,4 нм для зразків 2 і 3; 6,8 і 6,9 нм для зразків 5 і 6; 7,0 і 7,4 нм для зразків 8 і 9.

Згідно рис. 4, б, всі зразки мають губчасту структуру агрегатів розміром більше ніж 200 нм. При цьому, спостерігається вплив розчинника на губчасту структуру та розмір окремих частинок в залежності від типу використаного розчинника в процесі синтезу: при синтезі у водному середовищі утворюються найменші частинки, а при синтезі у бензиловому спирті –

найбільші. На нашу думку, це пов'язано, в першу чергу, зі структурними особливостями молекул розчинника. Одержані дані щодо розмірів частинок узгоджуються з отриманими величинами ОКР.

Як видно з рис. 5, природа розчинника чинить істотний вплив на електричні характеристики плівок зі SnO₂, провідність яких відрізняється між собою на порядок. Найкращою провідністю характеризується плівка зі SnO₂, що синтезована в бензиловому спирті, а найгіршою – синтезована в дистильованій воді. Виявлену залежність можна пояснити впливом розмірів кристалітів та частинок – вони утворюють різну кількість контактів між частинками у плівці, що відображається на кінцевому опорі. Плівки SnO₂, отримані в органічних розчинниках, будуть більш перспективні при роботі газових сенсорів за низьких температур, особливо це стосується плівки зі зразку 8, яка, на нашу думку, може працювати за 50 °С.

Висновки. Золь-гель метод є перспективним методом створення чутливих елементів газових сенсорів, так як дозволяє варіювати великою кількістю параметрів синтезу, що відображається на кінцевих властивостях отримуваних порошків SnO₂.

Тип розчинника чинить значний вплив на розміри ОКР та частинок стануму (IV) оксиду та істотний вплив на ВАХ. Провідність одержаних плівок з порошків SnO₂, які синтезовані в різних розчинниках, суттєво відрізняються один від одного (на порядок), що обумовлено різною кількістю контактів між частинками.

Плівки зі стануму (IV) оксиду, синтезованого в органічних розчинниках, є більш перспективними для використання в газових сенсорах через потенційну можливість їх роботи за низьких температур, що дозволить значно знизити енергоспоживання металоксидного газового сенсору в цілому.

В подальшому необхідно більш глибоко дослідити вплив різних розчинників на електричні властивості та сенсорні характеристики за низьких температур плівок на основі стануму (IV) оксиду.

Список літератури:

1. *Нагірняк, С. В.* Одновимірні наноструктури стануму (IV) оксиду як чутливий матеріал для газових сенсорів [Текст] / *С. В. Нагірняк, Т. А. Донцова, І. М. Астелін* // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2015. – № 5. – С. 119–128.
2. *Guozhong, C.* Nanostructures and nanomaterials: synthesis, properties and applications [Text] / *C. Guozhong*. – World scientific, 2004. – 448 p.
3. *Babar, A.* Electrical and dielectric properties of co-precipitated nanocrystalline tin oxide [Text] / *A. R. Babar, S. S. Shinde, A. V. Moholkar, K. Y. Rajpure*. // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – № 505 (2). – P. 743–749. doi: [10.1016/j.jallcom.2010.06.131](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.06.131)
4. *Fang, X.* Inorganic semiconductor nanostructures and their field-emission applications [Text] / *X. Fang, Y. Bando, U. K. Guatam, D. Golberg* // Journal of materials chemistry. – 2008. – № 18 (5). – С. 509–522. doi: [10.1039/b712874f](https://doi.org/10.1039/b712874f)
5. *Nagirnyak, S. V.* The Effect of the Synthesis Conditions on Morphology of Tin (IV) Oxide Obtained by Vapor Transport Method [Text] / *S. V. Nagirnyak, V. A. Lutz, T. A. Dontsova, I. M. Astrelin*. // Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies, and Applications. – 2016. – № 183. – P. 331–342. doi: [10.1007/978-3-319-30737-4_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-30737-4_28)
6. *Nagirnyak, S. V.* Synthesis and characterization of tin (IV) oxide obtained by chemical vapor deposition method [Text] / *S. V. Nagirnyak, V. A. Lutz, T. A. Dontsova, I. M. Astrelin* // Nanoscale

- Research Letters. – 2016. – № 11. – P. 11–18. doi: [10.1186/s11671-016-1547-x](https://doi.org/10.1186/s11671-016-1547-x)
7. *Calderer, J.* Synthesis and characterisation of metal suboxides for gas sensors [Text] / *J. Calderer, P. Molinas, J. Sueiras, E. Llobet, X. Vilanova, X. Correig, A. Rodriguez*, // *Microelectronics reliability*. – 2000. – № 40 (4–5). – P. 807–810. doi: [10.1016/s0026-2714\(99\)00306-6](https://doi.org/10.1016/s0026-2714(99)00306-6)
 8. *Cabot, A.* Analysis of the noble metal catalytic additives introduced by impregnation of as obtained SnO₂ sol-gel nanocrystals for gas sensors [Text] / *A. Cabot, J. Arbiol, J. Morante, U. Weimar, N. Barsan, W. Göpel* // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2000. – № 70 (1–3). – P. 87–100. doi: [10.1016/s0925-4005\(00\)00565-7](https://doi.org/10.1016/s0925-4005(00)00565-7)
 9. *Tan, L.* Hydrothermal Synthesis of SnO₂ Nanostructures with Different Morphologies and Their Optical Properties [Text] / *T. L. Tan, L. Wang, Y. Wang* // *Journal of Nanomaterials*. – 2011. – P. 1–10. doi: [10.1155/2011/529874](https://doi.org/10.1155/2011/529874)
 10. *Михайленко, Н. О.* Очищення забруднених водних середовищ магнітокеруваними сапонітовими сорбентами [Текст] / *Н. О. Михайленко, О. В. Макарчук, Т. А. Донцова, С. В. Горобець, І. М. Астрелін* // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – № 4/10 (76). – С. 13–20. doi: [10.15587/1729-4061.2015.46573](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.46573)
 11. *Донцова, Т. А.* Використання темплатного золь-гель методу для отримання наночастинок стануму (IV) оксиду [Текст] / *Т. А. Донцова* // *Наукові вісті НТУУ «КПІ» : науково-технічний журнал*. – 2015. – № 3(101). – С. 98–103.
- Bibliography (transliterated):**
1. Nagirnyak, S. V., Dontsova, T. A., Astrelin, I. M. (2015). One-dimensional tin (IV) oxide nanostructures as gas-sensing materials. *Science news of NTUU "KPI"*, 5. 119–128.
 2. Guozhong, C. (2004). *Nanostructures and nanomaterials: synthesis, properties and applications*. World scientific, 448.
 3. Babar, A. R., Shinde, S. S., Moholkar, A. V., Rajpure, K. Y. (2010). Electrical and dielectric properties of co-precipitated nanocrystalline tin oxide. *Journal of Alloys and Compounds*, 505 (2), 743–749. doi: [10.1016/j.jallcom.2010.06.131](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.06.131)
 4. Fang, X., Bando, Y., Gautam, U. K., Golberg, D. (2008). Inorganic semiconductor nanostructures and their field-emission applications. *Journal of materials chemistry*, 18 (5), 509–522. doi: [10.1039/b712874f](https://doi.org/10.1039/b712874f)
 5. Nagirnyak, S., Lutz, V., Dontsova, T., Astrelin, I. (2016). The Effect of the Synthesis Conditions on Morphology of Tin (IV) Oxide Obtained by Vapor Transport Method. *Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies, and Applications*, 183, 331–341. doi: [10.1007/978-3-319-30737-4_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-30737-4_28)
 6. Nagirnyak, S. V., Lutz, V. A., Dontsova, T. A., Astrelin, I. M. (2016). Synthesis and Characterization of Tin (IV) Oxide Obtained by Chemical Vapor Deposition Method. *Nanoscale Research Letters*, 11 (1), 11–18. doi: [10.1186/s11671-016-1547-x](https://doi.org/10.1186/s11671-016-1547-x)
 7. Calderer, J., Molinàs, P., Sueiras, J., Llobet, E., Vilanova, X., Correig, X., Rodriguez, A. (2000). Synthesis and characterisation of metal suboxides for gas sensors. *Microelectronics Reliability*, 40 (4–5), 807–810. doi: [10.1016/s0026-2714\(99\)00306-6](https://doi.org/10.1016/s0026-2714(99)00306-6)
 8. Cabot, A., Arbiol, J., Morante, J. R., Weimar, U., Barsan, N., Göpel, W. (2000). Analysis of the noble metal catalytic additives introduced by impregnation of as obtained SnO₂ sol-gel nanocrystals for gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 70 (1–3), 87–100. doi: [10.1016/s0925-4005\(00\)00565-7](https://doi.org/10.1016/s0925-4005(00)00565-7)
 9. Tan, L., Wang, L., Wang, Y. (2011). Hydrothermal Synthesis of SnO₂ Nanostructures with Different Morphologies and Their Optical Properties. *Journal of Nanomaterials*, 1–10. doi: [10.1155/2011/529874](https://doi.org/10.1155/2011/529874)
 10. My'xajlenko, N. O., Makarchuk, O. V., Donczova, T. A., Gorobecz', S. V., Astrelin, I. M. (2015). Purification of aqueous media by magnetically operated saponite sorbents. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10(76)), 13–20. doi: [10.15587/1729-4061.2015.46573](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.46573)
 11. Dontsova, T. A. 2015. The Template Sol-Gel Method for Synthesis of Tin (IV) Oxide Nanoparticles. *Science news of NTUU "KPI"*, 3 (101), 98–103.

Надійшла (received) 18.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Стануму (IV) оксид, отриманий золь-гель методом, як матеріал для газових сенсорів/ К. С. Реброва, Т. А. Донцова, І. М. Астрелін// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.7–12. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Оксид олова (IV), полученный золь-гель методом, как материал для газовых сенсоров/ Е. С. Реброва, Т. А. Донцова, И. М. Астрелин// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.7–12. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Tin (IV) oxide obtained by a sol-gel method as a material for gas sensors/ Kateryna Rebrova, Tetiana Dontsova, Ihor Astrelin//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221). – P.7–12. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Реброва Катерина Сергіївна – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», магістрант кафедри технології неорганічних речовин та загальної хімічної технології; проспект Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: katerinka.rebrova@mail.ru

Реброва Екатерина Сергеевна – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», магистрант кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии; проспект Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; e-mail: katerinka.rebrova@mail.ru

Rebrova Kateryna – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Master of the Department of technology of inorganic substances and general chemical technology, Peremogy Avenue, 37, Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: katerinka.rebrova@mail.ru

Донцова Тетяна Анатоліївна – кандидат хімічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри технології неорганічних речовин та загальної хімічної технології; проспект Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: dontsova@ua.fm

Донцова Татьяна Анатольевна – кандидат химических наук, доцент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», доцент кафедры технологии

неорганических веществ и общей химической технологии; проспект Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; e-mail: dontsova@ua.fm

Dontsova Tetiana – PhD, Docent, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Docent of the Department of technology of inorganic substances and general chemical technology, Peremogy Avenue, 37, Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: dontsova@ua.fm

Астрелін Ігор Михайлович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», декан Хіміко-технологічного факультету; проспект Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: i.m.astrelin@xtf.kpi.ua

Астрелін Ігорь Михайлович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», декан Химико-технологического факультета; проспект Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; e-mail: i.m.astrelin@xtf.kpi.ua

Astrelin Ihor – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Dean of the Faculty of Chemical Technology, Peremogy Avenue, 37, Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: i.m.astrelin@xtf.kpi.ua

УДК 621.763: 667.637.22

В. П. КАШИЦЬКИЙ, В. М. МАЛЕЦЬ, С. М. ЩЕГЛОВ

ТЕРМОЦИКЛІЧНА ТА КОРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ МОДИФІКОВАНИХ У ФІЗИЧНИХ ПОЛЯХ

Досліджено вплив агресивних середовищ та знакозмінних температур на епоксикомпозитні матеріали, що містять високодисперсні частинки. Оптимізовано склад та розроблено технологію обробки епоксиполімерної композиції на стадії формування. Підтверджено перспективність застосування високодисперсних наповнювачів з метою покращення фізико-механічних характеристик епоксикомпозитних матеріалів, які використовують для створення високоякісних покриттів з покращеним комплексом експлуатаційних властивостей.

Ключові слова: епоксикомпозит, високодисперсний порошок, корозійна стійкість, тріщиностійкість, фізичне поле, ультразвук, електромагнітне поле.

Исследовано влияние агрессивных сред и знакопеременных температур на эпоксикомпозитные материалы, содержащие высокодисперсные частицы. Оптимизирован состав и разработана технология обработки эпоксиполимерной композиции в стадии формирования. Подтверждено перспективность применения высокодисперсных наполнителей с целью улучшения физико-механических характеристик эпоксикомпозитных материалов, используемых для создания высококачественных покрытий с улучшенным комплексом эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: эпоксикомпозит, высокодисперсный порошок, коррозионная стойкость, трещиностойкость, физическое поле, ультразвук, электромагнитное поле.

The influence of aggressive environments and alternating temperatures on epoxy composite material that contains super fine particles was investigated. Optimized composition and processing technology of epoxy polymer composition in its formative stages. Investigated and substantiated the influence of the tracks in the electromagnetic field and ultrasound on the physical and mechanical properties of epoxy composites containing fine-particle ferro-, para- and diamagnetic nature. Found that developed epoxy composites have very high corrosion resistance in dilute acids, enabling their use in aggressive environments. The expediency of using protective coatings epoxy composites full of highly modified powders and physical fields under the influence of alternating temperatures. The optimum technological modes of formation epoxy composites using external physical fields. On the basis of researches methods modified epoxy compositions to form a bilayer protective coating.

Keywords: epoxy composite, highly dispersed powder, corrosion resistance, fracture toughness, physical field, ultrasound, electromagnetic field.

Вступ. Проблема підвищення ресурсу, надійності, безвідмовності і ремонтоздатності технологічного обладнання є актуальною задачею для хімічних, нафтохімічних і нафтопереробних виробництв. Вибір конструкційного матеріалу для експлуатації обладнання у складних умовах, необхідно здійснювати так, щоб за низької вартості і не дефіцитності матеріалу використати ефективну технологію виготовлення деталі. Крім цього необхідно враховувати експлуатаційні фактори, основними з яких є інтенсивність агресивного середовища та температура. Перспективним вирішенням даної задачі є розробка та застосування полімеркомпозитів, зокрема, на основі епоксидних смол, які мають ряд переваг порівняно з іншими реакційноздатними полімерами завдяки високій технологічності, адгезійній міцності, твердості, зносостійкості, стійкості до зміни температур та корозійній стійкості.

Довговічність полімеркомпозитних матеріалів визначається їх здатністю протистояти агресивному впливу хімічних середовищ, низьких та знакозмінних

температур. Залежно від агресивного середовища та впливу знакозмінних температур може відбуватися зниження механічних характеристик даних матеріалів в результаті активації поверхнево-адсорбційного ефекту або внаслідок хімічних взаємодій.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Хімічна стійкість полімеркомпозитів залежить насамперед від наявності в них активних центрів (ненасичених зв'язків, функціональних груп, атомів галогенів), які під впливом агресивного середовища можуть змінюватися. Корозія полімеркомпозитів відбувається в гетерогенній системі в результаті дифузії агресивного середовища, що викликає набухання або хімічно взаємодіє з полімером. Підвищення хімічної стійкості досягається шляхом модифікації структури матриці полімеркомпозиту високодисперсними наповнювачами за рахунок утворення додаткових зв'язків, які збільшують стійкість полімеркомпозитних матеріалів та покриттів.

© В. П. Кашицький, В. М. Малець, С. М. Щеглов. 2016

Одним з основних недоліків полімеркомпозитів є часткова або повна втрата експлуатаційних властивостей за низьких температур, тобто обмежена тріщиностійкість. Згідно експериментальних досліджень встановлено, що механічні, діелектричні, релаксаційні та інші властивості полімерів суттєво змінюються внаслідок нагрівання або охолодження [1].

Схильність полімерів до тріщиноутворення за температур, нижчих за поріг холодноламкості, пояснюється наростанням в композиті напружень внаслідок сповільнення релаксаційних процесів в макромолекулах полімерної матриці. Найбільші значні зміни об'єму матриці зафіксовано у полімерах лінійної та полярної структури, оскільки за низьких температур зовнішні навантаження викликають появу в них пружних деформацій [2].

Для техніки, що експлуатується в умовах холодного клімату, температурний діапазон, в якому механічні властивості конструкційних матеріалів повинні забезпечувати необхідні показники надійності та довговічності, звичайно приймається від (-40) до (+40), тому проблема підвищення надійності техніки в умовах від'ємних температур присвячена велика кількість наукових робіт [3], однак в даних роботах не розглядається проблема розробки полімеркомпозитних покриттів стійких до впливу агресивного середовища, низьких та знакозмінних температур.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є розробка складу та технології формування епоксикомпозитів наповнених високодисперсними порошками за умови додаткової ультразвукової та електромагнітної обробки композицій на стадії формування для забезпечення високої корозійної стійкості та тріщиностійкості композитних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Дослідження корозійної стійкості, водопоглинання та тріщиностійкості епоксикомпозитних матеріалів.
2. Вибір оптимального складу та виду обробки епоксидних композицій у фізичних полях.

Матеріали та методи дослідження епоксикомпозитних матеріалів.

В якості матриці полімеркомпозитів використано епоксидну смолу марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), що представляє собою рідкий реакціоздатний олігомерний продукт на основі дигліциділового ефіру дифенілпропану. Покриття на основі смоли ЕД-20 мають високу адгезію до різних матеріалів високу твердість, еластичність, високі діелектричні властивості, стійкість в агресивних середовищах.

Для тверднення епоксидних композицій використано поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-02-594-70), який призначений для структурування епоксидних смол за кімнатної та пониженої температур в умовах підвищеної вологості.

Малі розміри, висока поверхнева енергія, хімічна та дифузійна активність, високі температури плавлення високодисперсних частинок дозволяють ефективно використовувати дані порошки для покращення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей епоксикомпозитів [4].

Порошок заліза марки ПЖР-3 (ГОСТ 9849-86) має у своєму складі не менше 97 % основної речовини, дисперсність частинок становить 30 – 50 мкм. Вміст домішок вуглецю не перевищує до 1,2 % мас., азоту – до 0,9 % мас. і кисню – до 0,7 % мас.

Карбонільне залізо марки Р-20 (ГОСТ 13610-79) – дрібнодисперсний порошок чистого заліза (середній діаметр частинок становить 2,5 – 5 мкм), має підвищену електропровідність, стійкістю до дії агресивних середовищ, пластичність. Частинки сферичної форми без гострих виступів.

Порошок цирконію марки ПЦрК1 (ТУ 48-4-234-84) має середній розмір частинок 1 – 2 мкм, пластичний, має високу корозійну стійкість до атмосферних газів, води та лугів, не реагує з соляною і сірчаною (концентрацією до 50 %) кислотами [5].

Фулеренова чернь (ТУ 2166-004-65523364-2010) – фулеренова сажа після вилучення суміші фулеренів неполярними органічними розчинниками. Порошок не розчинний, насипна щільність 0,5 г/см³, загальний вміст фулеренів не більше 0,10 %.

Фторопласт марки 4ПН-20 (ГОСТ 10007-80) – фторвуглецевий полімер, стійкий до всіх кислот, розчинників, нафтопродуктів, лугів (крім лужних металів) в робочому інтервалі тривалої експлуатації від мінус 542 К до плюс 533 К, стійкий до водяної пари, кліматичних впливів. Середній розмір частинок становить 6 – 20 мкм [6].

Формування дослідних зразків полягало в отриманні однорідної композиції, до складу якої входили необхідні компоненти. Композицію формували наступним чином: до епоксидної смоли вводили твердник ПЕПА (12 мас. ч. на 100 мас. ч. ЕД-20), надалі вводили наповнювач з механічним вимішуванням складових на кожному етапі для забезпечення високої однорідності системи.

Для забезпечення рівномірного розподілу високодисперсного наповнювача у об'ємі полімерної матриці після механічного змішування, композиції обробляли ультразвуком або в електромагнітному полі. Обробку ультразвуком здійснювали в контейнері лабораторної установки (рис. 1) в середовищі води за частоти 20 кГц. Підготовлену композицію у посудині розміром 6x4 см розташовували на відстані 10 мм від джерела ультразвукових хвиль. Тривалість обробки складала 5 – 10 хв.

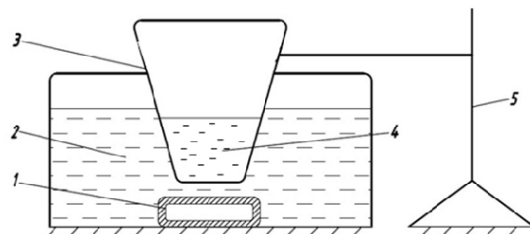


Рис. 1 – Схема установки для обробки епоксидної композиції ультразвуком: 1 – джерело випромінювання; 2 – середовище (вода); 3 – контейнер; 4 – композиція; 5 – штатив

Для електромагнітної обробки використано високочастотне електромагнітне поле (рис. 2). Обробку

здійснювали в повітряному середовищі. Тривалість обробки складала 5–10 хв.

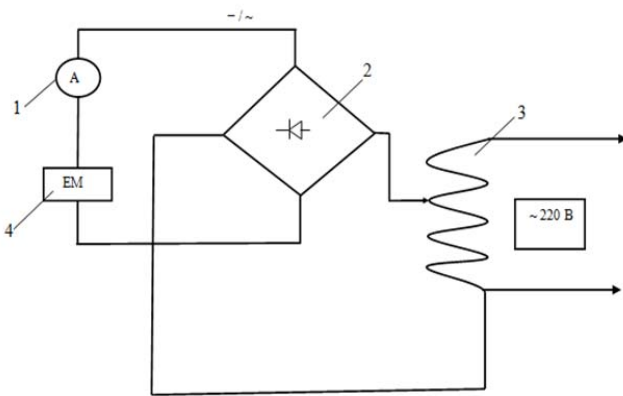


Рис. 2 – Схема установки для обробки композицій в електромагнітному полі: 1 – амперметр; 2 – діодний міст; 3 – автотрансформатор; 4 – електромагніт

Корозійну стійкість епоксикомполімерів визначали шляхом занурення зразків розміром 60×10×10 мм у 10 %-ві розчини H₂SO₄, HNO₃, HCl, NaCl, NaOH [7]. Через заданий проміжок часу (24, 68, 120 год) зразки виймали, помішали на паперовий фільтр та просушували за температури 80 – 100 °С.

Визначення ступеня розтріскування епоксикомполімерних покриттів під впливом знакозмінних температур полягало в оцінці довжини, ширини та глибини

тріщин за п'ятибальною системою та визначенню типу тріщин за еталоном [8]. Цикл досліджень полягав в тому, що структуровані покриття витримували за кімнатної температури, далі за температури 333 К після чого піддавали впливу від'ємних температур в холодильній камері ТКС 11 за температури – 233 К.

Кількісну оцінку критерію руйнування покриття розраховано за формулою:

$$P = 0,3 x_1 + 0,2x_2 + 0,2x_3 + 0,3x_4, \quad (1)$$

де P – відносна оцінка ступеня розтріскування; x₁, x₂, x₃, x₄ – відносна оцінка відповідно розміру тріщини за глибиною, довжиною та шириною.

Результати дослідження епоксикомполімерних матеріалів. Результати експериментальних досліджень підтверджують високу хімічну стійкість розроблених епоксикомполімерних матеріалів на основі епоксидних смол (табл. 1) в різних агресивних середовищах, оскільки епоксиполімерна матриця сповільнює електрохімічні реакції на поверхні металевих частинок та впливає на кінетику процесу, утворюючи дифузійний бар'єр [9]. Встановлено, що азотна та сірчана кислоти призводять до максимальної втрати маси епоксиполімерних зразків, оскільки відбувається деструкція полімеру в розчинах даних кислот в результаті чого змінюється структура матеріалу та руйнуються нестійкі зв'язки [10].

Таблиця 1 – Корозійна стійкість епоксикомполімерних матеріалів

Агресивне середовище	Зміна маси зразків епоксикомполімерних матеріалів, наповнених високодисперсними порошками, %				
	Полімерна матриця	Фторопласт	Залізо марки ПЖР-3	Карбонільне залізо	Цирконій
H ₂ SO ₄	- 1,18	- 1,01	- 3,00	+ 2,08	+ 1,44
HNO ₃	- 1,94	+ 0,00	- 2,2	- 0,60	+ 0,88
HCl	- 1,12	+ 0,13	+ 0,46	+ 0,57	+ 0,00
NaCl	- 1,01	+ 0,23	+0,66	+ 0,33	- 0,6
NaOH	- 0,97	+ 0,49	+0,76	- 0,59	+ 0,65

Введення до складу епоксиполімерної матриці високодисперсних наповнювачів сприяє підвищенню хімічної стійкості за рахунок збільшення корозійної стійкості наповнювача та зростання кількості фізико-хімічних зв'язків [11]. Після занурення епоксикомполімерів в розчини кислот H₂SO₄ та HNO₃ зафіксовано зниження маси зразків, наповнених порошками карбонільного заліза та заліза марки ПЖР-3, що пов'язано з розчиненням та видаленням продуктів корозії. Збільшення маси зразків відбувається після витримки епоксикомполімерів, наповнених порошками фторопласту, заліза марки ПЖР-3 або карбонільного заліза, в середовищі кислот HCl або водного розчину солі NaCl. Витримка епоксикомполімерів аналогічного складу в кислотах H₂SO₄ та HNO₃ також призводить до збільшення маси. Поверхня епоксикомполімерів покривається продуктами корозії (рис. 3), що призводить до зростання маси зразків.

Встановлено, що для епоксикомполімерів, наповнених порошком цирконію не зафіксовано зміни маси досліджуваних зразків після витримки в агресивному середовищі HCl завдяки наявності корозій-

ностійких частинок наповнювача, які перешкоджають проникненню молекул активних речовин в об'єм матриці [12]. Аналогічні результати отримано для епоксикомполімерів, наповнених частинками фторопласту після занурення в кислоту HNO₃.

Експериментально встановлено, що показник тріщиностійкості полімеркомполімерів залежить від розміру частинок наповнювача та способу модифікації епоксидної композиції у фізичному полі (табл. 2). Експериментально встановлено, що епоксикомполімерні покриття, наповнені порошком карбонільного заліза без попередньої обробки композицій у фізичних полях та у випадку обробки композицій ультразвуком характеризуються низькими значеннями коефіцієнту розтріскування (P=0,33–0,55). Це пов'язано з тим, що вплив знакозмінних температур призводить до підвищення залишкових напружень в покриттях, внаслідок чого відбувається руйнування адгезійних зв'язків між матрицею та наповнювачем з утворенням тріщин (рис. 4, а, г).

Введення фулеренової черні в полімерну матрицю без попередньої обробки композицій знижує трі-

щностійкість епоксикомполитів ($P = 0,1$), що підтверджується значним розшаруванням покриття (рис. 4, б) та пов'язано з формуваннями високонапруженого стану системи [13]. В епоксикомполитних покриттях, наповнених порошком фулеренової черні, композиції яких піддавались впливу фізичних полів не виявлено

дефектів поверхневого шару після досліджень в умовах знакозмінних температур (рис. 4, д, ж). Аналогічні результати отримано для епоксикомполитних покриттів, наповнених карбонільним залізом, у випадку попередньої обробки композицій в електромагнітному полі (рис. 4, є).

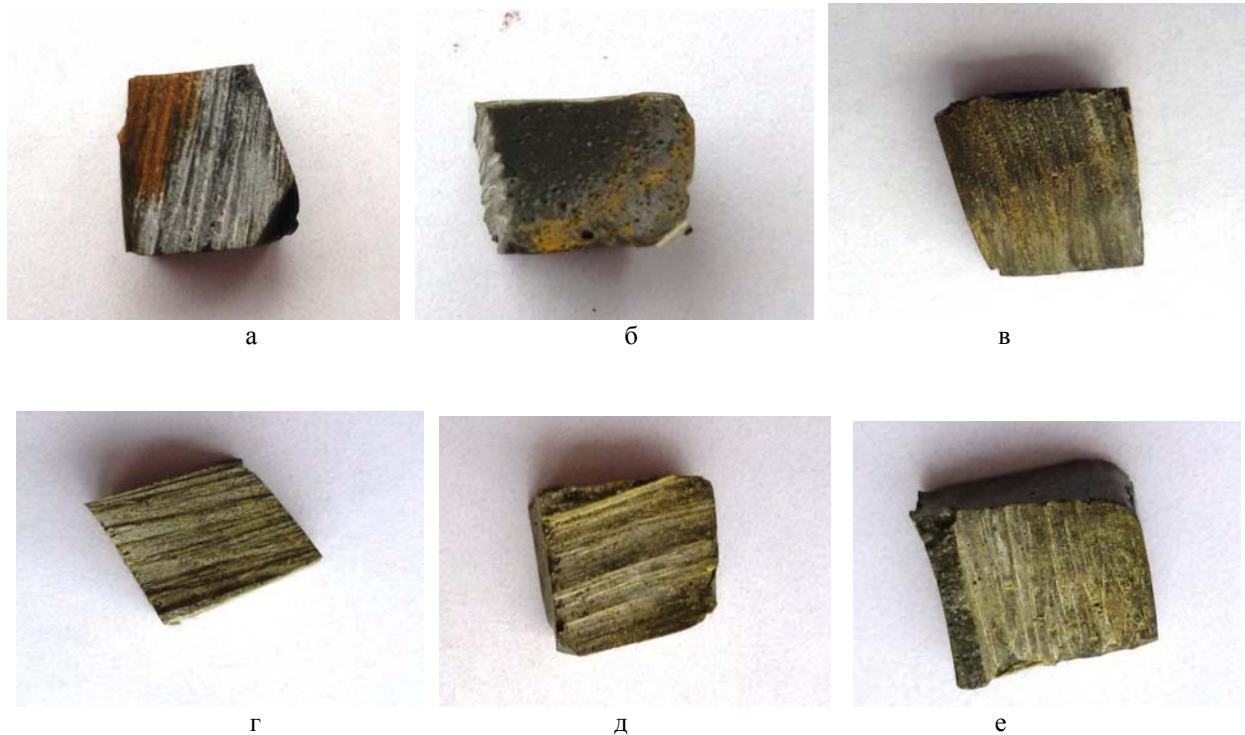


Рис. 3. Загальний вигляд епоксикомполитних зразків після досліджень на корозійну стійкість: а, б – епоксикомполит з порошком цирконію; в, г – епоксикомполит з порошком карбонільного заліза; д, е – епоксикомполит з порошком заліза марки ПЖР-3; а, в, д – H_2SO_4 ; б, г, е – HNO_3

Таблиця 2 – Критерій стійкості епоксикомполитних покриттів до впливу знакозмінних температур

Склад епоксикомполитного покриття	Обробка у фізичному полі	Ступінь розтріскування
Покриття з порошком карбонільного заліза	Без обробки	0,55
	Обробка ультразвуком	0,33
	Обробка в електромагнітному полі	1
Покриття з порошком фулеренової черні	Без обробки	0,1
	Обробка ультразвуком	1
	Обробка в електромагнітному полі	1
Покриття з порошком цирконію	Без обробки	0,88
	Обробка ультразвуком	1
	Обробка в електромагнітному полі	1

Епоксикомполитні покриття, наповнені порошком цирконію, без обробки композицій у фізичному полі мають досить високий ступінь розтріскування ($P = 0,88$) та характеризуються наявністю незначних тріщин на поверхні (рис. 4, в), які виникають за рахунок недостатнього змочування поверхні частинок, що призводить до утворення мікродфектів. Підвищену тріщиностійкість мають покриття, наповнені високо-

дисперсним порошком цирконію ($P = 1$) з попередньою обробкою композицій ультразвуком або в електромагнітному полі. Візуально встановлено, що покриття залишається цілісним, без зовнішніх дефектів (рис. 4, е, з), оскільки вплив зовнішніх полів забезпечує високу адгезійну міцність на межі розділу фаз в системі «матриця – наповнювач» та кращу стійкість до впливу знакозмінних температур.

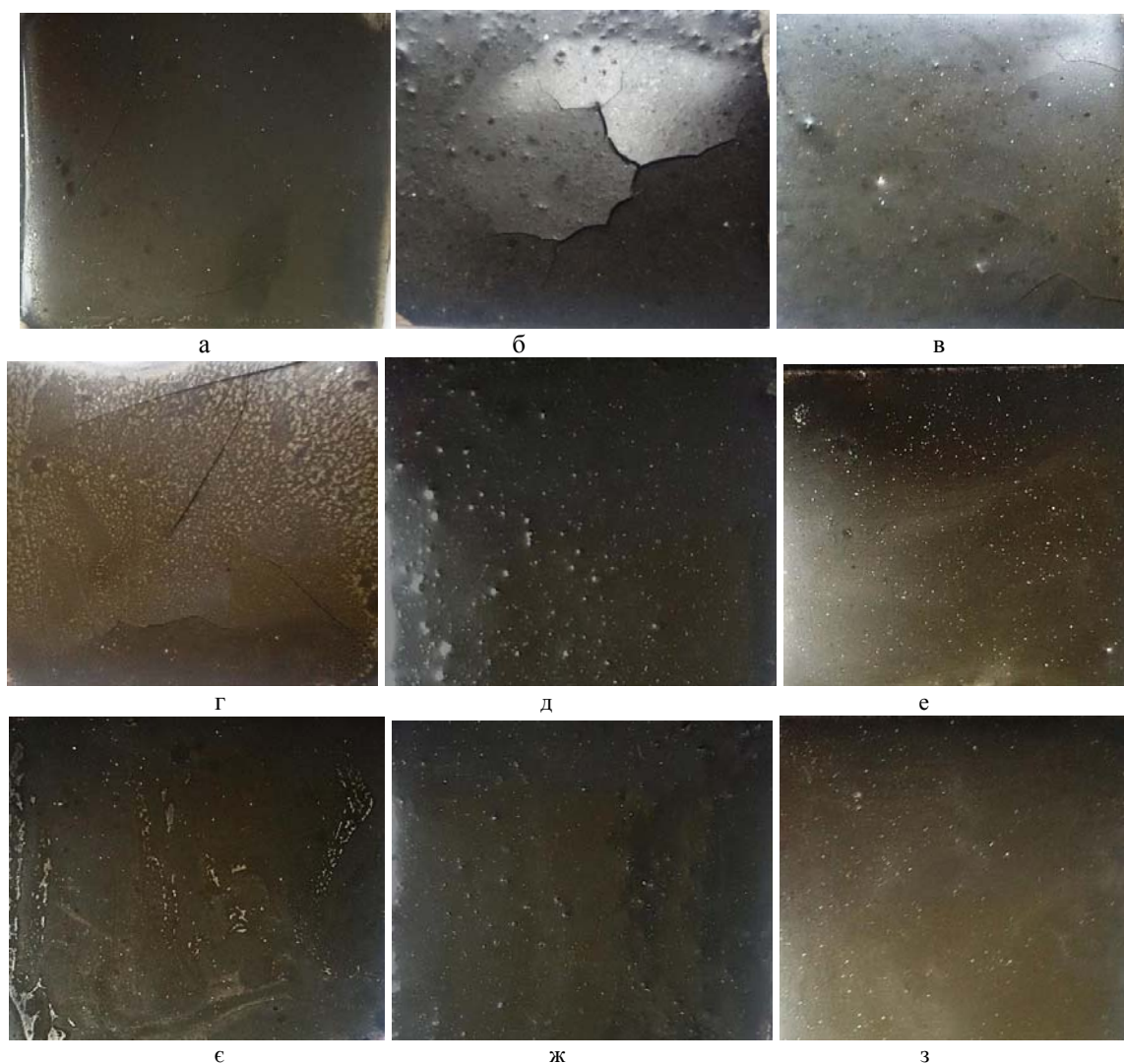


Рис. 4 – Загальний вигляд поверхні після впливу знакозмінних температур епоксикомпозитних покриттів, наповнених: а, г, е – карбонільним залізом; б, д, ж – фулереновою чорною; в, е, з – цирконієм; з попередньою обробкою композиції: а, б, в – без обробки; г, д, е – обробка ультразвуком; є, ж, з – обробка в електромагнітному полі

Висновки. Експериментально встановлено, що найвищу хімічну стійкість мають епоксикомпозити, наповнені порошком фторопласту в кількості 6 мас. ч., оскільки даний наповнювач є хімічно інертним та виступає перешкодою для проникнення агресивного середовища за рахунок високої адгезійної міцності на межі розділу фаз в результаті обробки композиції в електромагнітному полі, що забезпечує зменшення коефіцієнту дифузії молекул хімічної речовини. Підтверджено позитивний вплив обробки композицій у фізичних полях на підвищення тріщиностійкості епоксикомпозитних покриттів в умовах впливу знакозмінних температур від (-40) до (+60), оскільки дана обробка забезпечує рівномірний розподіл наповнювача у композиті, покращує змочування високодисперсних частинок та активує макромолекули епоксидної матриці, що призводить до покращення міжфазної взаємодії та зниження залишкових напружень в системі, що значно розширює температурний діапазон застосування захисних полімеркомпозитних покриттів.

Список літератури:

1. Антонова, Е. А. Стойкость радиационно-защитных серных композитов к воздействию агрессивных сред [Текст] / Е. А. Антонова С. А. Болтышев, А. М. Данилов // Молодой ученый. – 2014. – № 62. – С. 253–256.
2. Привалко, В. П. Основы теплофизики и реофизики полимерных материалов [Текст] / В. П. Привалко, В. В. Новиков, Ю. Г. Яновский. – Научная мысль, 1991. – 232 с.
3. Бартнев Г. М. Прочность и механика разрушения полимеров [Текст] / Г. М. Бартнев. – Москва: Химия, 1984. – 280 с.
4. Санжаровский, А. Т. Физико-механические свойства полимерных и лакокрасочных покрытий [Текст] / А. Т. Санжаровский. – Москва: Химия, 1978. – 184 с.
5. Панишин, Ю. А. Фторопласты [Текст] / Ю. А. Панишин, С. Г. Малкевич, Ц. С. Дунаевская. – Ленинград: Химия, 1978. – 232 с.
6. Семенов, Ю. І. Нанокompозити фторопласт-4. Вуглецеві нанотрубки. Одержання, структура та механічні властивості [Текст] / Ю. І. Семенов, М. Л. Пятковський, Н. А. Гаврилюк // Хімічна промисловість України, 2009. – № 5. – С. 59–64.
7. Шиков, А. К. Современное состояние и перспективы развития производства циркония и его сплавов и изделий из них [Текст] / А. К. Шиков, А. Д. Никулин, А. В. Никулина // Физика и химия обработки материалов, 2001. – № 6. – С. 5–14.
8. Карякина, М. И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий [Текст] / М. И. Карякина. – Москва: Химия, 1988. – 272 с.

9. Замышляева, О. Г. Методы исследования современных полимерных материалов [Текст]: учебно-метод. пос. / О. Г. Замышляева. – Нижний Новгород: НГУ, 2012. – 90 с.
10. Карякина, М. И. Лабораторный практикум по испытанию лакокрасочных материалов и покрытий [Текст] / М. И. Карякина. – Москва: Химия, 1977. – 234 с.
11. Букетов, А. В. Дослідження епоксикомполімерів, що містять модифіковані олігомерами наповнювачі [Текст] / А. В. Букетов, П. Д. Стухляк, В. І. Левицький, М. Ю. Долгов // Вісник ТДТУ. – 2004. – № 2 (2). – С. 14–21.
12. Букетов, А. В. Дослідження властивостей модифікованих епоксикомполімерів під впливом теплового поля [Текст] / А. В. Букетов // Вісник ТДТУ. – 2004. – № 3. – С. 34–38.
13. Букетов, А. В. Розробка та впровадження епоксикомполімерних покриттів з підвищеними експлуатаційними характеристиками [Текст] / А. В. Букетов, О. О. Сапронов, Л. Л. Моїсєнко, Т. І. Івченко // Науковий вісник НЛТУ. – 2014. – № 24 (1). – С. 141–146.
5. Panshin, Ju. A., Malkevich, S. G., Dunaevskaja, C. S. (1978). Ftoroplasty. Leningrad: Himija, 232.
6. Semenczov, Yu. I., Pyatkovs'kyj, M. L., Gavrylyuk, N. A. (2009). Nanokompozyty ftoroplast-4. Vuglecevi nanotrubky. Odezhanyna, struktura ta mexanichni vlasty'vosti. Ximichna promy'slovist' Ukrayiny, 5, 59–64.
7. Shikov, A. K., Nikulin, A. D., Nikulina, A. V. (2001). Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija proizvodstva cirkonija i ego splavov i izdelij iz nih. Fizika i himija obrabotki materialov, 6, 5–14.
8. Karjakina, M. I. (1988). Ispytanie lakokrasochnyh materialov i pokritij. Moscow: Himija, 272.
9. Zamyshljaeva, O. G. (2012). Metody issledovaniya sovremennyh polimernyh materialov. Nizhnij Novgorod: NGU, 90.
10. Karjakina, M. I. (1977). Laboratornyj praktikum po ispytaniyu lakokrasochnyh materialov i pokritij. Moscow: Himija, 234.
11. Buketov, A. V., Buketov, A. V., Stuxlyak, P. D., Levy'cz'ky'j, V. I., Dolgov, M. Yu. (2004). Doslidzhennya epoksy'kompozy'tiv, shho mistyat' mody'fikovani oligomeramy' napovnyuvachi. Visny'k TDTU, 2 (2), 14–21.
12. Buketov, A. V. (2004). Doslidzhennya vlasty'vostej mody'fikovany'x epoksy'kompozy'tiv pid vply'vom teplovogo polya. Visny'k TDTU, 3, 34–38.
13. Buketov, A. V., Saproinov, O. O., Moiseyenko, L. L., Ivchenko, T. I. (2014). Rozrobka ta vprovadzheniya epoksy'kompozy'tny'x pokry'ttiv z pidvy'shheny'my' ekspluatacijny'my' xaraktery'sty'kamy. Naukovy'j visny'k NLTU, 24 (1), 141–146.

Bibliography (transliterated):

1. Antonova, E. A., Boltyshev, S. A., Danilov, A. M. (2014). Stojkost' radiacionno-zashhitnyh sernyh kompozitov k vozdeystviyu agressivnyh sred. Molodoy uchenyj, 62, 253–256.
2. Privalko, V. P., Novikov, V. V., Janovskij, Ju. G. (1991). Osnovy teplofiziki i reofiziki polimernyh materialov. Nauchnaja mysl', 232.
3. Bartenev G. M. (1984). Prochnost' i mehanika razrusheniya polimerov. Moscow: Himija, 280.
4. Sanzharovskij, A. T. (1978). Fiziko-mehaniicheskie svojstva polimernyh i lakokrasochnyh pokritij. Moscow: Himija, 184.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Термоциклічна та корозійна стійкість епоксикомполімерів модифікованих у фізичних полях/ В. П. Кашицький, В. М. Малець, С. М. Щеглов// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.12–17. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.

Термоциклическая и коррозионная стойкость эпоксикомполитов модифицированных в физических полях/ В. П. Кашицкий, В. М. Малец, С. М. Щеглов// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.12–17. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.

Thermal cyclic corrosion resistance and epoxy composites modified by physical fields / V. Kashytskyi, V. Malets, S. Scheglov//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221). – P.12–17. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кашицький Віталій Павлович – кандидат технічних наук, Луцький національний технічний університет, доцент кафедри "Матеріалознавства та пластичного формування конструкцій машинобудування"; вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна, 43018, e-mail: kashickij@ya.ru.

Малець Вікторія Михайлівна – асистент, Луцький національний технічний університет, асистент кафедри "Матеріалознавства та пластичного формування конструкцій машинобудування"; вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна, 43018, e-mail: viktorya272@gmail.com

Щеглов Сергій Миколайович – аспірант, Луцький національний технічний університет, аспірант кафедри "Матеріалознавства та пластичного формування конструкцій машинобудування"; вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна, 43018,

Кашицкий Виталий Павлович – кандидат технических наук, Луцкий национальный технический университет, доцент кафедры "Материаловедения и пластического формирования конструкций машиностроения"; ул. Львовская, 75, г. Луцк, Украина, 43018, e-mail: kashickij@ya.ru.

Малец Виктория Михайловна – ассистент, Луцкий национальный технический университет, ассистент кафедры "Материаловедения и пластического формирования конструкций машиностроения"; ул. Львовская, 75, г. Луцк, Украина, 43018, e-mail: viktorya272@gmail.com

Щеглов Сергей Николаевич – аспирант, Луцкий национальный технический университет, аспирант кафедры "Материаловедения и пластического формирования конструкций машиностроения"; ул. Львовская, 75, г. Луцк, Украина, 43018,

Kashytskyi Vitalii – candidate of technical sciences, associate professor, Lutsk National Technical University, Department of Materials Science and Engineering constructions plastic forming; Lvivska str., 75, Lutsk, Ukraine, 43018, **Malets Viktoriya** – assistant, Lutsk National Technical University, Department of Materials Science and Engineering constructions plastic forming; Lvivska str., 75, Lutsk, Ukraine, 43018, e-mail: viktorya272@gmail.com

Scheglov Sergii – postgraduate student, Lutsk National Technical University, Department of Materials Science and Engineering constructions plastic forming; Lvivska str., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА КОМПЛЕКСАМИ

УДК 629.58 : 681.53

О. В. БЛІНЦОВ

ОПТИМІЗАЦІЯ ДОВЖИНИ КАБЕЛЬ-ТРОСА ПРИ КЕРУВАННІ РУХОМ ПРИВ'ЯЗНОГО ТЕЛЕКЕРОВАНОВОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА

На основі аналізу отриманої автором раніше інверсної математичної моделі квазістационарного руху кабель-троса (КТ) підводного комплексу з гнучкими зв'язками встановлено, що застосування коефіцієнтів подібності інверсної моделі КТ дає змогу виразити оптимальну за критерієм мінімізації сили натягу довжину випущеної частини КТ в залежності від масштабованої горизонтальної координати його ходового кінця. Синтезовано аналітичну залежність, яка дає змогу розраховувати оптимальну за критерієм мінімізації сили натягу довжину кабель-троса при керуванні прив'язним телекерованим підводним апаратом.

Ключові слова: підводний комплекс, оптимізація довжини кабель-троса, керування прив'язним підводним апаратом

На основе анализа полученной автором ранее инверсной математической модели квазистационарного движения кабель-троса (КТ) подводного комплекса с гибкими связями установлено, что применение коэффициентов подобия инверсной модели КТ дает возможность выразить оптимальную по критерию минимизации силы натяжения длину выпущенной части КТ в зависимости от масштабированной горизонтальной координаты его ходового конца. Синтезирована аналитическая зависимость, которая позволяет рассчитывать оптимальную по критерию минимизации силы натяжения длину кабель-троса при управлении привязным телеуправляемым подводным аппаратом.

Ключевые слова: подводный комплекс, оптимизация длины кабель-троса, управление привязным подводным аппаратом

A wide range of underwater operations is performed with the use of underwater complexes with flexible tethers (UCFT), which include surface vessels, umbilical cables (UC) and remotely operated underwater vehicles (ROV). The UC has a major disturbing impact on the ROV. Reducing this impact by the UC released part length optimization is a pressing scientific problem.

The UC quasi-stationary motion direct and inverse mathematical models are considered. The UC optimum length is typically determined by an iterative search using the UC inverse model. The equations of the similarity coefficients, which make up the UC inverse model are analyzed. It is found that their application allows expressing the optimum, in terms of tension force minimization, UC released part length, based on the scaled horizontal coordinate of its running end. By approximation and by scaling the UC optimum length iterative search results, the analytical dependence that allows calculating the optimum, in terms of tension force steady-state component minimization, UC length in the ROV control is synthesized. The dependence is implemented by simple computational procedures and can be used in the development of UCFT automatic control systems.

Keywords: underwater complex, umbilical cable length optimization, tethered underwater vehicle control.

Вступ. Підводні комплекси з гнучкими зв'язками (ПКГЗ) утворюють широкий клас підводної техніки і застосовуються для виконання пошукових, інспекційних, науково-дослідних та виробничих задач [1].

Типовий одноланковий ПКГЗ містить телекерований підводний апарат (ТПА), який кабель-тросом (КТ) з'єднано з постом керування (ПК), розташованим на надводному судні забезпечення (СЗ) [2]. Довжина випущеної частини КТ регулюється кабельною лебідкою (КЛ) (рис. 1).

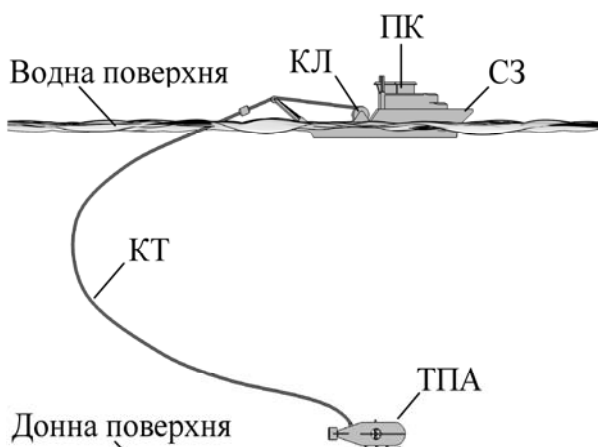


Рис. 1 – Одноланковий підводний комплекс з гнучкими зв'язками

З позиції керування будь-який ПКГЗ складається з двох типів елементів: об'єктів із зосередженими та з розподіленими параметрами [3]. До перших належать морські рухомі об'єкти (МРО) – судна забезпечення та підводні апарати, до других належать гнучкі зв'язки – кабель-троси, кабель-буксири тощо.

Основними режимами роботи одноланкових ПКГЗ є:

- робота ТПА з якорної стоянки СЗ;
- робота ТПА з СЗ, обладнаного засобами динамічного позиціонування;
- робота ТПА з СЗ, що дрейфує;
- узгоджений керований рух ТПА та СЗ.

Для багатоланкових ПКГЗ означені режими характерні для їх ланок. При цьому в ролі СЗ виступає МРО, на якому закріплено корінний кінець гнучкого зв'язку, в ролі ТПА виступає МРО, на якому закріплено ходовий кінець гнучкого зв'язку.

Зазвичай рух елементів ПКГЗ здійснюється в умовах силового гідродинамічного впливу потоку води. При якорній стоянці СЗ цей вплив обумовлено течією, при узгодженому русі елементів ПКГЗ – набігаючим потоком води. Тобто в цілому рух елементів ПКГЗ здійснюється не тільки по відношенню до ґрунту, а також і по відношенню до водної товщі. У зв'язку з цим основний збурюючий вплив на ТПА чинить КТ внаслідок його взаємодії з потоком води. Це суттєво обмежує робочу зону та зменшує швидкість руху ТПА.

© О. В. Блінциов. 2016

Зменшення цього впливу шляхом оптимізації довжини випущеної частини КТ є актуальною науковою задачею. Під квазістаціонарним режимом розуміють режим руху КТ малими прискореннями, коли приєднаними масами води можна знехтувати з-за їх незначної величини у порівнянні з іншими силами гідродинамічної природи [4].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Оптимізація довжини випущеної частини КТ є однією з задач теорії проектування та автоматизації ПКГЗ. Автоматизації елементів ПКГЗ (надводних суден та підводних апаратів) присвячено ряд наукових публікацій.

Систему обходу перешкод та планування траєкторії для безпечного надводного судна запропоновано в [5]. Систему автоматичної стабілізації надводного судна покровим методом «бекстепінг» запропоновано в [6]. Систему автоматичного керування чотирма ступенями свободи ТПА запропоновано в [7]. Систему високоточного керування глибиною ПА на основі адаптивного нечіткого регулятора в режимі ковзання запропоновано в [8]. Інверсний регулятор одновимірним рухом ТПА запропоновано в [9]. В даних роботах синтезуються САК МРО, проте вплив КТ на їх рух та на роботу САК у цілому не досліджується.

Для моделювання МРО широко застосовуються методи, основані на його представленні як твердого тіла, та методи обчислювальної гідродинаміки [10]. В [11] пропонується симулятор руху судна, в якому враховується його взаємодія з іншими суднами та з ґрунтом при зіткненні. В [12] розроблено симулятор руху судна засобами програмного середовища з відкритим вихідним кодом. Математичну модель руху надводного судна в процесі розвороту представлено в [13]. Робота [14] присвячена дослідженню просторового руху ТПА засобами комп'ютерного моделювання. В [15] розроблено моделюючий комплекс для дослідження нечіткого регулятора ТПА. Проте в даних роботах не враховується збурюючий вплив КТ на МРО.

Відомо про дослідження ПКГЗ з використанням моделі усталеного впливу КТ на ТПА [16]. Також відомо про дослідження окремих рухів ПКГЗ з буксирними підводними апаратами з використанням спрощених математичних моделей динаміки КТ. В [17] представлено тривимірну модель гідродинаміки підводної буксированої системи. В [18] досліджено круговий горизонтальний маневр буксированої системи.

Дослідження [19] присвячено синтезу САК КЛ, проте в роботі не наводяться відомості про спосіб оптимізації довжини КТ. В [20] розраховується оптимальна довжина КТ нульової плавучості для константної глибини ТПА, при цьому застосовується ітеративний метод пошуку розрахунку.

Опубліковані наукові дослідження, які стосуються ПКГЗ, присвячені в основному синтезу систем автоматичного керування (САК) рухом надводних суден та ТПА, а також розробці математичних моделей ПКГЗ та дослідженню гідродинамічних властивостей МРО. Дослідження в напрямку оптимізації довжини випущеної частини КТ проведено для окремих варіантів кінематичних параметрів елементів ПКГЗ. Відомості про узагальнення отриманих результатів та про можливість їх використання для керованої зміни довжини випущеної час-

тини КТ для мінімізації гідродинамічного впливу на ПКГЗ в науковій літературі не наводяться.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є синтез аналітичної залежності для розрахунку оптимальної довжини випущеної частини кабель-троса нульової плавучості за критерієм мінімізації усталеної складової сили натягу на його ходовому кінці як теоретичної основи для побудови систем автоматичного керування підводними комплексами з гнучкими зв'язками.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано наступні задачі:

– проаналізовано інверсну модель усталеного руху КТ в потоці води;

– синтезовано залежність між координатами ТПА, швидкістю набігаючого потоку води та оптимальною за критерієм мінімізації сили натягу довжиною КТ.

Матеріали та методи оптимізації довжини випущеної частини кабель-троса. Відомо, що мінімум сили гідродинамічного опору КТ забезпечується при його випущеній довжині у 2,5 рази більшій, ніж глибина занурення ТПА [2]. Таке співвідношення справедливе для випадку, коли ТПА знаходиться під СЗ. Для інших конфігурацій ПКГЗ (взаємних розташувань СЗ та ТПА) оптимальна довжина КТ буде відрізнятися від цієї величини.

Задача оптимізації довжини випущеної частини КТ за критерієм мінімізації сили натягу має сенс для квазістаціонарних режимів його руху в потоці води. Це обумовлено тим, що безпосередньо в процесі динамічної зміни довжини КТ, тобто при його випусканні або підбиранні, сили натягу на його кінцях суттєво відрізняються від сил, характерних для квазістаціонарного режиму. Але в динаміці мінімізація усталеної складової сили натягу також дасть змогу зменшити збурюючий вплив КТ на ТПА.

При дослідженні усталених рухів КТ зазвичай приймаються припущення про рівномірний розподіл швидкості набігаючого потоку води по глибини, про циліндричну форму КТ та про гладку поверхню його зовнішньої оболонки КТ. Також приймаються припущення щодо незмінності числа Рейнольдса (відношення сил інерції до сил в'язкості, які виникають в процесі обтікання) для досліджуваного діапазону швидкостей набігаючого потоку води. Такі припущення дають змогу звести задачу пошуку оптимальної довжини КТ до плоскої постановки і застосовувати його відповідну математичну модель [2]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dL} &= \cos(\alpha); \\ \frac{dy}{dL} &= \sin(\alpha); \\ \frac{d\alpha}{dL} &= \frac{1}{2} \rho C_n D \frac{v|v| \sin(\alpha) |\sin(\alpha)|}{F}; \\ \frac{dF}{dL} &= -\frac{1}{2} \rho C_t D v |v| \cos(\alpha) |\cos(\alpha)|, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де x – координата елемента КТ по осі абсцис; L – довжина випущеної частини КТ; α – кут між дотичною до елемента КТ і віссю абсцис; y – координата елемента КТ по осі ординат; ρ – густина води; C_n – коефіціє-

ент нормальної складової гідродинамічного опору КТ; D – діаметр КТ; v – абсолютне значення швидкості набігаючого потоку води; F – модуль сили натягу на елементі КТ; C_t – коефіцієнт тангенціальної складової гідродинамічного опору КТ.

Для гладких КТ циліндричної форми та для $v=0,1 \dots 3,0$ м/с значення гідродинамічних коефіцієнтів приймають наступними [21]:

$$C_n = 1; C_t = 0,1.$$

Математична модель (1) дає змогу розрахувати координати ходового кінця КТ по відношенню до корінного і представляє собою пряму модель КТ:

$$\vec{r}_{fast} = \vec{f}(\vec{F}_{root}, \vec{v}, L), \quad (2)$$

де \vec{r}_{fast} – радіус вектор, який з'єднує корінний кінець КТ з ходовим, тобто координати ходового кінця КТ, \vec{F}_{root} – вектор сили натягу на корінному кінці КТ, \vec{v} – вектор швидкості набігаючого потоку води.

В задачах моделювання та дослідження елементів ПКГЗ результати розрахунків, а також вхідні дані необхідно подавати по відношенню до ходового кінця КТ. Математичну модель КТ в такій формі нескладно отримати на основі (2), якщо замість \vec{F}_{root} підставити вектор сили натягу на ходовому кінці КТ \vec{F}_{fast} . Тоді в результаті розрахунку будуть отримані координати корінного кінця КТ \vec{r}_{root} по відношенню до ходового, на основі яких шляхом паралельного переносу отримуються координати ходового кінця КТ \vec{r}_{fast} . Інакше кажучи, пряму модель КТ можна представити в змінних, які стосуються лише його ходового кінця:

$$\vec{r}_{fast} = \vec{f}(\vec{F}_{fast}, \vec{v}, L). \quad (3)$$

Для розрахунку гідродинамічного впливу КТ на ТПА потребується інверсна модель КТ:

$$\vec{F}_{fast} = \vec{f}(\vec{r}_{fast}, \vec{v}, L). \quad (4)$$

Координати ходового кінця КТ \vec{r}_{fast} відповідають координатам ТПА, а вектор сили натягу \vec{F}_{fast} є збудуючим для ТПА.

Отримати інверсну модель (4) шляхом аналітичних перетворень, або розв'язку (3) неможливо, оскільки система рівнянь (1) прямої моделі КТ розв'язується чисельними методами. У зв'язку з цим для моделювання (4) застосовуються засоби апроксимації. Ефективним є застосування теорії подібності для інверсного моделювання КТ. Так в [22] автором розроблено інверсну модель усталеного руху КТ на основі коефіцієнтів подібності її параметрів:

$$k_L = \frac{L}{L^*}; \quad (5)$$

$$k_D = \frac{D}{D^*};$$

$$k_C = \frac{C_n}{C_n^*} = \frac{C_t}{C_t^*};$$

$$k_\rho = \frac{\rho}{\rho^*};$$

$$k_v = \frac{v}{v^*};$$

$$k_{sim} = k_L \cdot k_D \cdot k_{Cn} \cdot k_\rho \cdot k_v^2; \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{fast}^* &= \frac{x_{fast}}{k_L}; \\ y_{fast}^* &= \frac{y_{fast}}{k_L}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{fast(x)}^* &= k_{sim} F_{fast(x)}^*; \\ F_{fast(y)}^* &= k_{sim} F_{fast(y)}^*; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де $k_L, k_D, k_{Cn}, k_\rho, k_v$ – відповідно, коефіцієнти подібності по довжині КТ, діаметру КТ, коефіцієнтам нормальної або тангенціальної складової гідродинамічного опору КТ, густині води, швидкості потоку води; k_{sim} – коефіцієнт подібності силових характеристик КТ; $L, D_{cab}, C_n, C_t, \rho, V_f$ – задані параметри математичної моделі КТ; $L^*, D_{cab}^*, C_n^*, C_t^*, \rho^*, v^*$ – базові параметри математичної моделі КТ; x_{fast} та y_{fast} – задані складові вектора \vec{r}_{fast} в плоскій постановці задачі; x_{fast}^* та y_{fast}^* – базові складові базового вектора координат ходового кінця КТ \vec{r}_{fast}^* в плоскій постановці задачі; $F_{fast(x)}$ та $F_{fast(y)}$ – шукані складові вектора \vec{F}_{fast} в плоскій постановці задачі; $F_{fast(x)}^*$ та $F_{fast(y)}^*$ – відомі складові базового вектора сили натягу \vec{F}_{fast}^* в плоскій постановці задачі.

Застосування коефіцієнтів подібності дало змогу апроксимувати інверсну модель КТ, прийнявши більшу частину його параметрів константними, що суттєво знизило її складність:

$$\vec{F}_{fast}^* = \vec{f}(\vec{r}_{fast}^*). \quad (9)$$

Таким чином, на вхід апроксимованої моделі КТ подаються тільки два параметри: x_{fast}^* та y_{fast}^* , які розраховуються за допомоги рівнянь (7). В результаті отримуються апроксимовані значення складових $F_{fast(x)}^*$ та $F_{fast(y)}^*$ базового вектора сили натягу \vec{F}_{fast}^* , на основі яких за допомоги рівнянь (8) отримуються шукані складові вектора сили натягу \vec{F}_{fast} в плоскій постановці.

Перехід до просторових координат здійснюється із застосуванням рівнянь зв'язку між базовою системою координат (БСК) та кабельною системою координат (КСК). Базова система координат зв'язується з деякою точкою на поверхні землі, також приймається припущення про її інерційність [23]. Початок КСК

співпадає з корінним кінцем КТ, а її орієнтація визначається векторами \vec{r}_{fast} та \vec{v} [24]:

$$\begin{aligned}\hat{i}_c &= \{i_{cx}, i_{cy}, i_{cz}\}_B = \text{ort}(-\vec{v}); \\ \hat{k}_c &= \{k_{cx}, k_{cy}, k_{cz}\}_B = \text{ort}(\vec{r}_{fast} \times \hat{i}_c); \\ \hat{j}_c &= \{j_{cx}, j_{cy}, j_{cz}\}_B = \text{ort}(\hat{k}_c \times \hat{i}_c),\end{aligned}$$

де \hat{i}_c , \hat{j}_c , \hat{k}_c – базові вектори КСК; ort – векторна функція, яка розраховує одиничний вектор; індекс B означає, що координати векторів подано в проєкціях на осі БСК.

На початку розрахунку координати вектора \vec{r}_{fast} переводяться в КСК:

$$\begin{aligned}\vec{r}_{fast} &= \{x_b, y_b, z_b\}_B = \{x_{fast}, y_{fast}, z_{fast}\}_C; \\ \begin{bmatrix} x_{fast} \\ y_{fast} \\ z_{fast} \end{bmatrix} &= A^{-1} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix}; \\ A^T &= \begin{bmatrix} i_{cx} & i_{cy} & i_{cz} \\ j_{cx} & j_{cy} & j_{cz} \\ k_{cx} & k_{cy} & k_{cz} \end{bmatrix},\end{aligned}\quad (10)$$

де A – матриця зв'язку; індекс C означає, що координати векторів подано в проєкціях на осі КСК.

Координата z_{fast} завжди дорівнюватиме нулю, оскільки матрицю A сформовано таким чином, що всі елементи КТ будуть знаходитися в площині xOy КСК.

Далі на основі (7)–(9) розраховуються сили $F_{fast(x)}$ та $F_{fast(y)}$. Після цього із застосуванням матриці A вони переводяться в БСК:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} &= A \begin{bmatrix} F_{fast(x)} \\ F_{fast(y)} \\ 0 \end{bmatrix}; \\ \vec{F}_{fast} &= \{F_x, F_y, F_z\}_B.\end{aligned}\quad (11)$$

Апроксимована модель КТ, рівняння подібності параметрів моделі КТ та зв'язку між системами координат входять до складу інверсної моделі КТ (4) при розрахунках сил натягу в просторовій постановці задачі.

Оптимальна довжина КТ L_{opt} за критерієм мінімізації сили натягу на його ходовому кінці виконується шляхом пошуку екстремуму

$$|\vec{F}_{fast}(\vec{r}_{fast}, \vec{v}, L)| \rightarrow \min, L \in [|\vec{r}_{fast}|, \infty).$$

Оскільки інверсна модель КТ (4) задана не в аналітичному виді, то пошук екстремуму необхідно здійснювати ітеративно. Відомо, що випускання КТ поступово зменшує силу натягу до певного значення, після чого сила натягу починає збільшуватись [20]. У зв'язку з цим для визначення L_{opt} застосовується метод лінійного перебору L . Також відомо, що при зміні L в межах $\pm 0,05L$ сила натягу змінюється не більше,

ніж на 1%. це дає змогу обирати ΔL в залежності від поточного значення L . Починаючи від $L = |\vec{r}_{fast}|$, величину L потрібно покроково збільшувати на величину приросту ΔL до початку зростання $|\vec{F}_{fast}|$. Величина L на початку зростання $|\vec{F}_{fast}|$ і є шуканою L_{opt} (рис. 2).

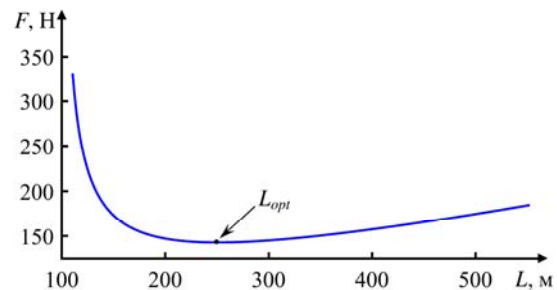


Рис. 2 – Залежність сили натягу F на ходовому кінці кабельтроса від довжини його випущеної частини L

Для виключення необхідності ітеративного способу розрахунку L_{opt} пропонується розрахувати L_{opt} для необхідних параметрів математичної моделі КТ та апроксимувати отримані значення. Застосування коефіцієнтів подібності та рівнянь зв'язку між плоскими (КСК) та просторовими (БСК) координатами дає змогу розраховувати базове значення оптимальної довжини КТ L_{opt}^* в залежності тільки від двох параметрів:

x_{fast}^* та y_{fast}^* . Таким чином, оптимальна довжина КТ залежить тільки від взаємного відносного розташування ходового та корінного кінців, якщо їх розташування розглядається в КСК, і не залежить від його діаметру, швидкості потоку води та інших параметрів моделі.

Аналіз коефіцієнтів подібності (5), (7) показує, що в цілому результати розрахунку $L_{opt}(x_{fast}, y_{fast})$ можна масштабувати по координаті y . Так, наприклад, якщо $L_{opt}(10, -100) = 255$ м, то для $x_{fast} = 1$ м та $y_{fast} = -10$ м в результаті застосування рівнянь подібності отримаємо $L_{opt}(1, -10) = 25,5$ м.

Таким чином, параметр y_{fast} можна прийняти рівним -1 та сформувати вибірку масштабованих значень оптимальної довжини КТ L_{opt}^s в залежності від масштабованої горизонтальної координати ходового кінця КТ x_{fast}^s :

$$L_{opt}^s = f(x_{fast}^s). \quad (12)$$

При відомій залежності (12) розрахунок L_{opt} буде виконуватись в такій послідовності:

1) завдання вхідних даних: координат ходового кінця КТ по відношенню до корінного у вигляді вектору $\vec{r}_{fast} = \{x_b, y_b, z_b\}_B$, а також вектору швидкості навігаючого потоку води \vec{v} (або його орту);

2) розрахунок координат $\vec{r}_{fast} = \{x_{fast}, y_{fast}, z_{fast}\}_C$ за допомогою рівняння (10);

3) визначення коефіцієнту масштабування k_s через координату y_{fast} на основі першого рівняння системи (7):

$$k_s = \frac{y_{fast}}{y_{fast}^s};$$

при цьому, враховуючи, що $y_{fast}^s = -1$ м, отримаємо

$$k_s = -y_{fast}; \tag{13}$$

4) розрахунок масштабованого значення горизонтальної координати ходового кінця КТ x_{fast}^s на основі другого рівняння системи (7):

$$x_{fast}^s = \frac{x_{fast}}{k_s}; \tag{14}$$

5) розрахунок масштабованого значення оптимальної довжини КТ L_{opt}^s на основі залежності (12);

6) розрахунок оптимальної довжини випущеної частини КТ L_{opt} на основі рівняння (5):

$$L_{opt} = k_s L_{opt}^s. \tag{15}$$

Об'єднавши співвідношення (10), (12)–(15) в єдиний алгоритм отримаємо залежність для L_{opt} наступного виду:

$$L_{opt} = f(\vec{r}_{fast}, \vec{v}).$$

Отримаємо залежність для масштабованого значення оптимальної довжини КТ (12). Для цього здійснимо пошук оптимальних масштабованих довжин КТ ітеративним способом. Результати наведено на рис. 3.

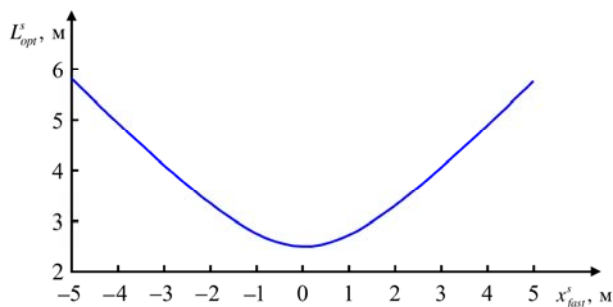


Рис. 3 – Залежність масштабованого значення довжини кабель-троса від масштабованого значення горизонтальної координати його ходового кінця

Аналіз отриманих результатів показує, що, поперше, отримана залежність симетрична відносно осі абсцис, по-друге її форма до $x_{fast}^s = 3$ м схожа на параболу, а далі L_{opt}^s збільшується майже лінійно. У зв'язку з цим залежність (12) пропонується апроксимувати наступним рівнянням:

$$L_{opt}^s = \begin{cases} a_0 + a_1 |x_{fast}^s| + a_2 (x_{fast}^s)^2, & \text{if } |x_{fast}^s| < b_0; \\ \frac{b_0}{|x_{fast}^s|} + b_1 |x_{fast}^s|, & \text{else,} \end{cases} \tag{16}$$

де $a_{0,1,2}$ та $b_{0,1}$ – константні коефіцієнти.

Друге рівняння системи містить пропорційну та показникову складові. Вибір такої форми другого рівняння обумовлено тим, що в цілому при зростанні x_{fast}^s лінійно зростає і L_{opt}^s . Але при відносно невеликих значеннях x_{fast}^s недостатньо лише пропорційної складової. На основі аналізу графіку, представленого рис. 3 було обрано такі коефіцієнти $b_{0,1}$:

$$b_0 = 3,0, b_1 = 1,015.$$

Коефіцієнти $a_{0,1,2}$ було визначено методом найменших квадратів:

$$a_0 = 2,4689, a_1 = 0,1461, a_2 = 0,1306.$$

В цілому вираз (16) апроксимує залежність (12) з точністю до $\pm 0,02L$, цього цілком достатньо для визначення оптимальної довжини КТ.

Обговорення результатів синтезу залежності для оптимізації довжини випущеної частини кабель-троса. Рівняння (16) дає змогу розраховувати оптимальну за критерієм мінімізації сили гідродинамічного опору довжину КТ в залежності від поточних координат ТПА та напрямку набігаючого потоку води. Застосування коефіцієнтів подібності параметрів математичної моделі КТ дало змогу сформулювати вибірку для оптимальних довжин КТ в залежності від одного параметру – горизонтальної (по відношенню до КСК) координати ходового кінця КТ. Це суттєво спростило кінцевий вид отриманого рівняння і дало змогу застосувати прості поліноміальні залежності при апроксимації отриманих вибірок.

Але слід зазначити, що отриманий результат буде справедливим лише для КТ нульової плавучості. При ненульовій плавучості з'являються додаткові сили, які в сукупності з гідродинамічними силами змінюють конфігурацію КТ в просторі. Як наслідок оптимальна довжина буде відрізнятися від отриманої за рівняннями (16). Також має виконуватись умова гладкості зовнішньої поверхні КТ. Якщо поверхня КТ має витий характер, то на ньому виникатимуть не тільки дотичні та нормальні, а також і бокові гідродинамічні сили. Як наслідок, його конфігурацію в просторі не можна буде розрахувати шляхом приведення до плоскої постановки задачі.

Отриманий результат може бути покладений в основу створення систем автоматичного керування ПКГЗ, в яких застосовуються КТ нульової плавучості.

Висновки

1. Проаналізовано інверсну модель квазістаціонарного руху кабель-троса підводного комплексу з гнучкими зв'язками в потоці води як об'єкта керування. Встановлено, що рівняння для визначення коефіцієнтів подібності параметрів інверсної моделі можуть бути використані у складі аналітичної залежності для розрахунку оптимальної за критерієм мінімізації усталеної складової сили натягу довжини кабель-троса.

2. Методом апроксимації та шляхом масштабування результатів ітеративного пошуку оптимальних довжин кабель-троса одноланкового підводного ком-

плексу з гнучкими зв'язками синтезовано аналітичну залежність, яка дає змогу розрахувати оптимальну за критерієм мінімізації усталеної складової сили натягу довжину кабель-троса в залежності від його координат та напрямку набігаючого потоку води та яка реалізується простими обчислювальними процедурами. Отримана залежність є теоретичним узагальненням процесу керування силовим гідродинамічним впливом кабель-троса на телекерований підводний апарат і може бути використана у складі систем автоматичного керування рухом підводних комплексів з гнучкими зв'язками.

Список літератури:

1. Antonelli, G. Underwater Robots [Text] / G. Antonelli. – Springer Tracts in Advanced Robotics. – 2014. – 279 p. doi: [10.1007/978-3-319-02877-4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02877-4)
2. Блинецов, В. С. Проектирование самоходных привязных подводных систем [Текст] / В. С. Блинецов, В. Э. Магула. – Киев: Наукова думка, 1997. – 140 с.
3. Dudykevych, V. Tasks statement for modern automatic control theory of underwater complexes with flexible tethers [Text] / V. Dudykevych, O. Blintsov // Eureka: Physics and Engineering. – 2016. – № 5. – P. 25–36. doi: [10.21303/2461-4262.2016.00158](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2016.00158)
4. Александров, М. Н. Судовые устройства [Текст]: справ. / М. Н. Александров. – Ленинград: Судостроение, 1987. – 656 с.
5. Soltan, R. A. ODE-based obstacle avoidance and trajectory planning for unmanned surface vessels [Text] / R. A. Soltan, H. Ashrafioun, K. R. Muske // Robotica. – 2010. – № 29 (5). – P. 691–703. doi: [10.1017/s0263574710000585](https://doi.org/10.1017/s0263574710000585)
6. Do, K. D. Global robust and adaptive output feedback dynamic positioning of surface ships [Text] / K. D. Do // Journal of Marine Science and Application. – 2011. – № 10 (3). – P. 325–332. doi: [10.1007/s11804-011-1076-z](https://doi.org/10.1007/s11804-011-1076-z)
7. García-Valdovinos, L. G. Modelling, Design and Robust Control of a Remotely Operated Underwater Vehicle [Text] / L. G. García-Valdovinos, T. Salgado-Jiménez, M. Bandala-Sánchez, L. Nava-Balanzar, R. Hernández-Alvarado, J. A. Cruz-Ledesma // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2014. – № 11 (1). – P. 1–16. doi: [10.5772/56810](https://doi.org/10.5772/56810)
8. Bessa, W. M. Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller [Text] / W. M. Bessa, M. S. Dutra, E. Kreuzer // Robotics and Autonomous Systems. – 2008. – № 56. – P. 670–677. doi: [10.1016/j.robot.2007.11.004](https://doi.org/10.1016/j.robot.2007.11.004)
9. Blintsov, O. Formation of a reference model for the method of inverse dynamics in the tasks of control of underwater complexes [Text] / O. Blintsov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/2 (82). – P. 42–50. doi: [10.15587/1729-4061.2016.74875](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.74875)
10. Stern, F. Computational ship hydrodynamics: nowadays and way forward [Text] / F. Stern, J. Yang, Z. Wang, H. Sadat-Hosseini, M. Mousaviraad, S. Bhushan, T. Xing // International Shipbuilding Progress. – 2013. – Vol. 60, Issue 1–4. – P. 3–105.
11. Yu, Zh. Full six degrees of freedom coupled dynamic simulation of ship collision and grounding accidents [Text] / Zh. Yu, J. Amdahl // Marine Structures. – 2016. – № 47. – P. 1–22. doi: [10.1016/j.marstruc.2016.03.001](https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2016.03.001)
12. Del Puppo, N. High resolution ship hydrodynamics simulations in open source environment [Text] / N. Del Puppo // Journal of Marine Science and Application. – 2014. – Vol. 13, Issue 4. – P. 377–387. doi: [10.1007/s11804-014-1278-2](https://doi.org/10.1007/s11804-014-1278-2)
13. Kalinichenko, Y. Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning [Text] / Y. Kalinichenko, I. Burmaka // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 6/9 (84). – P. 20–31. doi: [10.15587/1729-4061.2016.85839](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85839)
14. Deng, W. Study on Simulation of Remotely Operated Underwater Vehicle Spatial Motion [Text] / W. Deng, D. Han // Journal of Marine Science and Application. – 2013. – Vol. 12, Issue 4. – P. 445–451. doi: [10.1007/s11804-013-1215-9](https://doi.org/10.1007/s11804-013-1215-9)
15. Thekkedan, M. D. Virtual reality simulation of fuzzy-logic control during underwater dynamic positioning [Text] / M. D. Thekkedan, C. S. Chin, W. L. Woo // Journal of Marine Science and Application. – 2015. – № 14 (1). – P. 14–24. doi: [10.1007/s11804-015-1297-7](https://doi.org/10.1007/s11804-015-1297-7)
16. Fang, M. C. On the motions of the underwater remotely operated vehicle with the umbilical cable effect [Text] / M. C. Fang, C. S. Hou, J. H. Luo // Ocean Engineering. – 2007. – Vol. 34, Issues 8–9. – P. 1275–1289. doi: [10.1016/j.oceaneng.2006.04.014](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2006.04.014)
17. Srivastava, V. K. Analyzing parabolic profile path for underwater towed-cable [Text] / V. K. Srivastava // Journal of Marine Science and Application. – 2014. – Vol. 13, Issue 2. – P. 185–192. doi: [10.1007/s11804-014-1240-3](https://doi.org/10.1007/s11804-014-1240-3)
18. Yang, J. X. The dynamic research and position estimation of the towed array during the U-turn process [Text] / J. X. Yang, C. G. Shuai, L. He, S. K. Zhang, S. T. Zhou // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – № 744 (012068). – P. 1–7. doi: [10.1088/1742-6596/744/1/012068](https://doi.org/10.1088/1742-6596/744/1/012068)
19. Павлов, Г. В. Синтез системи автоматичного керування ледікою кабель-троса самохідної прив'язної підводної системи [Текст] / Г. В. Павлов, О. В. Блинецов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – № 4 (51). – С. 97–99.
20. Блинецов, О. В. Система автоматичного керування кабельною ледікою прив'язної підводної системи [Текст] / О. В. Блинецов, В. А. Надточій // Збірник наукових праць НУК. Електротехніка. – 2013. – № 1. – С. 77–82.
21. Войткунский, Я. И. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители [Текст] / Я. И. Войткунский, А. А. Русецкий. – Ленинград: Судостроение, 1985. – 763 с.
22. Блинецов, О. В. Автоматизация керування електрорушійною системою прив'язного підводного робота на основі штучної нейронної мережі [Текст] / Блинецов О. В. // Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – № 7. – С. 54–57.
23. Лукомский, Ю. А. Навигация и управление движением судов. Учебник. [Текст] / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов. – Элмор, 2002. – 360 с.
24. Блинецов, О. В. Синтез системи автоматичного керування упорами рушіїв прив'язного підводного апарата в режимі квазістаціонарного просторового руху [Текст] / О. В. Блинецов // Збірник наукових праць НУК. – 2008. – № 1 (418). – С. 135–141.

Bibliography (transliterated):

1. Antonelli, G. (2014). Underwater Robots. Springer Tracts in Advanced Robotics, 279. doi: [10.1007/978-3-319-02877-4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02877-4)
2. Blintsov, V. S., Magula, V. E. (1997). Proektirovanie samohodnykh privyaznykh podvodnykh sistem. Kyiv: Naukova dumka, 140.
3. Dudykevych, V., Oleksandr, B. (2016). Tasks statement for modern automatic control theory of underwater complexes with flexible tethers. Eureka: Physics and Engineering, 5, 25–36. doi: [10.21303/2461-4262.2016.00158](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2016.00158)
4. Aleksandrov, M. N. (1987). Sudovye ustrojstva. Leningrad: Sudostroenie, 656.
5. Soltan, R. A., Ashrafioun, H., Muske, K. R. (2010). ODE-based obstacle avoidance and trajectory planning for unmanned surface vessels. Robotica, 29 (05), 691–703. doi: [10.1017/s0263574710000585](https://doi.org/10.1017/s0263574710000585)
6. Do, K. D. (2011). Global robust and adaptive output feedback dynamic positioning of surface ships. Journal of Marine Science and Application, 10 (3), 325–332. doi: [10.1007/s11804-011-1076-z](https://doi.org/10.1007/s11804-011-1076-z)
7. García-Valdovinos, L. G., Salgado-Jiménez, T., Bandala-Sánchez, M., Nava-Balanzar, L., Hernández-Alvarado, R., Cruz-Ledesma, J. A. (2014). Modelling, Design and Robust Control of a Remotely Operated Underwater Vehicle. International Journal of Advanced Robotic Systems, 11 (1), 1–16. doi: [10.5772/56810](https://doi.org/10.5772/56810)
8. Bessa, W. M., Dutra, M. S., Kreuzer, E. (2008). Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller. Robotics and Autonomous Systems, 56, 670–677. doi: [10.1016/j.robot.2007.11.004](https://doi.org/10.1016/j.robot.2007.11.004)
9. Blintsov, O. (2016). Formation of a reference model for the method of inverse dynamics in the tasks of control of underwater complexes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4/2 (82), 42–50. doi: [10.15587/1729-4061.2016.74875](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.74875)
10. Stern, F., Yang, J., Wang, Z., Sadat-Hosseini, H., Mousaviraad, M., Bhushan, S., Xing, T. (2013). Computational ship hydrodynamics: nowadays and way forward. International Shipbuilding Progress, 60 (1–4), 3–105.
11. Yu, Zh., Amdahl, J. (2016). Full six degrees of freedom coupled dynamic simulation of ship collision and grounding accidents. Marine Structures, 47, 1–22. doi: [10.1016/j.marstruc.2016.03.001](https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2016.03.001)

12. Del Puppo, N. (2014). High resolution ship hydrodynamics simulations in open source environment. *Journal of Marine Science and Application*, 13 (4), 377–387. doi: [10.1007/s11804-014-1278-2](https://doi.org/10.1007/s11804-014-1278-2)
13. Kalinichenko, Y., Burmaka, I. (2016). Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(9(84)), 20–31. doi: [10.15587/1729-4061.2016.85839](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85839)
14. Deng, W., Han, D. (2013). Study on simulation of remotely operated underwater vehicle spatial motion. *Journal of Marine Science and Application*, 12 (4), 445–451. doi: [10.1007/s11804-013-1215-9](https://doi.org/10.1007/s11804-013-1215-9)
15. Thekkedan, M. D., Chin, C. S., Woo, W. L. (2015). Virtual reality simulation of fuzzy-logic control during underwater dynamic positioning. *Journal of Marine Science and Application*, 14 (1), 14–24. doi: [10.1007/s11804-015-1297-7](https://doi.org/10.1007/s11804-015-1297-7)
16. Fang, M. C., Hou, C. S., Luo, J. H. (2007). On the motions of the underwater remotely operated vehicle with the umbilical cable effect. *Ocean Engineering*, 34 (8–9), 1275–1289. doi: [10.1016/j.oceaneng.2006.04.014](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2006.04.014)
17. Srivastava, V. K. (2014). Analyzing parabolic profile path for underwater towed-cable. *Journal of Marine Science and Application*, 13 (2), 185–192. doi: [10.1007/s11804-014-1240-3](https://doi.org/10.1007/s11804-014-1240-3)
18. Yang, J. X., Shuai, C. G., He, L., Zhang, S. K., Zhou, S. T. (2016). The dynamic research and position estimation of the towed array during the U-turn process. *Journal of Physics: Conference Series*, 744 (012068), 1–7. doi: [10.1088/1742-6596/744/1/012068](https://doi.org/10.1088/1742-6596/744/1/012068)
19. Pavlov, G. V., Blinczov, O. V. (2008). Sy`ntez sy`stemy` avtomaty`chnogo keruvannya lebidkoyu kabel`-troasa samoxidnoyi pry`v'язnoyi pidvodnoyi sy`stemy. *Visnyk Kremenchucz`kogo derzhavnogo politexnichnogo universy`tetu imeni My`xajla Ostrograds`kogo*, 4 (51), 97–99.
20. Blinczov, O. V., Nadtochij, V. A. (2013). Sy`stema avtomaty`chnogo keruvannya kabel`noyu lebidkoyu pry`v'язnoyi pidvodnoyi sy`stemy. *Zbirnyk naukovy`x prac` NUK. Elektrotehnika*, 1, 77–82.
21. Vojtkunskij, Ya. Y., Ruseczkyj, A. A. (1985). *Gydromexanyka. Soproty`vleny`e dvy`zheny`yu sudov. Sudovye dvizhiteli. Leningrad: Sudostroenye*, 763.
22. Blinczov, O. V. (2008). Avtomaty`zacija keruvannya elektrorushijnoyu sy`stemoju pry`v'язnogo pidvodnogo robota na osnovi shtuchnoyi nejronnoyi mrezihi. *Problemy` suchasnoyi elektrotehniky*, 7, 54–57.
23. Lukomskij, Ju. A., Peshehonov, V. G., Skorohodov, D. A. (2002). *Navigacija i upravlenie dvizheniem sudov. Uchebnik. Jelmor*, 360.
24. Blinczov, O. V. (2008). Sy`ntez sy`stemy` avtomaty`chnogo keruvannya uporamy` rushiyiv pry`v'язnogo pidvodnogo aparata v rezhy`mi kvazistacionarnogo prostorovogo ruxu. *Zbirnyk naukovy`x prac` NUK*, 1 (418), 135–141.

Надійшла (received) 11.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оптимізація довжини кабель-троса при керуванні рухом прив'язного телекерованого підводного апарата/ О. В. Блінцов// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 49(1221). – С.18–24. – Бібліогр.: 24 назв. – ISSN 2079-5459.

Оптимизация длины кабель-троса при управлении движением привязного телеуправляемого подводного аппарата/ А. В. Блинцов// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 49(1221). – С.18–24. – Бібліогр.: 24 назв. – ISSN 2079-5459.

Umbilical cable length optimization at tethered remotely operated vehicle motion control/ О. Blintsov//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.18–24. – Bibliogr.: 24. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Блінцов Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», докторант кафедри захисту інформації; вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79000; e-mail: alex_blintsov@ukr.net

Блинцов Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет «Львовская политехника», докторант кафедры защиты информации; ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, Украина, 79000; e-mail: alex_blintsov@ukr.net

Blintsov Oleksandr – candidate of technical sciences, associate professor, Lviv Polytechnic National University; Doctoral candidate, Department of Information Security; S. Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, 79000; e-mail: alex_blintsov@ukr.net

УДК 004.274

А. А. БАРКАЛОВ, Л. А. ТИТАРЕНКО, И. Я. ЗЕЛЕНЕВА, С. С. ГРУШКО

МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ ЧИСЛА ТЕРМОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СХЕМЫ СОВМЕЩЕННОГО МИКРОПРОГРАММНОГО АВТОМАТА В БАЗИСЕ CPLD

Рассмотрена задача синтеза совмещенного микропрограммного автомата (СМПА) в базисе CPLD. Понятие «совмещенный» подразумевает, что схема функционирует одновременно и как автомат Мили, и как автомат Мура, что часто применяется в практике разработки цифровых систем. Выбор базиса CPLD объясняется его широким использованием в настоящее время. Внутренние макроячейки (PAL, PLA) микросхемы CPLD, на которых реализуется схема совмещенного автомата, имеют строгие ограничения по числу термов. В связи с этим, в работе предложен метод уменьшения числа термов, реализуемых в схеме СМПА. Метод основан на кодировании классов псевдоэквивалентных состояний автомата и позволяет существенно сократить аппаратные затраты в схеме за счет уменьшения необходимого числа макроячеек. Эффективность предложенного метода показана на примере синтеза СМПА по исходной граф-схеме алгоритма.

Ключевые слова: совмещенный микропрограммный автомат, CPLD, макроячейка, PAL, псевдоэквивалентные состояния, граф-схема

Розглянуто задачу синтезу суміщеного мікропрограмного автомату (СМПА) в базисі CPLD. Під поняттям «суміщений» мається на увазі, що схема функціонує одночасно як автомат Мілі та як автомат Мура, що часто використовується в практиці проектування цифрових схем. Вибір базису CPLD пояснюється його широким застосуванням в наш час. Внутрішні макрокомірки (PAL, PLA) мікросхеми CPLD, на яких реалізована схема суміщеного автомата, мають жорсткі обмеження щодо числа термів. У зв'язку з цим, в роботі запропоновано метод зменшення числа термів, які потрібно реалізувати в схемі СМПА. Метод засновано на кодуванні класів псевдоеквівалентних станів автомата, що дозволяє ефективно скоротити апаратні витрати в схемі за рахунок зменшення необхідного числа макрокомірок. Ефективність запропонованого методу показана на прикладі синтезу СМПА по граф-схемі алгоритму.

Ключові слова: суміщений мікропрограмний автомат, CPLD, макрокомірка, PAL, псевдоеквівалентні стани, граф-схема алгоритму.

We consider the problem of synthesis of the combined finite state machine (CFSM) in the basis CPLD. Notion "combined" means that the scheme operates as both Mealy and Moore FSM that is often used in the practice of the development of digital systems. Selecting the CPLD is due to its wide using today. The logic circuit of CFSM is implemented on internal macrocells (PAL, PLA) of CPLD chip, which are restrictive on the number of terms. Therefore, in this paper we propose a method to reduce the number of terms to be implemented in the scheme CFSM. The method is based on coding of classes pseudoequivalent states of CFSM and significantly reduces hardware expenses in the scheme by reducing the required number of macrocells. The effectiveness of the proposed method is shown by the example of the synthesis of CFSM on the original graph-scheme of algorithm.

Keywords: combined finite state machine, CPLD, macrocell, PAL, pseudoequivalent states, graph-scheme of algorithm.

Введение. Модель микропрограммного автомата (МПА) часто используется для реализации схем устройств управления [1, 2]. При синтезе МПА возникает ряд оптимизационных задач, одной из которых является задача уменьшения аппаратных затрат в схеме микропрограммного автомата [3, 4]. Решение этой задачи, как правило, позволяет уменьшить потребляемую мощность, необходимую для функционирования МПА, и увеличить его быстродействие [3–6]. Методы решения данной задачи во многом зависят от модели МПА и особенностей элементного базиса [5, 6].

В настоящей работе рассматривается метод синтеза совмещенного МПА (СМПА) в базисе CPLD (complex programmable array logic devices) с макроячейками типа PAL (programmable array logic). Понятие «совмещенный автомат» подразумевает, что МПА функционирует одновременно как автомат Мили и автомат Мура. Интерес авторов к модели СМПА объясняется практически полным отсутствием статей, связанных с синтезом схем такого автомата. При этом СМПА часто используется при реализации реальных цифровых систем [5]. Авторы данной статьи предложили ряд методов реализации схем СМПА в базисе FPGA (field programmable gate arrays) [7–9]. При этом необходимо отметить, что микросхемы CPLD также часто используются для реализации устройств управления [6, 10]. Этими факторами и объясняется интерес к развитию методов [8, 7] для базиса CPLD.

Анализ особенностей совмещенного автомата и базиса CPLD. Особенностью СМПА является наличие выходных сигналов двух типов [1]. Выходные переменные автомата Мили образуют

множество Y^1 , где $|Y^1| = N_1$. Выходные переменные автомата Мура образуют множество Y^2 , где $|Y^2| = N_2$. Множество выходных переменных $Y = \{y_1, \dots, y_N\}$ СМПА образуется как $Y^1 \cup Y^2$. При этом $Y^1 \cap Y^2 \neq \emptyset$ и $N_1 + N_2 = N$.

Таким образом, СМПА может быть представлен как вектор [1]:

$$S = \langle A, X, Y^1, Y^2, \delta, \lambda_1, \lambda_2, \alpha_1 \rangle. \quad (1)$$

В векторе (1) имеются следующие компоненты:

$A = \{\alpha_1, \dots, \alpha_M\}$ – множество внутренних состояний; $X = \{x_1, \dots, x_L\}$ – множество входных переменных; δ – функция переходов; λ_1 – функция выходов автомата Мили; λ_2 – функция выходов автомата Мура; $\alpha_1 \in A$ – исходные состояния СМПА.

Функции δ , λ_1 и λ_2 определяются следующим образом:

$$a_s = \delta(a_m, X), \text{ где } (a_m, a_s) \in A; \quad (2)$$

$$y_n = \lambda_1(a_m, X), \text{ где } y_n \in Y^1; \quad (3)$$

$$y_n = \lambda_2(a_m, X), \text{ где } y_n \in Y^2. \quad (4)$$

Функция δ служит для нахождения состояния перехода $a_s \in A$ в зависимости от текущего состояния $a_m \in A$ и вектора входных переменных. Как видно из (3), выходные переменные автомата Мили зависят от состояний и входных переменных. Из (4) следует, что выходные переменные автомата Мура зависят только от состояний.

© А. А. Баркалов, Л. А. Титаренко, И. Я. Зеленева, С. С. Грушко. 2016

Наличие функций (3) и (4) позволяет использовать для схемы СМПА известные методы оптимизации, эффективные как для МПА Мили, так и для МПА Мура. Это и есть главная особенность совмещенного микропрограммного автомата.

Микросхема CPLD состоит из макроячеек PAL [11, 12]. Каждая макроячейка представляет собой q программируемых схем «И», имеющих s общих входов. Схемы «И» соединены схемой «ИЛИ». Вход схемы «ИЛИ» может быть соединен (либо нет) с входом D-триггера. Триггер имеет входы синхронизации, обнуления и установки в единицу. Таким образом, выход макроячейки может быть комбинационным или регистровым. Макроячейки связаны между собой при помощи программируемой матрицы межсоединений. Эта же матрица связывает макроячейки с входами и выходами микросхемы.

Основной особенностью CPLD является достаточно небольшое значение параметра q ($q \leq 8$). Как правило, это приводит к необходимости раздельной минимизации булевских функций, задающих схему автомата [5, 6]. Целью минимизации является уменьшение числа термов в булевских функциях.

В настоящей работе предлагается один из возможных методов решения этой задачи. При этом СМПА синтезируется на основе граф-схемы алгоритма (ГСА) [1].

Реализация СМПА по граф-схеме алгоритма.

При синтезе СМПА имеется ряд этапов, которые не зависят от элементного базиса. К ним относятся [1]:

1. Отметка исходной ГСА состояниями $a_m \in A$.

2. Кодирование состояний $a_m \in A$ двоичными кодами $K(a_m)$ разрядности R , где

$$R = \lceil \log_2 M \rceil. \tag{5}$$

3. Построение прямой структурной таблицы (ПСТ) автомата.

4. Формирование систем функций, соответствующих (2)–(4) по ПСТ.

Коды состояний $a_m \in A$ хранятся в регистре RG, состоящем из R триггеров. В случае CPLD этот регистр распределен между ячейками PAL [10]. Триггеры имеют общие входы синхронизации, на которые получают импульс Clock, и обнуления, на которые поступает импульс Start. Для представления состояний используются внутренние переменные, образующие множество $T = \{T_1, \dots, T_R\}$. Для изменения содержимого RG используют функции возбуждения памяти, образующие множество $\varphi = \{D_1, \dots, D_R\}$. Переменная $D_r \in \varphi$ поступает на вход D r -го триггера ($r = \overline{1, R}$) распределенного регистра RG.

ПСТ совмещенного автомата строится по правилам [1] и включает следующие столбцы: a_m – текущее состояние; $K(a_m)$ – код состояния $a_m \in A$; a_s – состояние перехода; $K(a_s)$ – код состояния $a_s \in A$; x_h – входной сигнал, определяющий переход $\langle a_m, a_s \rangle$; Y_h^1 – набор входных переменных, формируемых на

переходе $\langle a_m, a_s \rangle$; φ_h – набор функций возбуждения, принимающих единичные значения для переключения регистра RG из $K(a_m)$ в $K(a_s)$; h – номер перехода ($h = \overline{1, H}$). Кроме того, в столбцах a_m записываются выходные переменные $y_n \in Y^2$, формируемые в состоянии $a_m \in A$.

На следующем этапе формируются функции, задающие схему СМПА:

$$\varphi = \varphi(T, X); \tag{6}$$

$$Y^1 = Y^1(T, X); \tag{7}$$

$$Y^2 = Y^2(T). \tag{8}$$

Система (6) определяет функцию переходов (2), система (7) – функцию выходов (3), и система (8) – соответственно, функцию (4).

Обозначим символом PALer схему, состоящую из элементов PAL. Из (6) и (7) следует, что функции (2) и (3) определяют схему с входами $x_i \in X$ и $T_r \in T$. Назовем ее схемой PALer1. Функция (8) соответствует схеме PALer2, имеющей только входы $T_r \in T$. Блок PALer1 включает регистр RG. Следовательно, блок PALer1 должен иметь входы Clock и Start. Системы (6)–(8) определяют структурную схему СМПА U_1 (рис. 1). Как следует из рис.1, выходами блока PALer1 являются внутренние переменные $T_r \in T$, а не функции $D_r \in \varphi$.

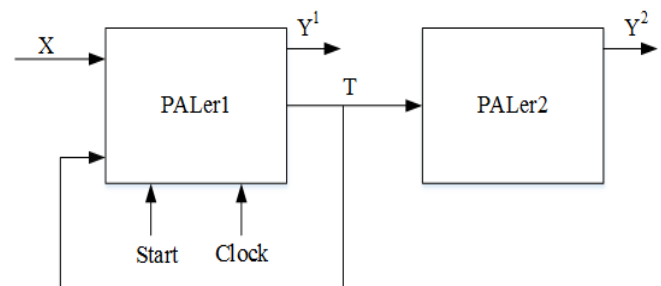


Рис. 1 – Структурная схема СМПА U_1

Функции (6), (7) зависят от термов F_h , соответствующих строкам ПСТ:

$$F_h = A_m \cdot X_h \quad (h = \overline{1, H}), \tag{9}$$

где A_m – конъюнкция переменных $T_r \in T$, соответствующая состоянию $a_m \in A$ из h -й строки ПСТ. Функции (6), (7) определяются следующим образом:

$$D_r = \bigvee_{h=1}^H C_{rh} F_h \quad (r = \overline{1, R}); \tag{10}$$

$$y_n = \bigvee_{h=1}^H C_{nh} F_h \quad (n = \overline{1, N_1}). \tag{11}$$

Здесь $C_{rh} (C_{nh})$ – булева переменная, равная 1,

если и только если переменная $D_r(y_n)$ записана в h -й строке ПСТ.

Функция (8) зависит от термов A_m и определяется следующим образом:

$$y_n = \bigvee_{m=1}^M C_{mn} A_m \quad (n = \overline{1, N_2}) \quad (12)$$

Здесь C_{mn} – булева переменная, равная 1, если и только если переменная $y_n \in Y^2$ формируется в состоянии $a_m \in A$.

Образуем множество функций $O = \varphi \cup Y$, включающее K элементов, где $K = R + N$. Пусть $H(O_k)$ – множество термов в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ) функции $O_k \in O$. Очевидно, уменьшение числа термов необходимо только для функций, у которых

$$q < H(O_k) \quad (k = \overline{1, K}). \quad (13)$$

Как правило, для минимизации систем функций $D_r \in \varphi$ и $y_n \in Y$ используют различные методы кодирования состояний [13–15]. В настоящей работе мы предлагаем метод оптимизации, основанный на наличии псевдоэквивалентных состояний (ПЭС) автомата Мура [15].

Предлагаемый метод синтеза СМПА с уменьшением числа термов. Состояния $(a_m, a_s) \in A$ являются псевдоэквивалентными, если отмеченные ими вершины ГСА Γ связаны с входом одной и той же вершины ГСА [15]. Это определение позволяет построить разбиение π_A множества A на классы ПЭС: $\pi_A = \{B_1, \dots, B_l\}$.

Закодируем классы $B_i \in \pi_A$ двоичными кодами $K(B_i)$ разрядности

$$R_i = \lceil \log_2 l \rceil. \quad (14)$$

Используем для кодирования классов ПЭС элементы множества $\tau = \{\tau_1, \dots, \tau_{R_i}\}$.

Очевидно, классы ПЭС соответствуют состояниям автомата Мили. Представим функции (6), (7) в следующем виде:

$$\varphi = \varphi(\tau, X); \quad (15)$$

$$Y^1 = Y^1(\tau, X). \quad (16)$$

Для кодирования классов $B_i \in \pi_A$ необходимо реализовать систему функций

$$\tau = \tau(T). \quad (17)$$

Сравнение функций (6) и (15), а также (7) и (16) показывает, что переменные $\tau_r \in \tau$ заменяют переменные $T_r \in T$. При этом функции (8) не меняются.

Проведенный анализ позволяет предложить модель U_2 (рис. 2).

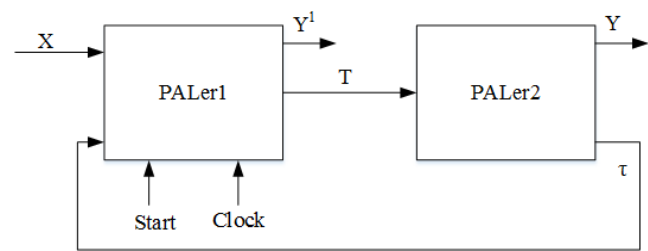


Рис. 2 – Структурная схема СМПА U_2

В СМПА U_2 блок PALer1 реализует функции (15) и (16). Блок PALer2 реализует системы (8) и (17).

Для синтеза схемы U_2 по ГСА необходимо построить ПСТ, которая отличается от ПСТ автомата U_1 . Отличие сводится к замене столбцов a_m и $K(a_m)$ столбцами B_i и $K(B_i)$ соответственно. При этом выполняется условие

$$H_1 < H, \quad (18)$$

где H_1 – число строк ПСТ автомата U_2 , эквивалентного автомату U_1 . Очевидно, автоматы U_1 и U_2 являются эквивалентными, если они синтезируются по одной и той же ГСА Γ .

Предлагаемый подход позволяет для эквивалентных автоматов U_1 и U_2 выполнить следующее:

1. Уменьшить число термов в функциях (15), (16) по сравнению с функциями (6) и (7), соответственно. Это следует из условия (18).

2. Кодирование состояний $a_m \in A$ автомата U_2 можно выполнить так, чтобы уменьшить число термов в функциях системы (8). Это возможно, так как коды $K(a_m)$ практически не влияют на число термов в функциях (15) и (16).

Недостатком U_2 является наличие системы (17), для реализации которой необходимы некоторые ресурсы кристалла. Однако кодирование состояний можно выполнить так, чтобы минимизировать число макроячеек PAL, необходимых для реализации системы (17).

В настоящей работе предлагается метод синтеза автомата U_2 , включающий следующие этапы:

1. Формирование отмеченной ГСА Γ .
2. Формирование разбиения π_A на множестве A .
3. Кодирование классов $B_i \in \pi_A$.
4. Кодирование состояний СМПА.
5. Формирование прямой структурной таблицы автомата U_2 .
6. Формирование систем функций, задающих схему U_2 .
7. Реализация схемы СМПА в заданном базисе.

Рассмотрим применение этого метода для случая ГСА Γ_1 (рис. 3).

Пример синтеза СМПА U_2 . Вершины ГСА Г1 отмечены состояниями автомата Мура [1]. Анализ ГСА Г1 позволяет найти следующие множества и их параметры: $A = \{a_1, \dots, a_9\}$, $M = 9$, $X = \{x_1, \dots, x_4\}$, $L = 4$, $Y^1 = \{y_1, \dots, y_5\}$, $N_1 = 5$, $Y^2 = \{y_6, \dots, y_{10}\}$, $N_2 = 5$, $N = 10$.

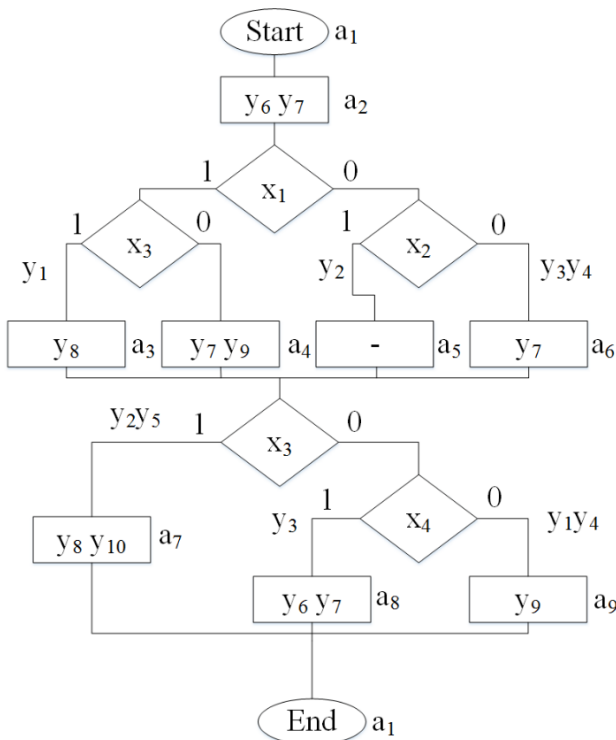


Рис. 3 – Исходная ГСА Г1

Используя определение ПЭС, найдем разбиение $\pi_A = \{B_1, \dots, B_4\}$. Итак, $I = 4$. Используя (5), найдем $R = 4$, что дает множество $T = \{T_1, \dots, T_4\}$ и $\varphi = \{D_1, \dots, D_4\}$. Используя (14), найдем $R_I = 2$, что дает множество $\tau = \{\tau_1, \tau_2\}$.

Для уменьшения числа термов в системе (17) закодируем классы $B_i \in \pi_A$ следующим образом: чем больше состояний включает класс, тем меньше единиц имеет его код. В нашем случае

$$B_1 = \{a_1\}, B_2 = \{a_2\}, B_3 = \{a_3, a_4, a_5\},$$

$$B_4 = \{a_7, a_8, a_9\}.$$

Закодируем классы $B_i \in \pi_A$ следующими кодами

$$K(B_3) = 00, K(B_1) = 01, K(B_2) = 10 \text{ и}$$

$$K(B_4) = 11.$$

Заметим, что класс (B_4) имеет код 11, так как переходы для этого класса не включаются в ПСТ. Это следует из ГСА Г1, для которой нет условных переходов в состояние a_1 из состояний $a_m \in B_4$. Таким образом, код 11 можно использовать для минимизации функций (17).

Для кодирования состояний построим систему функций, задающих связь между классами $B_i \in \pi_A$ (а также переменными $y_n \in Y^2$) и состояниями $a_m \in A$. В нашем случае это система (19):

$$B_1 = A_1; y_7 = A_2 \vee A_4 \vee A_6 \vee A_8;$$

$$B_2 = A_2; y_8 = A_3 \vee A_7;$$

$$B_3 = A_3 \vee A_4 \vee A_5 \vee A_6; y_9 = A_4 \vee A_9;$$

$$y_6 = A_2 \vee A_8; y_{10} = A_7.$$

Пусть для реализации СМПА U_2 используется CPLD, у которых параметры $s = 12$, $q = 3$. Из (13) следует, что оптимизация должна быть выполнена для функций B_3 и y_7 системы (19). Однако код $K(B_3) = 00$, поэтому класс B_3 не вносит термы в функции (17). Итак, оптимизация необходима только для функции y_7 . Закодируем состояния $a_m \in A$ так, как показано в карте Карно (рис. 4).

Состояния a_2, a_4, a_6, a_8 входят в куб 1 карты. Это дает $y_7 = T_2$. Кроме того, имеем $y_8 = T_1$. Следовательно, для реализации функций y_7 и y_8 не используются макроячейки. При этом нужно стремиться, чтобы состояния были закодированы с минимально возможным числом единиц. Это позволяет уменьшить число термов в системе (15).

Построим ПСТ автомата U_2 для нашего примера (табл. 1). Эта таблица имеет $H_1 = 8$ строк.

		$T_1 T_2$			
		00	01	11	10
$T_3 T_4$	00	a_1	a_2	*	a_3
	01	a_5	a_4	*	a_7
	11	*	a_8	*	*
	10	a_9	a_6	*	*

Рис. 4 – Коды состояний СМПА

Отметим, что в эквивалентном автомате U_1 ПСТ имеет $H = 17$ строк. Таким образом, наш подход позволяет в два раза уменьшить число термов в системах $D_r \in \phi$ и $y_n \in Y^1$ (для данного примера).

ПСТ используется для формирования функций (15) и (16). Например, из табл. 1 можно получить следующие функции:

$$D_1 = \overline{\tau_1} \overline{\tau_2} x_1 x_3 \vee \overline{\tau_1} \cdot \overline{\tau_2} x_3$$

$$y_1 = \overline{\tau_1} \overline{\tau_2} x_1 x_3 \vee \overline{\tau_1} \cdot \overline{\tau_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_4}$$

Таблиця 1 – ПСТ автомата U_2

B_i	$K(B_i)$	a_s	$K(a_s)$	X_h	Y_h^1	ϕ^i	h
B_1	01	a_2	0100	1	-	D_2	1
B_2	10	a_3	1000	$x_1 x_3$	y_1	D_1	2
		a_4	0101	$x_1 \overline{x_3}$	-	$D_2 D_4$	3
		a_5	0001	$\overline{x_1} x_2$	y_2	D_4	4
		a_6	0110	$\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}$	$y_3 y_4$	$D_2 D_3$	5
B_3	00	a_7	1001	x_3	$y_2 y_5$	$D_1 D_4$	6
		a_8	0111	$\overline{x_3} x_4$	y_3	$D_2 D_3 D_4$	7
		a_9	0010	$\overline{x_3} \cdot \overline{x_4}$	$y_1 y_4$	D_3	8

Системы функций (8) и (17) строятся на основе системы (19), карты Карно (рис. 4) и кодов классов $B_i \in \pi_A$. Уравнение для τ_1 строится на основе уравнения для B_2 , а для τ_2 - на основе B_1 . Итак, имеем следующие функции:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= T_2 \overline{T_3} \cdot \overline{T_4}; & y_7 &= T_2; & y_{10} &= T_1 T_4; \\ \tau_2 &= \overline{T_1} \cdot \overline{T_2} \cdot \overline{T_3} \cdot \overline{T_4}; & y_8 &= T_1; \\ y_6 &= T_2 \overline{T_3} \cdot \overline{T_4} \vee T_3 T_4; & y_9 &= T_2 \overline{T_3} T_4 \vee \overline{T_2} T_3; \end{aligned} \quad (20)$$

Для реализации систем (15), (16) достаточно $R+N_1 = 9$ макроячеек PAL, имеющих $q=3$. Для реализации системы (20) достаточно 5 макроячеек, что меньше чем $R_1+N_2=7$. Итак, для реализации схемы U_2 необходимо 14 макроячеек. Отметим, что для кодов (рис. 4) схема PALer1 автомата U_1 имеет 28 макроячеек, а PALer2 – всего 3. Таким образом, применение модели U_2 для нашего примера позволило в 2,2 раза уменьшить число макроячеек PAL по сравнению с моделью U_1 .

Выводы. В настоящей работе предлагается метод синтеза совмещенного МПА по ГСА, ориентированный на базис CPLD с макроячейками типа PAL. Метод основан на использовании классов псевдоэквивалентных состояний.

Применение метода позволяет уменьшить число термов в системе функций возбуждения памяти СМПА. Благодаря использованию ПЭС, число термов уменьшается до величины, соответствующей эквивалентному автомату Мили. Кроме того, кодирование состояний можно выполнить так, чтобы уменьшить аппаратные затраты в схеме, формирующей выходные переменные автомата Мура.

В работе показано, что минимизация подлагает только функции, для которых выполняется условие (13). Анализ библиотеки [16] показал, что это условие выполняется для 17–19 % функций, задающих схему автомата. Этот факт значительно упрощает метод кодирования состояний по сравнению с известными подходами.

Направлением дальнейших исследований является разработка методов синтеза СМПА, позволяющих исключить дополнительные переменные, кодирующие классы ПЭС. Кроме того, интерес представляет случай, когда число входов PAL меньше, чем $R+L$. В этом случае необходимо искать некоторые разбиения на множестве термов [10].

Список литературы:

1. Baranov, S. Logic and System Design of Digital Systems [Text] / S. Baranov. – Tallinn: TUT Press, 2008. – 267 p.
2. Micheli, G. Synthesis and Optimization of Digital Circuits [Text] / G. Micheli. – New York: Mc Graw-Hill, 1994. – 636 p.
3. Sklyarov, V. Synthesis and Optimization of FPGA-Based Systems [Text] / V. Sklyarov, I. Sklyarova, A. Barkalov, L. Titarenko. – Springer International Publishing, 2014. – 432 p. doi: [10.1007/978-3-319-04708-9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04708-9)
4. Sklyarova, I. Design of FPGA – based circuits using Hierarchical Finite State Machines [Text] / I. Sklyarova, V. Sklyarov, A. Sudnitson. – Tallinn: TUT Press, 2012. – 240 p.
5. Соловьев, В. В. Логическое проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем [Текст] / В. В. Соловьев, А. Климович. – Москва: Горячая Линия–Телеком, 2008. – 376 с.
6. Czerwinski, R. Finite State Machine Logic Synthesis for Complex Programmable Logic Devices [Text] / R. Czerwinski D. Kania. – Springer Science & Business Media, 2013. – 172 p.
7. Баркалов, А. А. Реалізація суміщеного мікропрограмного автомата в базісі FPGA [Текст] / А. А. Баркалов Л. А. Титаренко І. Я. Зеленева // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2015. – № 2. – С. 84–88.
8. Баркалов, А. А. Оптимізація схеми суміщеного автомата в базісі FPGA способом заміни вхідних змінних [Текст] / А. А. Баркалов, Л. А. Титаренко, І. Я. Зеленева, С. С. Грушко // Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти. – 2015. – № 6 (2). – С. 49 – 54.
9. Баркалов, А. А. Способы оптимизации схем совмещенных микропрограммных автоматов в базисе FPGA [Текст]: мат. межн. науч.-практ. конф. / А. А. Баркалов, И. Я. Зеленева, С. С. Грушко, Д. А. Михайлютенко // Современные проблемы и достижения в области радиотехники, телекоммуникаций и информационных технологий, 2016. – С. 281–282.
10. Barkalov, A. Reduction in the Number of PAL Macrocells in the Circuit of a Moore FSM [Text] / A. Barkalov, L. Titarenko, S. Chmielewski // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. – 2007. – № 17 (4). – P. 565–575. doi: [10.2478/v10006-007-0046-8](https://doi.org/10.2478/v10006-007-0046-8)
11. Accelerating the Smart and Connected World [Electronic resource]. – Available at: www.altera.com
12. All programmable [Electronic resource]. – Available at: www.xilinx.com

13. Villa, T. NOVA: state assignment of finite state machines for optimal two-level implementation [Text] / T. Villa, A. Sangiovanni-Vincentelli // IEEE Transactions on CAD of Integrated Circuits and Systems. – 1990. – № 9 (9). – P. 905–924. doi: [10.1109/43.59068](https://doi.org/10.1109/43.59068)
14. Yang, S. Optimum and suboptimum algorithms for input encoding and its relationships to logic minimization [Text] / S. Yang, M. J. Ciesielski // IEEE Transactions on CAD of Integrated Circuits and Systems. – 1991. – № 10 (1). – P. 4–12. doi: [10.1109/43.62787](https://doi.org/10.1109/43.62787)
15. Баркалов, А. А. Принципы оптимизации логической схемы микропрограммного автомата Мура [Текст] / А. А. Баркалов // Кибернетика и системный анализ. – 1998. – № 1. – С. 65–72.
16. Yang, S. Logic Synthesis and optimization benchmarks user guide [Text] / Yang S. – Microelectronics Centre of North Carolina, 1991. – 45 p.
8. Barkalov, A. A., Ty'tarenko, L. A., Zeleneva, I. Ya., Grushko, S. S. (2015). Opty'mizaciya sxemy' sumishhenogo avtomata v bazy'si FPGA sposobom zaminy' vxdny'x zminny'x. Naukovy'j visny'k Chernivec'kogo nacional'nogo universy'tetu imeni Yuriya Fed'kovy'cha. Seriya: Komp'yuterni sy'stemy' ta komponenty', 6 (2), 49–54.
9. Barkalov, A. A., Zeleneva, I. Ja., Grushko, S. S., Mihajljutenko, D. A. (2016). Sposoby optimizacii shem sovmeshhennyh mikroprogrammnyh avtomatov v bazise FPGA. Sovremennye problemy i dostizheniya v oblasti radiotekhniki, telekommunikacij i informacionnyh tehnologij, 281–282.
10. Barkalov, A., Titarenko, L., Chmielewski, S. (2007). Reduction in the Number of PAL Macrocells in the Circuit of a Moore FSM. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 17 (4), 565–575. doi: [10.2478/v10006-007-0046-8](https://doi.org/10.2478/v10006-007-0046-8)
11. Accelerating the Smart and Connected World. Available at: www.altera.com
12. All programmable. Available at: www.xilinx.com
13. Villa, T., Sangiovanni-Vincentelli, A. (1990). NOVA: state assignment of finite state machines for optimal two-level logic implementation. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 9 (9), 905–924. doi: [10.1109/43.59068](https://doi.org/10.1109/43.59068)
14. Yang, S., Ciesielski, M. J. (1991). Optimum and suboptimum algorithms for input encoding and its relationship to logic minimization. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 10 (1), 4–12. doi: [10.1109/43.62787](https://doi.org/10.1109/43.62787)
15. Barkalov, A. A. (1998). Principy optimizacii logicheskoy shemy mikroprogrammnoy avtomata Mura. Kibernetika i sistemnyy analiz, 1, 65–72.
16. Yang, S. (1991). Logic Synthesis and optimization benchmarks user guide. Microelectronics Centre of North Carolina, 45.

Поступила (received) 06.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Метод уменьшения числа термов при реализации схемы совмещенного микропрограммного автомата в базисе CPLD/ А. А. Баркалов, Л. А. Титаренко И. Я. Зеленева, С. С. Грушко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.25–31. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-5459.

Метод зменшення числа термів при реалізації схеми сумішеного мікропрограмного автомата в базисі CPLD/ О. О. Баркалов, Л. О. Титаренко, І. Я. Зеленьова, С. С. Грушко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.25–31. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-5459.

Method of reducing the number of terms for combined finite state machine implementing in CPLD/ A. Barkalov, L. Titarenko, I. Zeleneva, S. Hrushko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.25–31. – Bibliogr.: 16. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Баркалов А. А. – доктор технічних наук, професор, Университет Зеленогурский, Кафедра комп'ютерних наук; ул. Средней школы, 9, г. Зелена Гура, Польща, 65-424, e-mail: a.barkalov@imei.uz.zgora.pl.

Титаренко Л. А. – доктор технічних наук, професор, Университет Зеленогурский, Кафедра комп'ютерних наук; ул. Средней школы, 9, г. Зелена Гура, Польща, 65-424, e-mail: L.Titarenko@iie.uz.zgora.pl.

Зеленева І. Я. – кандидат технічних наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, Кафедра комп'ютерних систем и сетей; ул. Жуковського, 64, г. Запорожье, Украина, 69063, e-mail: irina.zeleneva@gmail.com.

Грушко С. С. – аспірант, Запорожский национальный технический университет, Кафедра комп'ютерних систем и сетей; ул. Жуковського, 64, г. Запорожье, Украина, 69063; e-mail: grushkosveta@gmail.com.

Баркалов А. А. – доктор технічних наук, професор, Университет Зеленогурський, Кафедра комп'ютерних наук; вул. Середньої школи, 9, м. Зелена Гура, Польща, 65-424, e-mail: a.barkalov@imei.uz.zgora.pl.

Титаренко Л. А. – доктор технічних наук, професор, Университет Зеленогурський, Кафедра комп'ютерних наук; вул. Середньої школи, 9, м. Зелена Гура, Польща, 65-424, e-mail: L.Titarenko@iie.uz.zgora.pl.

Зеленева І. Я. – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Кафедра комп'ютерних систем та мереж; вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, e-mail: irina.zeleneva@gmail.com.

Грушко С. С. – аспірант, Запорізький національний технічний університет, Кафедра комп'ютерних систем та мереж; вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063; e-mail: grushkosveta@gmail.com.

Barkalov A. – Doctor of Technical Sciences, Professor, University of Zielona Góra, Department of Computer Science, Electrotechnics and Informatics; Licealna, 9, Zielona Góra, Poland, 65-424, e-mail: a.barkalov@imei.uz.zgora.pl.

Titarenko L. – doctor of Technical Sciences, Professor, University of Zielona Góra, Institute of Metrology, Electrotechnics and Informatics; Licealna, 9, Zielona Góra, Poland, 65-424, e-mail: L.Titarenko@iie.uz.zgora.pl.

Zeleneva I. – PhD, associate professor, Zaporizhzhya National Technical University, Department of Computer Systems and Networks; Zhukovskogo str., 64, Zaporozhye, Ukraine, 69063, e-mail: irina.zeleneva@gmail.com.

Hrushko S. – graduate student, Zaporizhzhya National Technical University, Department of Computer Systems and Networks; Zhukovskogo str., 64, Zaporozhye, Ukraine, 69063; e-mail: grushkosveta@gmail.com.

УДК 615.849.19

В. Й. КОТОВСЬКИЙ, В. В. ШЛИКОВ, В. А. ДАНИЛОВА

THE MATHEMATICAL MODEL OF HEAT TRANSFER IN MATLAB FOR DEVICE OF CARDIO-PULMONARY BYPASS IN CARDIOLOGY

Запропоновано модель теплопередачі для пристрою штучного кровообігу у вигляді системи диференціальних рівнянь. Чисельна модель дозволяє оцінити температурні параметри гіпотермії і гіпертермії серця і досліджувати зміни градієнта температури на поверхні міокарда в момент ресстрації теплових зображень серця.

Ключові слова: термограма; міокард; розподіл температури; судинна патологія.

Предложена модель теплопередачи для устройства искусственного кровообращения в виде системы дифференциальных уравнений. Численная модель позволяет оценить температурные параметры гипотермии и гипертермии сердца и исследовать изменения градиента температуры на поверхности миокарда в момент регистрации тепловых изображений сердца.

Ключевые слова: термограмма; миокард; распределение температуры; сосудистая патология.

The heat transfer models for device of cardiopulmonary bypass in the form of a system of ordinary differential equations are presented. The numerical model allows us to estimate the temperature of the process parameters of hypothermia and hyperthermia heart and to investigate changes in the gradient of the temperature on the surface of the myocardium at the time of registration of thermal images of the heart.

The numerical model of heat transfer during extracorporeal circulation in the form of a system of ordinary differential equations was created. It allows to estimate the parameters of temperature propagation and temperature gradients at the surface of the myocardium at the time of registration of thermal images of the heart.

Comparison of the model with real patients intraoperative infra-red thermography shows that this method can provide additional important information regarding temperature and vascular uniformity in time of myocardial cooling and heating. This method increasing safety of myocardium protection and assistive in solutions of weaning from cardiopulmonary bypass.

Keywords: thermogram; myocardium; temperature distribution; vascular pathology.

Introduction. The heat transfer during extracorporeal cardiopulmonary bypass (CPB) is due to the heat exchange between the blood and the water in the heat exchanger device of cardiopulmonary bypass (DCB) and to the heat exchange between the blood and the body of the patient's in the circulatory system. In accordance with the protocol of CPB blood is first using a special catheter enters the oxygenator to the pump (centrifuge pump) which replaces lung function, and then from the oxygenator blood moves to the heat exchanger, which lowers the blood temperature and across a catheter (silicone tube) directed in the patient's system circulation [1].

For the CPB the blood flow is maintained at 2,2 – 2,4 $\frac{L}{min \cdot m^2}$ and temperature at 28 – 35 °C during moderate hypothermia, and 16 – 26 °C during deep hypothermia. Reduction of the patient's body temperature leads to reduced oxygen demand for bodies. To perform the heat balance the heat exchange in the body must be equal to its heat transfer. At rest, the magnitude of the human body heat is about 75kcal/g at about 36,6 °C. When heating blood the amount of heat that is absorbed or excreted of blood, calculated using the formula:

$$Q_{lic} = c_{liq} m_{liq} (T_{lic} - T_{out}), J,$$

where c_{liq} – the specific heat capacity of the blood, $c_{liq} \approx 4200 \frac{J}{kg \cdot s}$, $(T_{lic} - T_{out})$ – the temperature difference at heating blood, °C, m_{liq} – the mass of cooled blood, kg.

The heat balance equation involving DCB for cooling and heating of blood will look:

$$Q_{lic} + Q_{heart} = Q_{dbc},$$

where Q_{heart} – the amount of heat emitted or absorbed by the myocardium (heart) for cooling or heating of blood, J. Q_{dbc} – the amount of heat that is released or absorbed in the DCB, J.

Obviously, the combustion of the blood the temperature difference is $(T_{lic} - T_{out}) > 0$ and correspondingly the amount of heat is $Q_{lic} > 0$, and when the cooling blood the temperature difference is $(T_{lic} - T_{out}) < 0$ and $Q_{lic} < 0$ – blood releases energy in the DCB.

© V. Kotovskyi, V. Shlykov, V. Danilova. 2016

The terms in equation of the heat balance describe the contribution to the energy balance of the environment: the blood, the heart, the body, the air. The amount of heat which is transferred from the inner layer to the outer layer of the myocardium is described of the Fourier law [2]:

$$Q_{heart} = -K \frac{T_2 - T_1}{l} S_{heart} \cdot t,$$

$T_1 = T_{heart} = \frac{T_1' + T_2'}{2}$ – the temperature of the inner wall of

the heart; $T_1' = T_0$ – the initial value of the blood temperature in the DCB; $T_2' = T_{lic}$ – the final cooling temperature of blood in the DCB; K – the thermal conductivity of the myocardium; S_{heart} – the area of the myocardium; l – the thickness of the myocardium.

The amount of heat that must be expended to cool the blood in the DCB from T_1' to T_2' can be found from the expression:

$$Q_{dcb} = (m_{lic} \cdot c_{lic} + m_{dcb} \cdot c_{dcb}) \cdot (T_1' - T_2'),$$

m_{lic} , m_{dcb} – the mass of blood and the mass of material in the DCB, respectively, kg , c_{lic} – the specific heat capacity of the blood, $\frac{J}{kg \cdot K}$, c_{dcb} – the specific heat capacity of the material in the DCB, $\frac{J}{kg \cdot K}$.

Thus, it is possible to obtain a mathematical model in the form of a conventional differential equation of the 1st-order that describes the heat exchange between the blood and the heart:

$$\begin{cases} \frac{dQ_{heart}}{dt} = \frac{1}{R_q} (T_{heart} - T_{out}) \\ \frac{dT_{heart}}{dt} = -r(T_0 - T_{lic}) \end{cases},$$

where $T_0 = T_{heart} |_{t=0}$, K at time $t = 0$. $R_q = \frac{1}{\alpha}$ – the thermodynamic resistance of the myocardium, $\frac{K}{W}$,

$r = \frac{1}{(m_{lic} c_{lic} + m_{dcb} c_{dcb}) \cdot R_q}$ – the coefficient cooling of the myocardium, $T_{out} = T_{heart} |_{t_{i-1}}$, K – the temperature in the preceding step $(i - 1)$ the heat exchange for time $t = t_{i-1}$.

Given the temperature blood in the DCB and tissue myocardium, the temperature body of the patient and the air in the operating room, the model of heat exchange can be represented as the system of ordinary differential equations: the system (1) describes the heat exchange between the fluids blood-DCB, the system (2) describes the heat exchange between the fluids blood-heart, system (3) describes the heat exchange between the fluids air-body and the fluids body-heart.

Thus, it is the model of heat exchange is described systems of the differential equations:

$$\begin{cases} \frac{dQ_{heart}}{dt} = \frac{1}{R_q} (T_{heart} - T_{out1}), \\ \frac{dT_{heart}}{dt} = \frac{1}{(m_{lic} c_{lic} + m_{bca} c_{bca})} \left(\frac{dQ_{lic}}{dt} - \frac{dQ_{heart}}{dt} \right) - \frac{dT_{lic}}{dt} \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dQ_{lic}}{dt} = \frac{1}{R_q} (T_{lic} - T_{out2}), \\ \frac{dT_{lic}}{dt} = \frac{1}{(m_{lic} c_{lic} + m_h c_h)} \left(\frac{dQ_{heart}}{dt} - \frac{dQ_{lic}}{dt} \right) \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{dQ_{body}}{dt} = \frac{1}{R_q} (T_{body} - T_{out3}), \\ \frac{dT_{body}}{dt} = \frac{1}{(m_{lic} c_{lic} + m_b c_b)} \left(\frac{dQ_{heart}}{dt} - \frac{dQ_{body}}{dt} \right), \\ \frac{dQ_{air}}{dt} = \frac{1}{R_q} (T_{air} - T_{out4}), \\ \frac{dT_{air}}{dt} = \frac{1}{(m_{air} c_{air} + m_b c_b)} \left(\frac{dQ_{body}}{dt} - \frac{dQ_{air}}{dt} \right) \end{cases}, \quad (3)$$

The temperatures $T_{out1}, T_{out2}, T_{out3}, T_{out4}$ correspond to the values temperature at the previous step $(i - 1)$ for the heat exchange between the blood and the objects to interact (DCB material, myocardium, body, air).

The model of the heat transfer for cardiopulmonary bypass

According to the above model of the heat transfer for extracorporeal cardiopulmonary bypass, the program model in Matlab has the form shown in Fig. 1.

The program model in Matlab for each system of the differential equations

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{R_q} (T_1 - T_2),$$

and

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{(m_1 c_1 + m_2 c_2)} \left(\frac{dQ_1}{dt} - \frac{dQ_2}{dt} \right),$$

at using Simulink library elements has the form shown in Fig. 2.

The function of approximate lowering blood temperature by heat exchange in the DCB has the form shown in Fig. 3.

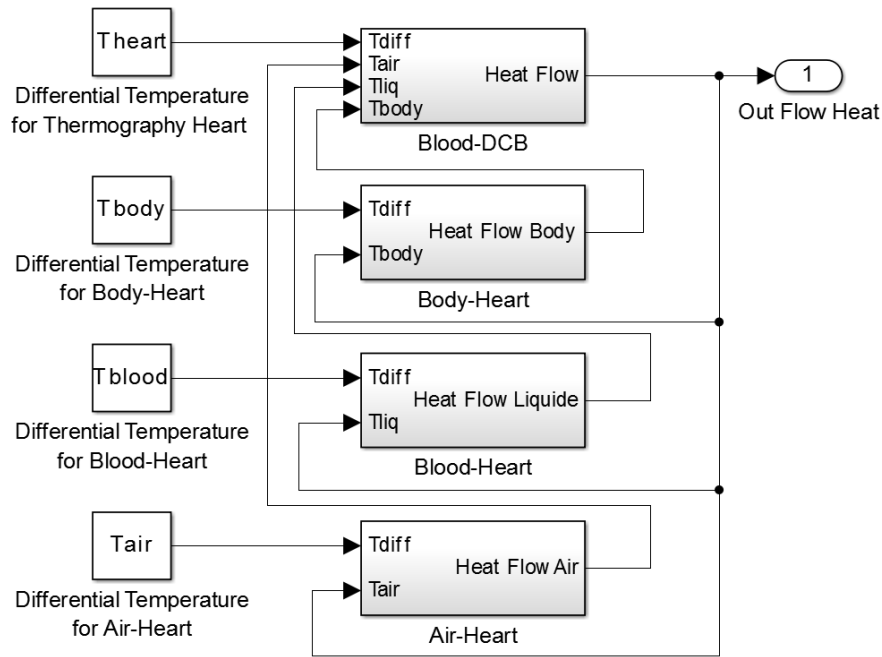


Fig. 1 – Block diagram of the mathematical model of the heat transfer for the process of cooling blood in Matlab

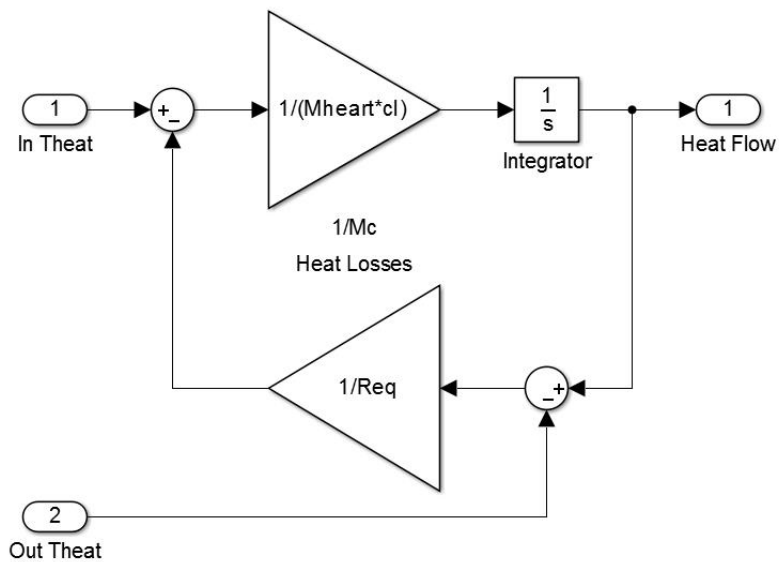


Fig. 2 – Block diagram of the mathematical model of the heat transfer for each system of the differential equations in Matlab

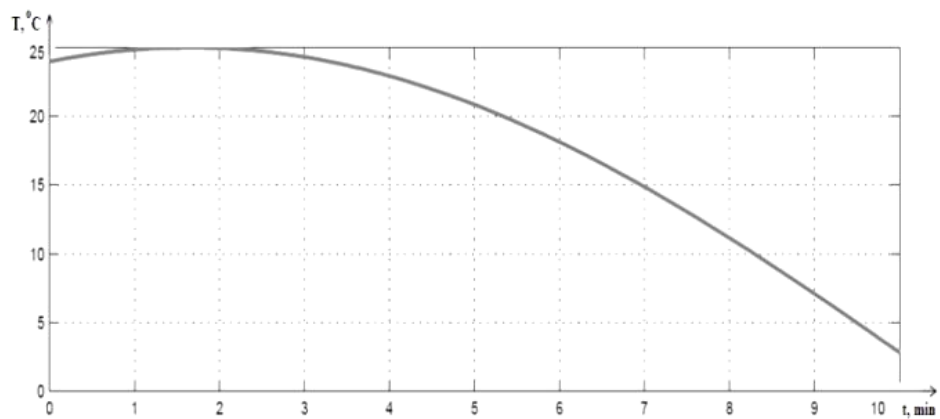


Fig. 3 – The process of step lowering blood temperature by heat exchange

The programming model of heat transfer that calculated using DCB function allows assessing the depth of cooling and rewarming of the heart at any given time during extracorporeal cardiopulmonary bypass [3].

The verification of heat transfer model. For experimental verification of heat transfer model with a thermal

imager Flir i7 at intervals of 1 minute were recorded thermographic images of the myocardium of the heart in the process of cooling. The initial and final stage of the cooling process of the heart in the form of infrared images of the myocardium and the surgical field displayed in Fig. 4, a, b:

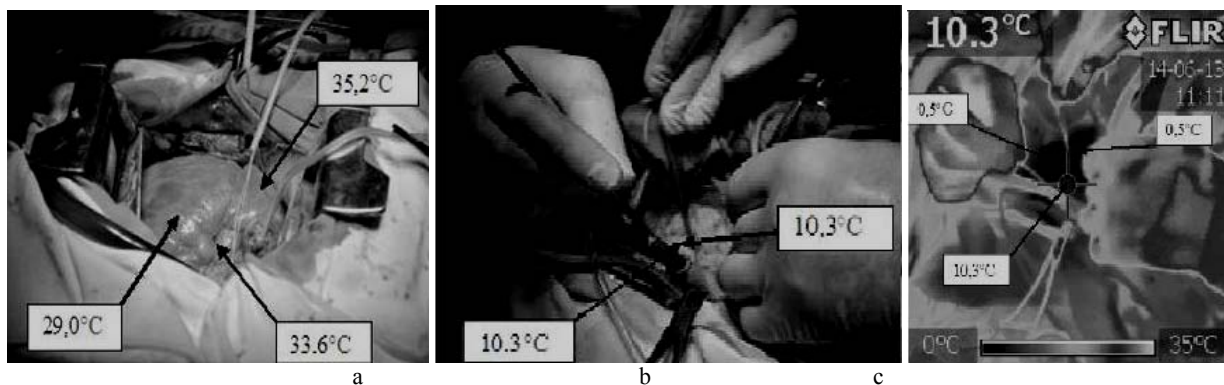


Fig. 4 – Heart with temperature of cooling myocardium from 33,6 °C to 10,3 °C : a – the heart temperature before cooling; b – the heart temperature during cooling; c – thermogram of the heart during cooling

At the beginning of hypothermia process the temperature of area for the heated myocardium was 33,6 °C and in the final stage was lowered to 10,3 °C. The indications DCB at the end of the process hypothermia are determined that the temperature of open-heart surgery was maintained at 17 °C. The temperature distribution on the surface of the myocardium during cooling the cardiac at the readings DCB equal 17 °C is shown in Fig. 5.

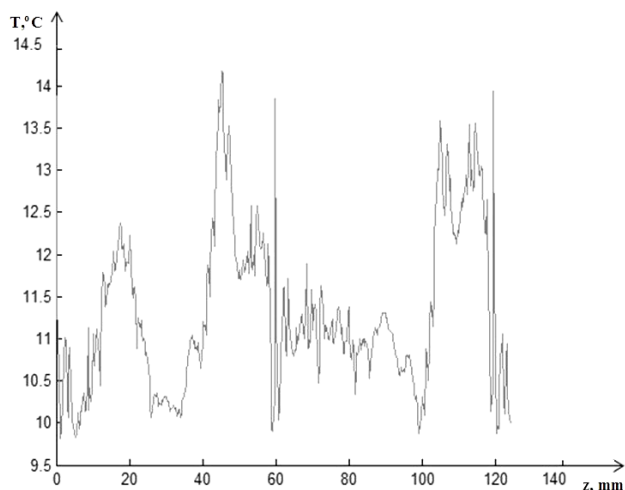


Fig. 5 – The temperature distribution on the surface of the myocardium upon cooling to 14 – 10 °C

The temperature profile is constructed for chilled the heart and indicates the minimum temperature of myocardium 9,8–10,3 °C and the greatest difference between the maximum and minimum temperatures of around 3–4 °C. Therefore, temperature gradient on the surface of the myocardium before and after cooling of the heart is stable indicator which probably can be used as a diagnostic criterion in determining ischemic areas on the surface of the myocardium.

Conclusions

Thus, the heat balance model that developed for extracorporeal cardiopulmonary bypass allowed the evaluate the dynamics of the cooling process and warming the heart and determine the temperature gradient at the surface of the myocardium during the registration process thermo grams hypo- and hyperthermia and obtain the distribution of temperature profiles, which enables diagnosis of ischemic lesions in the myocardium.

Bibliography (transliterated):

1. Naida, S. A. Burikina V. V. Overview of non-invasive measurement of deep body temperature [Text]: inter. scientific-practical conf. / S. A. Naida, V. V. Burikina // Modern Problems and solutions in science, transportation, manufacturing and education 2011", 2011.
2. Kotovskiy, V. Current status of the development and application of thermal imaging technology in medicine and industry [Text]: XXXI inter. scienc. conf. / V. Kotovskiy, E. Venger, S. Voronov, V. Dunaevskiy, E. Soloviev, V. Fedorov // Electronics and Nanotechnology, 2011. – P. 130.
3. Khudetskiy, I. U. Use of Thermal Imaging for Control of the Process Hypothermia Cardiac [Text] / I. U. Khudetskiy, V. A. Danilova, V. V. Shlykov // Polish Journal of Applied Sciences. – 2015. – № 1. – P. 93–96.
4. Astrium, SINDA user manual, ver. 3.2, 2003.
5. Lienhard IV, J. H. A heat transfer textbook [Text] / J. H. Lienhard IV, J. H. Lienhard V. – Dover Publications, 2011. – 768 p.
6. Howell, J. R. Thermal Radiation Heat Transfer, 5th Edition [Text] / J. R. Howell, M. P. Menguc, R. Siegel. – CRC Press: Taylor & Francis, 2011. – 909 p. doi: [10.1002/zamm.201290025](https://doi.org/10.1002/zamm.201290025)
7. Moin, P. Fundamentals of Engineering Numerical Analysis [Text] / P. Moin. – Cambridge University Press, 2009. – 241 p. doi: [10.1017/cbo9780511781438](https://doi.org/10.1017/cbo9780511781438)
8. Oppenhei, A. K. (1956). Radiation analysis by the network method [Text] / A. K. Oppenhei // Transaction of ASME. – 1956. – № 27 (4). – P. 725–736.
9. Diakides, N. Medical Infrared Imaging [Text] / N. Diakides, J. Bronzino. – CRC Press, 2007. – 451 p. doi: [10.1201/9781420008340](https://doi.org/10.1201/9781420008340)
10. Ring, E. F. J. Recent Advances in Medical Thermology [Text] / E. F. J. Ring, B. Phillips. – Springer US, 1984. – 724 p. doi: [10.1007/978-1-4684-7697-2](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-7697-2)

Bibliography (transliterated):

1. Naida, S. A., Burikina, V. V. (2011). Overview of non-invasive measurement of deep body temperature. Modern Problems and solutions in science, transportation, manufacturing and education 2011.
2. Kotovskiy, V., Venger, E., Voronov, S., Dunaevsky, V., Soloviev, E., Fedorov, V. (2011). Current status of the development and application of thermal imaging technology in medicine and industry. Electronics and Nanotechnology, 130.
3. Khudetsky, I. U., Danilova, V. A., Shlykov, V. V. (2015). Use of Thermal Imaging for Control of the Process Hypothermia Cardiac. Polish Journal of Applied Sciences, 93–96.
4. Astrium (2003). SINDA user manual, ver. 3.2.
5. Lienhard IV, J. H., Lienhard V., J. H. (2011). A heat transfer textbook, Dover Publications, 768.
6. Howell, J. R., Menguc, M. P., Siegel, R. (2011). Thermal Radiation Heat Transfer, 5th Edition, CRC Press: Taylor & Francis, 909. doi: [10.1002/zamm.201290025](https://doi.org/10.1002/zamm.201290025)
7. Moin, P. (2009). Fundamentals of Engineering Numerical Analysis. Cambridge University Press, 241. doi: [10.1017/cbo9780511781438](https://doi.org/10.1017/cbo9780511781438)
8. Oppenhei, A. K. (1956). Radiation analysis by the network method, Transaction of ASME, 27 (4), 725–736.
9. Diakides, N., Bronzino, J. (2007). Medical Infrared Imaging. CRC Press, 451. doi: [10.1201/9781420008340](https://doi.org/10.1201/9781420008340)
10. Ring, E. F. J., Phillips, B. (1984). Recent Advances in Medical Thermology. Springer US, 724. doi: [10.1007/978-1-4684-7697-2](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-7697-2)

Received 11.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Математична модель теплообміну у середовищі Matlab для апарату штучного кровообігу в кардіології / В. Й. Котовський, В. В. Шликов, В. А. Данилова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.31–35. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Математическая модель теплообмена в среде Matlab для аппарата искусственного кровообращения в кардиологии / В. И. Котовский, В. В. Шлыков, В. А. Данилова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.31–35. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

The mathematical model of heat transfer in Matlab for device of cardiopulmonary bypass in cardiology / V. Kotovskiy, V. Shlykov, V. Danilova // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221). – P.31–35. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Котовський Віталій Йосипович – доктор технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри загальної фізики і фізики твердого тіла, пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: kotovsk@kpi.ua; didakt@ukr.net

Шликов Владислав Валентинович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри біомедичної інженерії ФБМІ, пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: v.shlykov@kpi.ua

Данилова Валентина Анатоліївна – асистент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кафедри біомедичної інженерії ФБМІ, пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: valnaa@ukr.net

Котовський Віталій Йосифович – доктор технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; профессор кафедры общей физики и физики твердого тела, пр. Победы 37, Киев, Украина, 03056; e-mail: kotovsk@kpi.ua; didakt@ukr.net

Шлыков Владислав Валентинович – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; доцент кафедры биомедицинской инженерии ФБМИ, пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056, e-mail: v.shlykov@kpi.ua

Данилова Валентина Анатольевна – ассистент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; кафедра биомедицинской инженерии ФБМИ, пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056, e-mail: valnaa@ukr.net

Vitaliy Kotovskiy – Professor, Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"; Department of General Physics and Solid State Physics, Peremogy ave., 37, Kiev, Ukraine, e-mail: kotovsk@kpi.ua; didakt@ukr.net

Shlykov Vladyslav – PhD, Associate Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"; Department of BME, Peremogy ave., 37, Kiev, Ukraine, e-mail: v.shlykov@kpi.ua

Danilova Valentyna – Assistant, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of BME, Peremogy ave., 37, Kiev, Ukraine, e-mail: valnaa@ukr.net

УДК 519.852(07)

М. В. ДОРОШЕНКО, Т. І. ДРАБ

КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ВИВЧАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ НАБЛИЖЕНИХ МЕТОДІВ АЛГЕБРИ ТА АНАЛІЗУ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕГРОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА WORD ТА MATLAB

У статті розглянуто принципи створення та редагування М-книг, запропонована загальна структура М-книг вивчення та реалізації наближених методів алгебри та аналізу, розроблені тестові контролюючі запитання. Контролюючий тест містить чотири варіанти відповідей, один з яких є правильний. Також описана структура бази даних для зберігання контролюючих тестів. Запропонована структура бази даних забезпечує цілісність даних. Програмна реалізація системи вивчення наближених методів розв'язування задач алгебри та аналізу за допомогою М-книг та проведення тестового контролю знань здійснена засобами мови програмування Visual C# у Visual Studio 2015.

Ключові слова: М-книга, інтегроване середовище, база даних, цілісність даних, проста відповідність, взаємно-однозначна відповідність, тестовий контроль, об'єктно-орієнтований підхід.

В статье рассмотрены принципы создания и редактирования М-книг, предложена общая структура М-книг для изучения и реализации приближенных методов алгебры и анализа, разработаны тестовые контролирующие вопросы. Контролирующий тест содержит четыре варианта ответов, один из которых правильный. Также, описана структура базы данных для хранения контролирующих тестов. Предложенная структура базы данных обеспечивает целостность данных. Программная реализация системы изучения приближенных методов решения задач алгебры и анализа с помощью М-книг и проведения тестового контроля знаний осуществлена средствами языка программирования Visual C # в Visual Studio 2015.

Ключевые слова: М-книга, интегрированная среда, база данных, целостность данных, простое соответствие, взаимно-однозначное соответствие, тестовый контроль, объектно-ориентированный подход.

In the article the principles of creating and editing M-books proposed general structure of M-book study and implementation of approximate methods of algebra and analysis, control developed test questions.

To create the M-book package used NoteBook, which is included in the application system Matlab. This package is associated with a word processor Word using Word-specific template that contained in the system Matlab. Developed these M-book for the study and implementation of approximate methods of solving algebra and analysis, namely the method is simple and Seidel iteration for solving systems of linear equations, methods of simple iteration, Newton chords and solving nonlinear equations, quadrature formulas rectangles, trapezoids and Simpson.

Controlling test includes four choices, one of which is correct. Also described database structure for storing control tests. The structure of the database ensures data integrity. Software implementation system study approximate methods of solving algebra and analysis by M-books and of knowledge testing carried out by means of the programming language Visual C # in Visual Studio 2015. The computer system does not depend on the content of the training material and its amount, to the system can add new M-books and test questions.

Keywords: M-book, integrated environment, database, data integrity, simple line, one-to-one correspondence, test control, object-oriented approach.

Вступ. Поступовий перехід від традиційних форм навчання, контролю й оцінювання знань до комп'ютерного навчання та тестування відповідає тенденціям сучасності та загальній концепції модернізації та комп'ютеризації української системи освіти [1–3]. Її ефективність багато в чому залежить насамперед від специфіки самої навчальної дисципліни та мети навчання; від якості програмних продуктів і доцільності їх використання для конкретних навчальних цілей; а також від форм представлення навчальної інформації (зокрема, від рівня її візуалізації).

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Комп'ютерній реалізації тестування та створенню україномовного універсального навчального програмного забезпечення присвячено ряд робіт. У роботах [4–7] розглянуто принципи створення універсальних тестуючих програм. У роботі [3] розглянуті принципи організації контролю знань засобами системи Moodle, а у роботі [4] для автоматизації тестування використовується засіб XML, який дозволяє створювати ефективний моніторинг викладача. Також у роботі [8–11] запропонована методика, яка базується на системно-онтологічному підході до побудови моделей електронного курсу, що забезпечує високу ступінь формалізації та структуризації навчальної дисципліни.

На сьогодні використання комп'ютерних навчальних систем ще не набуло достатнього поширення у вищих навчальних закладах України, незважаючи на загальновідомі переваги комп'ютерних технологій, непогане оснащення комп'ютерною технікою наших

навчальних закладів. Тому створення комп'ютерних навчальних систем є актуальною задачею.

Ціль та задачі дослідження. Дана робота присвячена створенню комп'ютерної системи для вивчення наближених методів алгебри та аналізу, тестового контролю засвоєних знань.

У навчальний план підготовки вчителів інформатики, математики, фізики та трудового навчання входить дисципліна «Методи обчислень», в якій вивчаються методи наближеного розв'язування задач алгебри та аналізу, що застосовуються для розв'язування таких класів задач, а саме: систем лінійних алгебраїчних рівнянь, нелінійних рівнянь та їх систем, інтерполяції та апроксимації функцій, наближеного обчислення означених інтегралів [8]. Розв'язати конкретну задачу алгебри та аналізу можна одним з таких способів: створити програму за допомогою засобів якоїсь мови програмування високого рівня, використати математичні функції систем комп'ютерної математики (Mathematica, Maple, Matlab, MathCad). Але при проведенні лабораторних занять з навчальної дисципліни «Методи обчислень» важливо, щоб кожний студент досконало засвоїв кроки чисельного методу, вмів аналізувати результати, які отримуються після виконання кожного кроку методу. Тому для цього доцільно, щоб додаток, в якому здійснюється реалізація наближеного методу розв'язування задач алгебри та аналізу містив опис алгоритму та команди покрокової реалізації методу. Дану проблему можна розв'язати створивши інтегроване середовище Word та Matlab.

© М. В. Дорошенко, Т. І. Драб. 2016

Ціль статті: створення комп'ютерної системи для вивчення, реалізації наближених методів розв'язування задач алгебри та аналізу з використанням інтегрованого середовища Word і Matlab та тестового контролю засвоєних знань.

Методика створення М-книг для вивчення наближених методів. Важливою властивістю системи Matlab є можливість створення текстових документів в середовищі текстового процесора Word з одночасним проведенням у ньому обчислень за допомогою команд системи Matlab та фіксуванням результатів обчислень в текстовому документі, створеному в системі Word [1]. Завдяки такій можливості можна створювати текстові документи безпосередньо в процесорі Word, за допомогою яких здійснювати складні науково-технічні розрахунки. Такі текстові документи називаються М-книгами.

Об'єктом дослідження є принципи створення М-книг.

Предметом дослідження – процес використання М-книг для вивчення та реалізації наближених методів алгебри та аналізу.

Для створення М-книги потрібно використати пакет NoteBook, який входить в прикладну систему Matlab. Цей пакет зв'язується з текстовим процесором Word з допомогою спеціального Word-шаблону, який міститься в системі Matlab. Для того, щоб можна було створювати М-книгу потрібно, щоб шаблон, що носить ім'я M-book. dot, був задалегідь приєднаний до процесора Word.

Для створення М-книги потрібно виконати такі дії:

- 1) Завантажити тестовий процесор Word.
- 2) Виконати в діалоговому вікні Word команду New меню File.
- 3) У вікні, яке з'явиться на екрані, вибрати шаблон M-book.

У результаті таких дій буде завантажена система Matlab, і вид головного меню процесора Word декілька зміниться – в ньому з'явиться нове меню Notebook. Це і свідчитиме про те, що до текстового процесора Word приєднана система Matlab.

Написання М-книги пов'язане з набором тексту, а також операторів і команд системи Matlab. Введення тексту здійснюється за звичайними правилами текстового процесора Word.

Щоб ввести і виконати команду Matlab необхідно:

- 1) Написати текст команди у вигляді окремого рядка.
- 2) Після набору рядка з командою не натискати клавішу <Enter> (курсор повинен залишитися в рядку команди).
- 3) Вибрати команду Define Input Cell з меню Notebook або натиснути клавіші <Alt+D>. Після цього вид рядка команди повинен змінитися - символи команди набудуть темно-зеленого кольору, а команда стане облямованою квадратними дужками темно-сірого кольору.

4) Вибрати мишкою команду Evaluate Cell або натиснути комбінацію клавіш <Ctrl+Enter>. Результатом цих дій повинно стати поява відразу після тексту команди результатів її виконання системою Matlab.

Результати виконання команди виводяться синім кольором в квадратних дужках.

Щоб залишити в тексті документа введені команди та виведені результати, потрібно:

1) Помістити курсор мишки в один з рядків виконаної команди.

2) Вибрати команду Undefine Cells з меню Notebook або натиснути комбінацію клавіш <Alt+U>. У результаті всі символи набудуть звичайний для тексту стиль, колір та розміри, зникнуть квадратні дужки, які їх оздоблювали.

У роботі запропоновано вивчати наближені методи розв'язування деяких задач алгебри та аналізу за допомогою М-книг. Для вивчення конкретного чисельного методу використовуються дві М-книги (для перегляду та редагування). У М-книзі для перегляду міститься професійно підібраний навчальний матеріал (опис методу) та команди Matlab покрокової реалізації алгоритму методу, а для редагування – тільки опис методу.

Підбір навчального матеріалу та методичний його аналіз здійснювався за такими принципами.

Підбір навчального матеріалу полягає в детальному аналізі та відборі змісту інформації, якою повинні оволодіти студенти при вивченні даного курсу, розділу, лекції, у визначенні послідовності вивчення курсу та виділенні основних розділів, які входять до нього [2]. Підібрані теоретичні відомості повинні бути адаптовані з врахуванням рівня підготовленості студентських груп, курсів, з врахування їх однорідності-неоднорідності.

Методичний аналіз теоретичних відомостей полягає у виборі алгоритму навчання, який може бути однаковою для всіх студентів або індивідуалізований для кожного студента. У роботі вибрані алгоритм навчання однаковою для всіх студентів.

Запропонована така структура М-книг для перегляду, а саме:

- Заголовок М-книги.
- Опис чисельного методу
- Опис алгоритму методу.
- Команди системи Matlab, за допомогою яких реалізується алгоритм методу.
- Аналіз результатів виконання кожного кроку.
- Занесення при необхідності проміжних результатів у таблицю.

Для чисельного розв'язування конкретної задачі використовується така структура М-книг, а саме:

- Заголовок М-книги.
- Опис чисельного методу
- Опис алгоритму методу.

Розроблені такі М-книги для вивчення та реалізації наближених методів розв'язування задач алгебри та аналізу, а саме: методів простої ітерації та Зейделя розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь, методів простої ітерації, хорд та Ньютона розв'язування нелінійного рівняння, квадратурних формул прямокутників, трапецій та Сімпсона.

Нижче наведено, як приклад, вигляд М-книги для вивчення методу Ньютона наближеного розв'язування нелінійного рівняння:

Вивчення методу Ньютона з використанням М-книг. *Опис методу*

Нехай рівняння $f(x) = 0$ на відрізку $[a; b]$ має ізо-

льований корінь x^* , тобто $f(a)f(b) < 0$, а функції $f(x)$ і $f'(x)$ неперервні і зберігають знак на $[a; b]$.

Розрахункова формула методу Ньютона має такий вигляд:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Метод Ньютона є методом послідовних наближень $x_{k+1} = \phi(x_k)$, де функція

$$\phi(x) = x - \frac{f(x)}{f'(x)}$$

Достатні умови збіжності методу Ньютона дає така теорема.

Теорема. Нехай на відрізку $[a; b]$ функція $f(x)$ має неперервні із сталими знаками похідні

$$f'(x) \neq 0, \quad f''(x) \neq 0 \quad \text{і} \quad f(a)f(b) < 0.$$

Тоді існує такий окіл $R \subset [a; b]$ кореня x^* рівняння $f(x) = 0$, що для будь-якого $x_0 \in R$ послідовність $\{x_k\}$, обчислена за формулою (1), збігається до кореня x^* .

Швидкість збіжності методу Ньютона оцінюється за допомогою такої формули:

$$|x_{k+1} - x^*| \leq \frac{M_2}{2m_1} |x^* - x_k|^2 \quad (2)$$

де

$$M_2 = \max_{x \in [a; b]} |f''(x)|, \quad m_1 = \min_{x \in [a; b]} |f'(x)|.$$

З оцінки (2) випливає, що метод Ньютона збігається до кореня x^* , якщо початкове наближення x_0 таке, що

$$\frac{M_2}{2m_1} |x^* - x_0| < 1,$$

причому в цьому випадку збіжність є квадратичною. Це означає, що похибка кожного наступного наближення пропорційна квадрату похибки попереднього наближення.

Алгоритм методу Ньютона.

1. Задаємо a, b і точність ε .

2. Якщо $f(a)f(b) < 0$, інакше ε .

3. $x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$

4. Якщо $|x_1 - x_0| \leq \varepsilon$ тоді $x_0 = x_1$ і перейти на пункт 3.

5. Корінь з точністю ε знайдений.

Приклад. Для наближеного розв'язування рівняння $x - \cos x = 0$ застосувати метод Ньютона з точністю 0,001.

Команди Matlab реалізації методу Ньютона.

Знаходимо першу похідну.

```
syms x
diff(x-cos(x),x)
ans =sin(x) + 1
```

Знаходимо другу похідну.

```
diff(x-cos(x), x, 2)
ans =cos(x)
```

1) Задаємо a, b і точність ε .

$a = 0$;

$b = \pi/2$;

$\varepsilon = 0.001$

$\varepsilon = 1.0000e-003$

2) Знаходимо

$ff = (a - \cos(a)) * \cos(a)$

$ff = -1$

Оскільки $ff < 0$, то

$x_0 = \pi/2$

$x_0 = 1.5708$

3) Знаходимо наступне наближення.

$x_1 = x_0 - (x_0 - \cos(x_0)) / (1 + \sin(x_0))$

$x_1 = 0.7391$

4) Знаходимо

$e = \text{abs}(x_1 - x_0)$

$e = 4.5096e-004$

5) Аналізуємо отримане значення e .

6) Якщо точність не задовольняється, то

$x_0 = x_1$

і переходимо до пункту 3, в протилежному випадку алгоритм завершено.

Отримані результати виконання кроків 3–5 запишемо у табл. 1.

У результаті покрокового виконання алгоритму методу Ньютона корінь рівняння знайдений з точністю 0,001 дорівнює 0.7391. Для забезпечення отриманої точності потрібно виконати кроки алгоритму 3-5 3 рази.

Таблиця 1 – Наближене значення кореня нелінійного рівняння

x_0	$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$	$ x_1 - x_0 \leq \varepsilon$
1.5708	0.7854	0.7854
0.7854	0.7395	0.0459
0.7395	0.7391	4.59e-004

Створення тестових запитань. У комп'ютерній системі перевірка засвоєння знань студентами здійснюється за допомогою тестового контролю.

Для реалізації тестового контролю можна вибрати такі типи тестів [10]:

1. Тип А (закритий однозначний) – це тип тестових завдань з вибором єдиної правильної відповіді з декількох запропонованих варіантів.

2. Тип В (відкритий однозначний) – це тип тестових завдань із введення єдиної правильної відповіді.

3. Тип С (закритий багатозначний) – тип тестових завдань із множинним вибором відповідей.

4. Тип D (питання на відповідність) – тип тестових питань з підбором пар відповідностей, зіставленням або протиставлення елементів двох представлених множин.

Сценарій тестування повинен містити всі повідомлення комп'ютера та можливі відповіді студента. Формалізація сценарію тестування може відбуватися таким чином.

Множину тестових питань позначимо M , а множину відповідей студента позначимо N .

Тоді тестові завдання можна представити як два

типи відповідностей множин M і N , а саме:

1) проста відповідність $(I; n)$, де n – кількість елементів множини N . Тобто, одному елементу множини M відповідає n елементів множини N . За допомогою простої відповідності формалізуються сценарії тестування, створені за допомогою тестів типів А, В та С відповідно;

2) взаємно-однозначна відповідність $(n; n)$, де n – кількості елементів множин M та N . Відповідні один одному елементи множин M та N ідентифікуються одним і тим порядковим номером або протиставленням елементів. За допомогою взаємно-однозначної відповідності формалізуються сценарії тестування, які створені за допомогою тесту типу D.

У роботі для створення тестів використовувалась проста відповідність $(I; 4)$. Загальний вигляд тестового запитання такий:

1. Тестове контролююче запитання.

- a) Варіант №1.
- b) Варіант №2.
- c) Варіант №3.
- d) Варіант №4.

Слід зазначити, що всю інформацію, яка забез-

печує контроль (питання, варіанти відповідей та правильні відповіді), доцільно зберігати у файлі тесту. Тому при комп'ютерній реалізації тестового контролю важливим є розробка структури файлу тесту.

Структура файлу тесту повинна бути такою, щоб був забезпечений захист файлу тесту від несанкціонованого доступу. Файл тесту повинен бути доступний тільки адміністратору (викладачу). Тільки адміністратор може змінювати або редагувати тестові запитання. Одним із шляхів вирішення такої проблеми є представлення файлу тесту за допомогою реляційної бази даних [5].

У роботі запропонована така структура бази даних. База даних складається з двох взаємозв'язаних таблиць: answer(містить варіанти відповідей) і question(містить питання). Головною таблицею є таблиця question.

Структура таблиці answer представлена в табл. 2. Ключ таблиці answer складається з двох полів IdQ, IdA. Це забезпечує для одного унікального питання задати безліч унікальних відповідей.

Структура таблиці question представлена в табл.3.

Таблиця 2 – Структура таблиці answer.

Номер РК	Ім'я поля	Тип поля	Коментар
1	IdQ	int	ідентифікатор питання
2	IdA	int	ідентифікатор відповіді по унікальному питанню
–	Answer	nvarchar	відповідь

Таблиця 3 – Структура таблиці question.

Номер РК	Ім'я поля	Тип поля	Коментар
1	Id	int	ідентифікатор питання
–	Question	nvarchar	питання
–	IdTrue	int	ідентифікатор привальної відповіді

Між таблицями реалізований зв'язок, який забезпечує цілісність даних [5]. Поле Id таблиці question зв'язане з полем IdQ таблиці answer, тобто реалізується зв'язок один до багатьох.

Опис комп'ютерної програми. Програмна реалізація навчальної системи здійснена у Visual Studio 2015 засобами мови програмування Visual C#[6, 9] з використанням об'єктно-орієнтованого підходу до проектування прикладних програм.

У навчальній системі реалізовані такі функції :

- 1) Вивід на екран М-книг для перегляду.
- 2) Контроль знань студентів на основі тестового контролю.
- 3) Виконання кроків алгоритму вибраного наближеного методу у М-книзі для редагування.
- 4) Можливість редагування бази даних, в якій містяться контролюючі тести.

Головне вікно програми має такий вигляд (рис. 1):

У меню "Методи" (рис. 2) можна вибрати одну із доступних М-книг для вивчення відповідного методу.

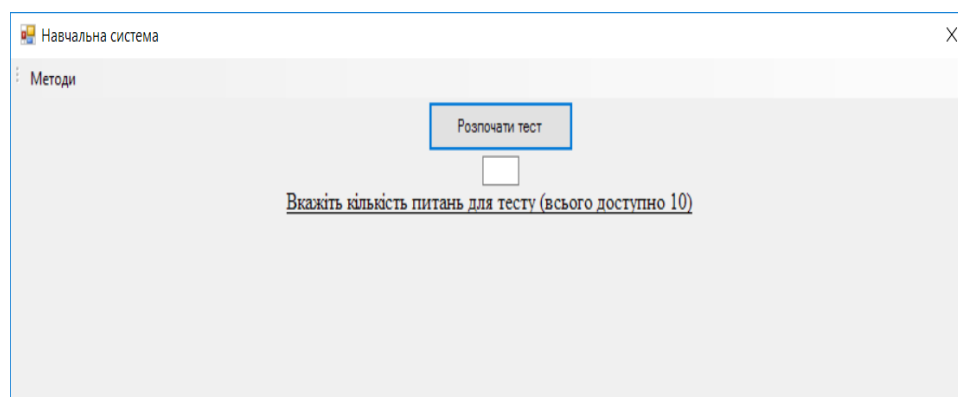


Рис. 1 – Головне вікно програми

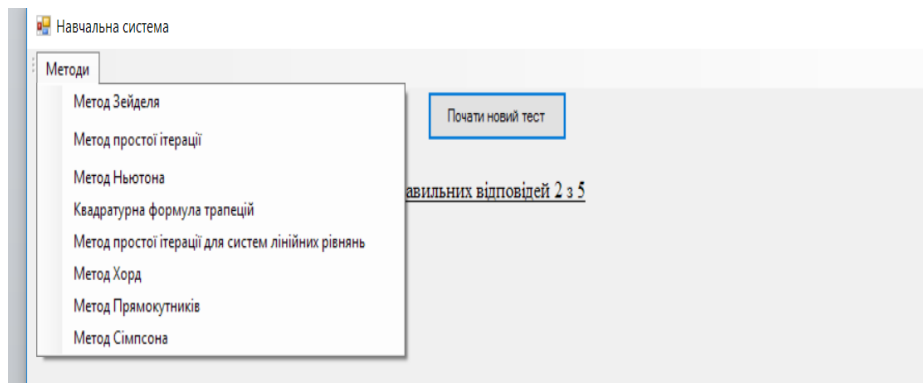


Рис. 2 – Вигляд головного меню

При проведенні тестування потрібно виконати такі дії. Якщо вказати потрібну кількість запитань, то з'являється вікно тестування (рис. 3). Потрібна кількість запитань вибирається випадковим чином з усіх доступних запитань. Для кожному запитання реалізо-

вано 4 варіанти відповідей. Варіанти відповідей кожний раз при виконанні програми вибираються в довільному порядку.

Після проходження тестування з'являється вікно (рис. 4) з виводом результатів тестування.

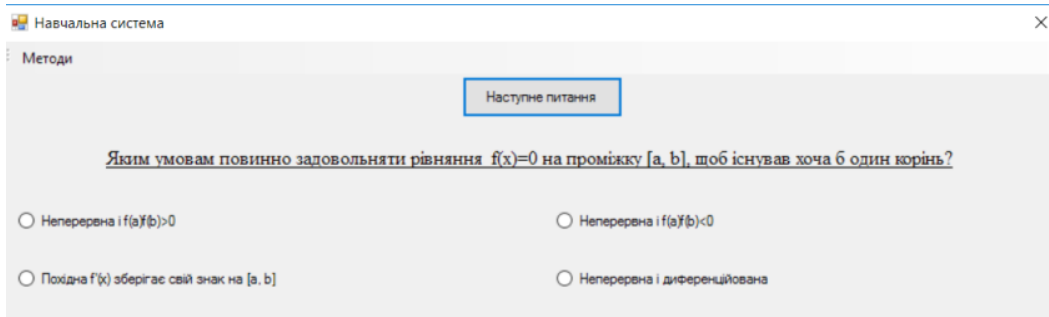


Рис. 3 – Вікно тестування

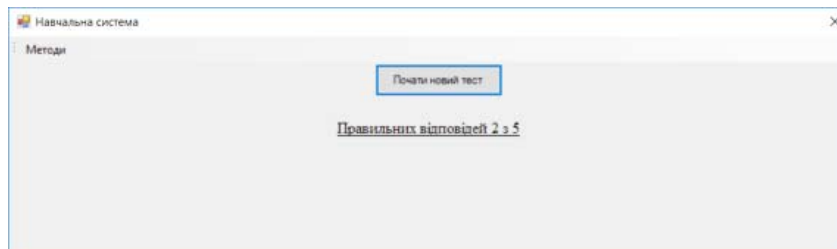


Рис. 4 – Результати тестування

Обговорення результатів. Створену комп'ютерну систему можна використовувати при проведенні лабораторних занять з навчальної дисципліни «Методи обчислень». Ефективність створеної системи полягає в тому, що за допомогою М-книг можна не тільки вивчати теоретичний матеріал, але і реалізовувати наближені методи за допомогою команд прикладної системи Matlab. Після виконання кожного кроку також можна аналізувати отримані результати та приймати потрібні рішення.

Створена комп'ютерна система не залежить від змісту навчального матеріалу та від його кількості.

Тестовий контроль реалізований з використанням баз даних, які забезпечують цілісність даних. Створена база даних не залежить від кількості запитань та варіантів відповідей.

Висновки

1. Розроблена комп'ютерна система засобами мови візуального програмування Visual C#, за допомогою якої можна вивчати та реалізовувати наближе-

ні методи алгебри та аналізу та здійснювати тестовий контроль засвоєних знань.

2. Розроблена комп'ютерна система не залежить від змісту навчального матеріалу та від його кількості. До системи можна додавати нові М-книги.

3. Створена база даних не залежить від змісту контролюючих тестових запитань, кількості запитань та варіантів відповідей.

Список літератури:

1. Ануфриев, И. Е. MATLAB 7. Наиболее полное руководство в подлиннике [Текст] / И. Е. Ануфриев, А. Б. Смирнов, Е. Н. Смирнова. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. – 1105 с.
2. Беспалов, В. П. Программированное обучение. Дидактические основы [Текст] / В. П. Беспалов. – Москва: Высшая школа, 1970. – 300 с.
3. Бодненко, Д. М. Тестовий контроль знань студентів у системі Moodle [Текст] / Д. М. Бодненко, Л. О. Варченко, О. Б. Жильцов. – Київ: Київський університет імені Бориса Грінченка, 2012. – 112 с.
4. Дубровін, О. Ф. Розробка комп'ютерної системи тестування на базі XML [Текст] / О. Ф. Дубровін // Молодь і ринок. – 2009. – № 9. – С. 37–40.
5. Мартин, Д. Организация баз данных у вычислительных си-

- стемах [Текст] / Д. Мартин. – Москва: Мир, 1980. – 662 с.
6. *Нейгел, К.* С# 2005 для профессионалов [Текст] / К. Нейгел. – Москва: Вильямс, 2006. – 763 с.
 7. *Олійник, М. М.* Тест як інструмент кількісної діагностики рівня знань в сучасних технологіях навчання [Текст] / М. М. Олійник, Ю. А. Романенко. – Донецьк: Донецький національний університет, 2001. – 84 с.
 8. *Фельдман, Л. П.* Чисельні методи в інформатиці [Текст] / Л. П. Фельдман, А. І. Петренко О. А. Дмитрієва. – Київ: Видавнича група BHV, 2006. – 480 с.
 9. *Уотсон, К.* Visual C#. Полный курс [Текст] / К. Уотсон, К. Нейгел, Я. Педерсен, Д. Рид, М. Скиннер. – Москва: Вильямс, 2011. – 960 с.
 10. *Fallahzadeh, H.* New software for computation sensitivity analysis to detect hidden bias for partially order set test statistic in observational studies [Text] / H. Fallahzadeh // Procedia Technology. – 2012. – № 1. – P. 225–229. doi: [10.1016/j.protcy.2012.02.048](https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.02.048)
 11. *Tikhonov, U.* Development of ontological approach in e-learning when studying information technologie [Text] / U. Tikhonov, V. Lakhno, E. Skliarenko, O. Stepanenko, K. Dvirnyi // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 5/2 (83). – P. 13–20. doi: [10.15587/1729-4061.2016.79230](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79230)
 2. *Bespalov, V. P.* (1970). Programmirovannoe obuchenie. Didakticheskie osnovy. Moscow: Vysshaja shkola, 300.
 3. *Bodnenko, D. M., Varchenko, L. O., Zhy'l'czov, O. B.* (2012). Testovyy kontrol znan studentiv u systemi Moodle. Kiev: Kyiv'skyj universytet imeni Bory'sa Grinchenka, 112.
 4. *Dubrovin, O. F.* (2009). Rozrobka komp'yuternoyi sy'stemy testuvannya na bazi XML. Molod i ryнок, 9, 37–40.
 5. *Martin, D.* (1980). Organizacija baz dannyh u vychislitel'nyh sistemah. Moscow: Mir, 662.
 6. *Nejgel, K.* (2006). C# 2005 dlja professionalov. Moscow: Viljams, 763.
 7. *Olijny'k, M. M., Romanenko, Yu. A.* (2001). Test yak instrument kil'kisnoyi diagnosty'ky` rivnyia znan` v suchasny`x tehnologiyax navchannya Donetsk: Doneckzyj nacionalnyj universytet, 84.
 8. *Feldman, L. P., Petrenko, A. I., Dmytriyeva, O. A.* (2006). Chyselni metody v informatyici. Kiev: Vydavnycha grupa BHV, 480.
 9. *Uotson, K., Nejgel, K., Pedersen, Ja., Rid, D., Skinner, M.* (2011). Visual C#. Polnyj kurs. Moscow: Viljams, 960.
 10. *Fallahzadeh, H.* (2012). New software for computation sensitivity analysis to detect hidden bias for partially order set test statistic in observational studies. Procedia Technology, 1, 225–229. doi: [10.1016/j.protcy.2012.02.048](https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.02.048)
 11. *Tikhonov, U., Lakhno, V., Skliarenko, E., Stepanenko, O., Dvirnyi, K.* (2016). Development of ontological approach in e-learning when studying information technologies. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(2 (83)), 13–20. doi: [10.15587/1729-4061.2016.79230](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79230)
- Bibliography (transliterated):**
1. *Anufriev, I. E., Smirnov, A. B., Smirnova, E. N.* (2005). MATLAB 7. Naibolee polnoe rukovodstvo v podlinnike. Sait Petersburg: BHV-Peterburg, 1105.

Поступила (received) 11.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Комп'ютерна система вивчення та реалізації наближених методів алгебри та аналізу з використанням інтегрованого середовища Word та Matlab/ М. В. Дорошенко, Т. І. Драб// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.36–41. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Компьютерная система изучения и реализации приближенных методов алгебры и анализа с использованием интегрированной среды Word и Matlab/ Н. В. Дорошенко, Т. И. Драб// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.36–41. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Computer system and implementation studying approximate methods of algebra and analysis using integrated environmental Word and Matlab/ М. Doroshenko, T. Drab//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.36–41. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дорошенко Микола Васильович – кандидат фізико-математичних наук, Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, доцент кафедри інформатики та обчислювальної математики; вул. Володимира Великого, 23, кв. 43, м. Дрогобич, 82100; e-mail: dornik247@gmail.com

Драб Тарас Іванович – Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, магістрант кафедри інформатики та обчислювальної математики; вул. В. Стуса 1/1, м. Дрогобич, e-mail: dornik247@gmail.com

Дорошенко Николай Васильевич – кандидат физико-математических наук, Дрогобычский государственный педагогический университет имени Ивана Франко, доцент кафедры информатики и вычислительной математики; ул. Владимира Великого, 23, кв. 43, г. Дрогобыч, 82100;

Драб Тарас Иванович – Дрогобычский государственный педагогический университет имени Ивана Франко; магистрант кафедры информатики и вычислительной математики; ул. В. Стуса 1/1, г. Дрогобыч, e-mail: dornik247@gmail.com

Mykola Doroshenko – candidate of Physical and Mathematical Sciences, Drohobych State Pedagogical University named after Ivan Franko, associate professor of computer science and computational mathematics; st. Vladimir the Great, 23/43, Drohobych, 82100; e-mail: dornik247@gmail.com

Drab Taras – Drohobych State Pedagogical University named after Ivan Franko; undergraduate of Computer Science and Computational Mathematics; st. V. Stus 1/1, Drohobych; e-mail: dornik247@gmail.com

УДК 531.71; 681.2.083

М. Ф. ЖОВНІР

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА КУТОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ З КІЛЬЦЕВИМ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИМ ХВИЛЕВОДОМ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

Наведена математична модель, що розроблена на основі дельта-функцій, первинного перетворювача (ПП) кутових переміщень з використанням фазових набігань на поверхні кільцевого п'єзоелектричного хвилеводу електричного поля поверхневих акустичних хвиль (ПАХ), які приймаються рухомих приймачем. Модель дозволила отримати залежності характеристик ПП від положення кожного електрода зустрічно-штирового перетворювача приймача ПАХ відносно акустичного потоку. Теоретичні співвідношення, результати чисельних розрахунків дозволяють обґрунтовувати конструктивні та електричні параметри ПП в залежності від заданих метрологічних характеристик перетворювача кутових переміщень.

Ключові слова: поверхнева акустична хвиля, вимірювальний перетворювач, п'єзоелектричний хвилевід, зустрічно-штировий перетворювач.

Приведена математическая модель, которая разработана на основе дельта-функций, первичного преобразователя (ПП) угловых перемещений с использованием фазовых набегов на поверхности кольцевого пьезоэлектрического волновода электрического поля поверхностных акустических волн (ПАВ), которые принимаются подвижным приемником. Модель позволила получить зависимости характеристик ПП от положения каждого электрода встречно-штирового преобразователя приемника ПАВ относительно акустического потока. Теоретические соотношения, результаты численных расчетов позволяют обосновывать конструктивные и электрические параметры ПП в зависимости от заданных метрологических характеристик преобразователя угловых перемещений.

Ключевые слова: поверхностная акустическая волна, измерительный преобразователь, пьезоэлектрический волновод, встречно-штировой преобразователь.

The article describes the development of a mathematical model for primary transducer (PT) of angular displacements on the basis of phasing constant on the surface of the ring piezoelectric waveguide. Electric field of surface acoustic waves (SAW) is detected by movable receiver.

It is the first time developed a mathematical model of the primary transducer for angular displacements with a movable SAW receiver calculated using Delta functions to obtain the dependences of the output characteristics of PT from the position of each electrode of the interdigital transducer of the SAW receiver relatively to the acoustic stream, which propagates on the surface for the angular piezoelectric waveguide.

The practical values of research are theoretical model; numerical results allow substantiating the requirements for structural and electrical parameters depending on the specified metrological characteristics of a measuring transducer of angular displacements.

Keywords: surface acoustic wave, measuring transducer, the piezoelectric waveguide, interdigital transducer.

Вступ. В теперішній час приділяється велика увага вимірювальним перетворювачам (ВП) на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ), які при відносно невисоких частотах (десятки – сотні мегагерц), у порівнянні з електромагнітними та магнітостатичними хвилями, забезпечують завдяки малим довжинам хвиль, простоті їх збудження та приймання, високу чутливість перетворення інформаційних сигналів в широкому динамічному діапазоні при застосуванні частотних та фазових методів вимірювання. Такі перетворювачі можуть використовуватись для вимірювання сили та тиску, прискорення, лінійних, кутових переміщень та швидкості, вологості, температури та складу газового середовища, напруженостей електричного та магнітного полів тощо [1–14].

В останні роки пристрої на ПАХ впроваджуються також у радіовимірювальні системи, які містять пристрої опитування і обробки інформації та дистанційно віддалені пасивні перетворювачі на поверхневих акустичних хвилях і застосовуються для радіомоніторингу оточуючого середовища та контролю параметрів рухомих об'єктів, у тому числі вони можуть функціонувати в агресивному середовищі [15–19].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Вимірювальні перетворювачі на ПАХ створюються з використанням первинних перетворювачів (ПП) на базі зміни:

– фазової швидкості ПАХ та акустичної довжини лінії затримки (резонатора) при дії навколишнього середовища на поверхню звукопроводу (молекулярної ваги та концентрації газу, температури, вологості, електромагнітного випромінювання) [1–4, 15, 16];

– фазової швидкості ПАХ та акустичної довжини лінії затримки (резонатора) внаслідок деформації звукопроводу балочного або мембранного типу [1, 2, 5–8, 17, 18];

– коефіцієнта відбиття ПАХ від зустрічно-штирових перетворювачів (ЗШП), що сполучені із зовнішніми елементами, на які діють температура, вологість, електромагнітне випромінювання [16];

– фазової швидкості ПАХ при переміщенні механічного зонда (мембрани) в електричному полі хвилі, що поширюється на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу [9–11, 19];

– акустичної довжини лінії затримки при переміщенні ПАХ – приймача в електричному полі ПАХ, що поширюється на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу [1, 2, 12–14].

Якщо дія механічних та фізичних величин призводить до набігання фази ПАХ не більшому π , то в основі ВП на ПАХ доцільно застосовувати високостабільний ПАХ – генератор, що містить регульовані під впливом вимірювальних величин резонатор або лінію затримки на ПАХ. Застосування частотного методу вимірювання дозволяє отримувати високу роздільну здатність і точність, але динамічний діапазон обмежується набіганням фази не більше π [1–11].

При необхідності вимірювання лінійних або кутових переміщень в динамічному діапазоні до 100...200 мм (360 кут. град.) необхідно застосовувати фазовий метод вимірювання. Для усунення багатозначності фазових вимірювань запропоновано метод вимірювання на основі використання фазового набіган-

© М. Ф. Жовнір. 2016

ня електричного поля кількох ПАХ, що поширюються на поверхні п'єзоелектричного звукопроводу (хвилеводу) на різних частотах, на яких вимірюються інформаційні параметри, що визначають координату ПАХ – приймача [2, 12–14].

На рис. 1 представлена функціональна схема ВП лінійних (кутових) переміщень на ПАХ при збудженні хвилі у вигляді суперпозиції 3-х поверхневих акустичних хвиль з частотами f_i , де $i = 1, 2, 3$, причому $f_2 < f_1 < f_3$ [2, 12–14].

Первинний перетворювач складається із п'єзоелектричного звукопроводу (хвилеводу) 1 з поглиначами ПАХ 2 та 3, необхідних для створення режиму біжучих хвиль, вхідного та контрольного зустрічно-штирових перетворювачів 4 та 5, сформованих на п'єзоелектричному звукопроводі (хвилеводі), над яким на відстані X , не більшій довжини поверхневих акустичних хвиль, переміщується ПАХ – приймач, виконаний у вигляді ЗШП 6, сформованого на діелектричній пластині 7.

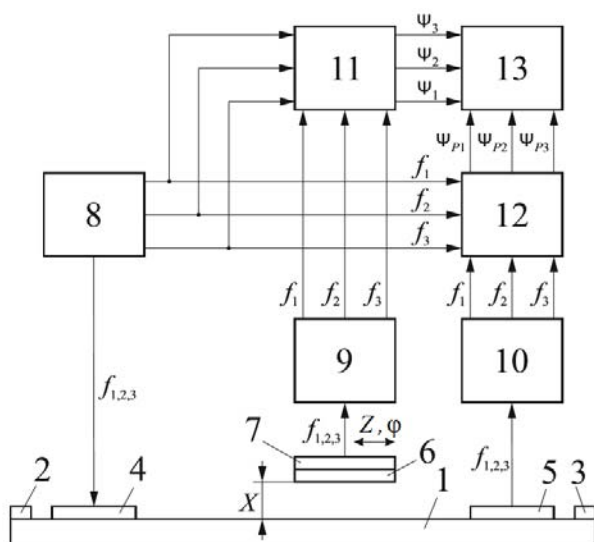


Рис. 1 – Схема функціональна ВП переміщень на ПАХ

Електричний сигнал з генераторного блоку 8, що складається із трьох високостабільних генераторів та суматора, подається на вхідний ЗШП 4 і збуджує у вигляді суперпозиції 3-х гармонічних коливань поверхневу акустичну хвилю, яка приймається ЗШП 6 ПАХ – приймача і контрольним ЗШП 5, вихідні сигнали з яких поступають на блоки підсилення і фільтрації 9 та 10, що складаються із високочастотних підсилювачів та 3-х фільтрів відповідно на частоти f_i . Після підсилення та фільтрації вихідні сигнали з блоків 9 та 10 поступають на фазовимірювальні блоки 11 та 12, на які подаються також опорні сигнали з генераторного блоку. Результати вимірювання фаз Ψ_i сигналів з ПАХ – приймача на частотах f_i поступають в блок обробки та формування трьох вимірних шкал перетворювача 13.

Наприклад, для формування точної шкали використовуються результати вимірювання Ψ_1 на частоті f_1 . Визначаючи $\Psi_{12} = \Psi_1 - \Psi_2$ і $\Psi_{31} = \Psi_3 - \Psi_1$, можна сформувати проміжні шкали, а визначення

$\Psi_{123} = \Psi_{12} - \Psi_{31}$ дозволить сформувати грубу шкалу вимірювального перетворювача.

В блок 13 одночасно поступають результати вимірювання фаз сигналів Ψ_{P_j} ($j=1,2,3$) з блоку 12 для коригування фаз Ψ_i при дії дестабілізуючих факторів на звукопровід (хвилевід). Для цього визначається величина додаткового набігання фази $\Delta\Psi_i$ кожної частоти f_i для координати Z (φ – для кутових переміщень), в якій знаходиться ПАХ – приймач за формулою:

$$\Delta\Psi_i = \Delta\Psi_{P_j} Z / L = \Delta\Psi_{P_j} \varphi / L,$$

де L – відстань між вхідним 4 та контрольним 5 ЗШП; Z, φ – координата знаходження ПАХ – приймача, що визначається попередньо в результаті вимірювання фаз Ψ_i .

Показано [12–14], що при використанні промислових цифрових фазометрів типу Ф5126 (роздільна здатність 0,1 ел.град. та похибка $\pm 0,3$ ел.град.) потенційна роздільна здатність та похибка вимірювання лінійних переміщень на точній шкалі 3-х частотного ВП на ПАХ відповідно складає 0,015 мкм та $\pm 0,045$ мкм в діапазоні 0...100 мм, а при вимірюванні кутових переміщень – відповідно 0,2 кут.сек. та $\pm 0,6$ кут. сек. в діапазоні 0...360 кут. град.

Мета та задачі дослідження. Метою досліджень є розробка вимог до конструктивних та електричних параметрів первинного перетворювача кутових переміщень на ПАХ в залежності від заданих метрологічних характеристик вимірювального перетворювача.

Для досягнення поставленої мети необхідно з використанням Δ – функцій розробити математичну модель, що визначала би функціональні залежності вихідних характеристик ПП від положення кожного електродного зустрічно-штирового перетворювача рухомого ПАХ – приймача відносно акустичного потоку, що поширюється по кільцевому п'єзоелектричному хвилеводу.

Математична модель ПП кутових переміщень на ПАХ. Топологічна схема 3-х частотного первинного перетворювача кутових переміщень на ПАХ зображена на рис. 2 (позиції 1 – 7 на рис.1 та рис. 2 співпадають).

ПП кутових переміщень містить кільцевий хвилевід 1 з рупорними концентраторами поверхневих акустичних хвиль та поглиначами 2 и 3, необхідних для усунення відбиття ПАХ, вхідний 4 та контрольний 5 ЗШП, сформованими на п'єзоелектричному хвилеводі. Над кільцевим хвилеводом на відстані не більшій довжині хвилі обертається ПАХ – приймач у вигляді кільцевого секційного ЗШП 6 на діелектричному диску 7 з просторовими періодами електродів W_i , секції якого розподілені по колу радіусу R .

Розподілена конструкція ПАХ – приймача дозволяє приймати сигнали на частотах f_i з компенсацією похибок, що виникають в результаті торцевого та радіального биття приймача. В ВП на ПАХ кутових переміщень в якості п'єзоелектричного звукопроводу

доцільно використовувати плівковий хвилевід на базі п'єзоелектричних плівок оксид цинку ZnO або нітрид алюмінію AlN, топографічний хвилевід на основі п'єзоелектричної кераміки ЦТС, щілинний хвилевід на основі тих же матеріалів [20, 21]. В роботі [22] представлено результати теоретичних та експериментальних досліджень плівкових п'єзоелектричних хвилеводів з використанням структури оксид цинку – плавлений кварц, які можуть бути використані при розробці ВП кутових переміщень.

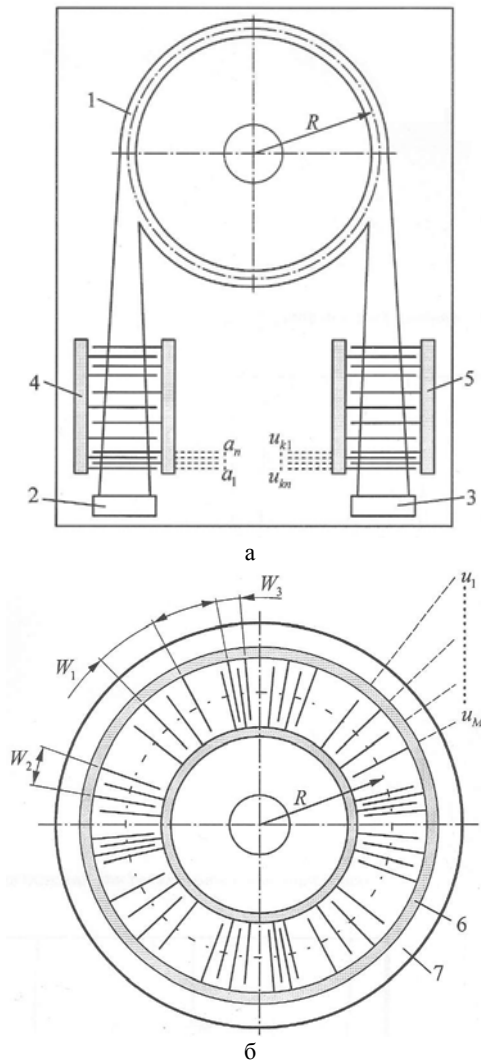


Рис. 2 – Топологічна схема ПП кутових переміщень на ПАХ: а – модуль на базі п'єзоелектричного хвилеводу ПАХ; б – кільцевий ПАХ – приймач

Для збудження та приймання ПАХ використано зустрічно – штирові перетворювачі, які запропоновані доволі давно і широко застосовуються в пристроях на ПАХ, але повний математичний опис їх роботи не знайдено із-за складності другорядних явищ, що виникають в процесі збудження, поширення та приймання ПАХ. У відомих моделях еквівалентних схем, моделях Δ – джерел, спектрального зважування, просторових гармонік розглядають ЗШП, що сформований на поверхні звукопроводу [23]. Безпосереднє використання цих моделей для опису роботи первинного перетворювача з рухомим ПАХ – приймачем неможливо, тому що при розробці математичної моделі

ПП переміщень необхідно задавати параметри, які характеризують конструктивні особливості приймача та його положення відносно поверхні п'єзоелектричного хвилеводу.

Найбільш доцільним представляється побудова математичної моделі ПП кутових переміщень на ПАХ на базі моделі Δ – джерел із урахуванням наявності рухомого ПАХ – приймача, тому що вона дозволяє знайти функціональні залежності вихідних характеристик перетворювача від положення кожного Δ – джерела приймача відносно акустичного потоку, що поширюється по п'єзоелектричному хвилеводу.

У моделі Δ – джерел електроди ЗШП вважаються дискретними джерелами акустичної або електромагнітної енергії, які описуються Δ – функціями, заданими на краях кожного електрода [23]. Для спрощення розрахунків два джерела однакової полярності, що належать одному електроду або зазору, об'єднують в одне, розташоване в центрі електроду або зазору. Залежно від значення коефіцієнта електромеханічного зв'язку в реальних п'єзоелектриках переважає тангенціальна або нормальна складові електричного поля. Тому можна вважати, що поверхнева акустична хвиля в п'єзоелектриках зі слабким зв'язком (кварц) збуджується гармонічними джерелами, розташованими в центрах зазорів ЗШП, а в п'єзоелектриках з сильним зв'язком (ніобат літію, германат вісмуту, оксид цинку, нітрид алюмінію, п'єзокераміка системи ЦТС) – джерелами, розташованими в центрах електродів зустрічно – штирового перетворювача. Знак сумарного Δ – джерела визначається знаком електричного поля в зазорі або під електродом, а фаза – координатою центра зазору або електроду.

При розробці моделі використано наступну систему параметрів:

- центральні частоти генераторів f_i , частотне розстроювання другого та третього генераторів відносно частоти першого генератора відповідно позначаються δ_2 та δ_3 ;
- короткочасна нестабільність частоти генераторів δ ;
- періоди зустрічно – штирових перетворювачів відповідно дорівнюють довжинам поверхневих акустичних хвиль, тобто $W_i = \lambda_i$;
- кількість електродів вхідного і контрольного ЗШП N та ЗШП секції ПАХ – приймача M для кожної частоти f_i ;
- коефіцієнт згасання ПАХ на поверхні хвилеводу α_0 ;
- коефіцієнт дисперсії фазової швидкості поверхневої акустичної хвилі під ПАХ – приймачем α ;
- торцеве биття приймача відносно поверхні ПАХ – хвилеводу β ;
- ексцентриситет вісі приймача відносно вісі кільцевого ПАХ – хвилеводу σ ;
- відносний зазор між приймачем та поверхнею хвилеводу X_i / λ_i .

До зустрічно – штирових перетворювачів 4 і 5 та ЗШП приймача ПАХ 6 висуваються наступні вимоги:

- ефективне збудження та приймання ПАХ на заданих трьох частотах f_i ;

– компенсація похибок вимірювання із-за неоднорідності хвилеводу і конструкторсько-технологічних неточностей виготовлення, що вимагає застосування ЗШП приймача із значною кількістю електродів.

Вхідний сигнал у вигляді суперпозиції трьох електричних сигналів $u_i^{\text{вх}} = U_i^{\text{вх}} \exp(j(2\pi f_i t + \Psi_i^0))$ поступає на вхідний ЗШП і збуджує за рахунок зворотного п'єзоелекту біжучі ПАХ, що поширюються в кільцевому п'єзоелектричному хвилеводі, який є кільцевим резонатором біжучих хвиль, в якому відбувається синфазне сумування хвиль при виконанні умови:

$$2\pi R = N_i^0 \lambda_i, \quad (1)$$

де R – середній радіус хвилеводу; λ_i – резонансний довжини ПАХ на частотах f_i ; N_i^0 – кількість довжин ПАХ λ_i , що розміщуються в кільцевому хвилеводі при резонансі, який досягається зміною частот генераторів.

Поверхневі акустичні хвилі можна представити як суму акустичних хвиль a_k , що генеруються кожним дискретним Δ – джерелом вхідного ЗШП синфазно для відповідної частоти.

Нехтуючи ефектом кінцевої ширини електродів, у разі рівності ширини електроду і зазору, за якої ефективність ЗШП максимальна, і кількості електродів $N \gg 1$, поверхневу акустичну хвилю, що збуджується вхідним ЗШП, у точці з координатою Z_i у перерізі кільцевого хвилеводу на основі моделі дискретних Δ – джерел для кожної частоти f_i можна подати у вигляді:

$$a_i = \sum_{k=1}^N a_k = A_i \sum_{k=1}^N \exp(j\Psi_i^k), \quad (2)$$

де $A_i = A_{mi} \exp(j(2\pi f_i t + \Psi_i^0 + \Psi_i^\alpha))$; $A_{mi} = \gamma \gamma_i U_i^{\text{вх}}$ – амплітуда ПАХ на частоті f_i ; γ – коефіцієнт електромеханічного перетворення електричного сигналу в ПАХ; γ_i – коефіцієнт, який враховує втрати на дифракцію і поширення хвилі до точки хвилеводу з координатою Z_i , де знаходиться перше Δ – джерело секції ПАХ – приймача з періодом електродів $W_i = \lambda_i$ (у першому наближенні γ_i можна апроксимувати функцією $\gamma_i = \exp(-\alpha_0 Z_i)$, де α_0 – стала згасання ПАХ на поверхні хвилеводу); $\Psi_i^\alpha = -2\pi(1-\delta)(Z_i + \alpha l_i)/\lambda_i$; $\delta \approx 10^{-8} \dots 10^{-7}$ – частотне розстроювання, що виникає в результаті нестабільності частот генераторів; $\lambda_i = V/f_i$; V та λ_i – фазова швидкість і довжина ПАХ на частотах f_i ; α – коефіцієнт дисперсії фазової швидкості хвиль під приймачем, залежний від конструктивних параметрів і величини зазору X_i між поверхнею хвилеводу та приймачем, при $X_i/\lambda_i \geq 0,10$ можна прийняти $\alpha \approx 0$

[10, 11]; l_i – відстань від краю підкладки приймача до першого Δ – джерела відповідної секції ПАХ – приймача; N – кількість електродів у кожній секції вхідного ЗШП; Ψ_i^k – додатковий фазовий зсув, що вноситься розташованим на відстані $Z_i^k = 0,5(k-1)W_i$ Δ – джерелом з номером k від початку відповідної секції вхідного ЗШП, визначається співвідношенням:

$$\Psi_i^k = \frac{2\pi}{\lambda_i} (1-\delta) Z_i^k - (k-1)\pi = -(k-1)\pi\delta. \quad (3)$$

Підсумовуючи у рівнянні (2) з урахуванням (1) та (3), отримаємо комплексний коефіцієнт передачі вхідного ЗШП з відрізком хвилеводу, що закінчується в області кільцевого резонатора, при малих частотних розстроюваннях ($\delta \ll 1$):

$$\bar{K}_i^{\text{вх}} = \bar{F}_i^{\text{вх}} K_i^{\text{вх}} \exp(j\Psi_i^{\text{вх}}), \quad (4)$$

де $K_i^{\text{вх}}$ та $\Psi_i^{\text{вх}}$ – відповідно модуль і аргумент коефіцієнта передачі вхідного ЗШП на частотах f_i ідеального вимірювального перетворювача ($\delta = 0$, $\alpha = 0$, $W_i = \lambda_i$), що визначаються співвідношеннями:

$$K_i^{\text{вх}} = \gamma N; \quad (5)$$

$$\Psi_i^{\text{вх}} = -\frac{2\pi}{\lambda_i} Z_i; \quad (6)$$

$\bar{F}_i^{\text{вх}}$ – комплексний коефіцієнт похибки, який можна представити у вигляді:

$$\bar{F}_i^{\text{вх}} = F_i^{\text{вх}} \exp(j\phi_i^{\text{вх}}), \quad (7)$$

де $F_i^{\text{вх}}$ і $\phi_i^{\text{вх}}$ – модуль і аргумент коефіцієнта похибки:

$$F_i^{\text{вх}} = \gamma_i \frac{\sin(N\pi\delta/2)}{(N\pi\delta/2)}; \quad (8)$$

$$\phi_i^{\text{вх}} = \left[-(N-1)\frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{\lambda_i}(Z_i + \alpha l_i) \right] \delta. \quad (9)$$

При $\delta_{2,3} \gg \delta_H$, де δ_H – відносний частотний діапазон для налаштування на розрахункові частоти f_i , можна нехтувати вкладом у вихідний сигнал ПАХ – приймача сигналів за рахунок бічних пелюсток амплітудно – частотних характеристик (АЧХ) сусідніх частот. Тоді, із урахуванням експоненціального убавання потенціалу електричного поля хвилі від відстані X_i до поверхні п'єзоелектричного хвилеводу $\phi = \phi_0 \exp(-2\pi X_i/\lambda_i)$ [23], де ϕ_0 – потенціал електричного поля на поверхні хвилеводу, дисперсії фазової швидкості ПАХ під приймачем α [10, 11], наявності торцевого биття, яке призводить до нахилу приймача

на кут β (рис. 3, а) відносно поверхні хвилеводу, що призводить до того, що робочою шкалою буде проекція кільцевого хвилеводу з ПАХ на площину приймача, і ексцентриситету σ – відхилення осі приймача відносно осі хвилеводу (рис. 3, б), який призводить до зміщення дискретних Δ – джерел приймача на кут φ_i^q , сигнал u , що індукується у приймачі, можна представити як суму електричних сигналів $u_i^{\text{вих}}$ з частотами f_i , кожний з яких є сумою сигналів u_i^q , що виникають в кожному Δ – джерелі приймача відповідної секції, проекція яких на поверхню хвилеводу при $2d/R \ll 1$, де $2d$ – ширина хвилеводу, має координату Z_i^q від початку першої секції Z_i з періодом ЗШП W_i ПАХ – приймача:

$$Z_i^q = R(\theta_i^q + \varphi_i^q), \quad (10)$$

де θ_i^q і φ_i^q – відповідно проекція кутового положення Δ – джерела приймача на поверхню кільцевого хвилеводу і кут зсуву Δ – джерела в результаті торцевого биття і ексцентриситету, що визначаються співвідношеннями:

$$\theta_i^q = \arctg \left[\text{tg}(\theta_i^{q0}) (\cos \beta) \right]; \quad (11)$$

$$\varphi_i^q = \arcsin \left(\frac{\sigma}{R} \sin \theta_i^q \right), \quad (12)$$

де θ_i^{q0} – кутове положення Δ – джерела при $\sigma = \beta = 0$:

$$\theta_i^{q0} = \frac{(2q-1)W_i}{4R} = \frac{(2q-1)\pi}{2N_i}. \quad (13)$$

Електричний сигнал, що індукується у приймачі, можна представити у вигляді:

$$u_i^{\text{вих}} = \gamma_b a_i \sum_{q=1}^M \exp(E_i^q + jT_i^q), \quad (14)$$

де γ_b – коефіцієнт електромеханічного перетворення ПАХ a_i (2) в електричний сигнал;

$$E_i^q = -\alpha_0 Z_i^q - \alpha_\Delta \frac{2\pi}{\lambda_i} (1+\alpha)(1-\delta)(X_i + X_i^q); \quad (15)$$

$$T_i^q = -\frac{2\pi}{\lambda_i} (1+\alpha)(1-\delta) Z_i^q + \frac{\pi}{2} (2q-1); \quad (16)$$

M – кількість електродів (джерел) секції ЗШП ПАХ – приймача для кожної частоти f_i ; X_i та X_i^q – відповідно величина зазору між першим Δ – джерелом і поверхню хвилеводу та приріст зазору для q – го джерела секції приймача з періодом ЗШП W_i , який визначається як

$$X_i^q = R \sin \beta \sin \theta_i^{q0}. \quad (17)$$

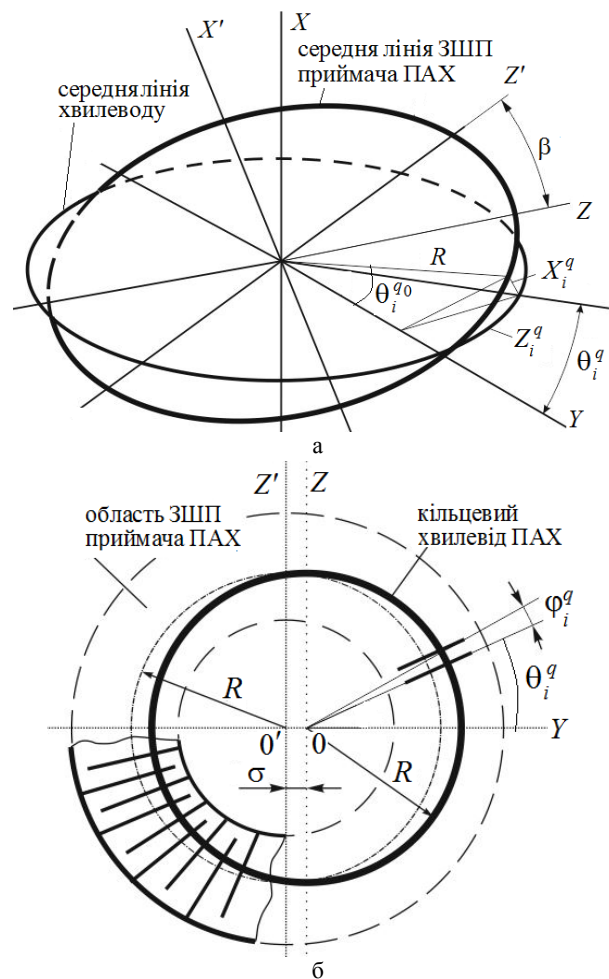


Рис. 3 – Схеми урахування впливу технологічних неточностей виготовлення ПП на похибку вимірювання кутового переміщення: а – вплив торцевого биття β ; б – вплив ексцентриситету σ

У співвідношенні (14) сумування виконується по тим дискретним Δ – джерелам приймача, які залишаються після проріджування в процесі формування секцій кільцевого ЗШП. Змінюючи номер першого Δ – джерела, з якого починається сумування, можна отримати залежність вихідного сигналу $u_i^{\text{вих}}$ від кутового положення приймача φ .

Використовуючи співвідношення (2) і (14), комплексний коефіцієнт передачі ПАХ – приймача можна представити наступним співвідношенням:

$$\bar{K}_i^{\text{вих}} = \bar{F}_i^{\text{вих}} K_i^{\text{вих}} \exp(j\Psi_i^{\text{вих}}), \quad (18)$$

де $K_i^{\text{вих}}$ та $\Psi_i^{\text{вих}}$ – модуль та аргумент коефіцієнта передачі приймача ідеального перетворювача кутових переміщень ($\alpha = \alpha_0 = \delta = \beta = \sigma = 0$, $\alpha_\Delta = 1$):

$$K_i^{\text{вих}} = \gamma_b M_\Sigma \exp \left[-\frac{2\pi X_i}{\lambda_i} \right]; \quad (19)$$

$$\Psi_i^{\text{вих}} = -\frac{2\pi R \varphi}{\lambda_i}, \quad (20)$$

де $M_{\Sigma} = PM$ – загальна кількість Δ – джерел приймача з періодом ЗШП W_i , які підлягають сумуванню; P – кількість секцій ЗШП приймача ПАХ кожної частоти; φ – кут повороту приймача; $\bar{F}_i^{\text{внх}}$ – комплексний коефіцієнт похибки ПАХ – приймача, яка виникає в результаті порушення режиму біжучих хвиль в кільцевому хвилеводі, згасання хвилі при поширенні (α_0), дисперсії фазової швидкості (α), нестабільності частот генераторів (δ), торцевого биття (β), ексцентриситету (σ) та неузгодження вихідного імпедансу ПАХ – приймача з фазометричним пристроєм (α_{Δ}), який можна представити у вигляді:

$$\bar{F}_i^{\text{внх}} = F_i^{\text{внх}} \exp(j\varphi_i^{\text{внх}}). \quad (21)$$

Забезпечуючи виконання умови $X_i / \lambda_i \geq 0,1$, при якій дисперсія фазової швидкості незначна ($\alpha \approx 0$), та приймаючи $\sigma/R \ll 1$ і $\beta \approx X_i^q / R \ll 1$, отримаємо формули для модуля $F_i^{\text{внх}}$ та аргумента $\varphi_i^{\text{внх}}$ комплексного коефіцієнта похибки ПАХ – приймача:

$$F_i^{\text{внх}} = S_{\Sigma} \exp(A^0); \quad (22)$$

$$\varphi_i^{\text{внх}} = \arctg\left(\frac{S'_{\Sigma}}{S''_{\Sigma}}\right), \quad (23)$$

$$\text{де } A^0 = \alpha_{\Delta} \frac{2\pi X_i}{\lambda_i} \delta; \quad S_{\Sigma} = \sqrt{(S'_{\Sigma})^2 + (S''_{\Sigma})^2};$$

$$S'_{\Sigma} = \sum_{q=1}^M \exp(H_i^q) \cos(G_i^q);$$

$$S''_{\Sigma} = \sum_{q=1}^M \exp(H_i^q) \sin(G_i^q);$$

$$H_i^q = -\frac{\alpha_0 \lambda_i}{4} (2q-1) +$$

$$+ \frac{\alpha_0 N_i \lambda_i \beta^2}{8\pi} \sin(2\theta_i^q) - [\alpha_0 \sigma - \alpha_{\Delta} N_i (1-\delta) \beta] \sin \theta_i^q;$$

$$G_i^q = \frac{\pi}{2} \delta (2q-1) + \frac{N_i (1-\delta) \beta^2}{4} \sin(2\theta_i^q) - \frac{2\pi}{\lambda_i} (1-\delta) \sigma \sin \theta_i^q.$$

Комплексний коефіцієнт передачі перетворювача кутових переміщень знаходиться як добуток коефіцієнтів передачі вхідного ЗШП (4) та ПАХ – приймача (18):

$$\bar{K}_i = \bar{K}_i^{\text{вх}} \bar{K}_i^{\text{внх}} = \bar{F}_i K_i^0 \exp(j\Phi_i^0), \quad (24)$$

де K_i^0 і Φ_i^0 – модуль і аргумент (функція перетворення) коефіцієнта передачі ідеального перетворювача ($\alpha = \alpha_0 = \delta = \beta = \sigma = 0$, $\alpha_{\Delta} = 1$):

$$K_i^0 = \gamma_1 \gamma_b N M_{\Sigma} \exp\left[-\frac{2\pi X_i}{\lambda_i}\right]; \quad (25)$$

$$\Phi_i^0 = -\frac{2\pi}{\lambda_i} (Z_i + R\varphi) = \Delta\Phi_i + 2\pi N_i + \Psi_i, \quad (26)$$

де $\Delta\Phi_i$ – початкові фази сигналів ПАХ-приймача на частотах f_i ; N_i – кількість довжин хвиль (кількість циклів фази) на відповідних частотах при переміщенні приймача на кут φ ; Ψ_i – дробні частки фазового набігання на частотах f_i , які фіксуються фазометричними пристроями і дозволяють однозначно визначити положення ПАХ – приймача в межах кута λ_i/R .

Із співвідношень (4), (18) та (24) при $\alpha = \alpha_0 = \beta = \sigma = 0$, $\alpha_{\Delta} = 1$ та $\delta \neq 0$ отримуємо залежність модуля коефіцієнта передачі (амплітудно-частотної характеристики) K_i^{δ} первинного перетворювача кутових переміщень від частоти:

$$K_i^{\delta} = \gamma \gamma_b N P M \frac{\sin(0,5N\pi\delta)}{\sin(0,5\pi\delta)} \cdot \frac{\sin(0,5M\pi\delta)}{\sin(0,5\pi\delta)} \times \frac{\sin(PM\pi\delta)}{\sin(M\pi\delta)} \exp\left[-\frac{2\pi}{\lambda_i} (1-\delta) X_i\right]. \quad (27)$$

Комплексний коефіцієнт похибки перетворювача кутових переміщень \bar{F}_i у формулі (24) можна представити у вигляді добутку коефіцієнта похибки вхідного ЗШП $\bar{F}_i^{\text{вх}}$ (7) і ПАХ – приймача $\bar{F}_i^{\text{внх}}$ (21), тобто:

$$\bar{F}_i = \bar{F}_i^{\text{вх}} \bar{F}_i^{\text{внх}} = F_i \exp(j\varphi_i); \quad (28)$$

де F_i і φ_i – модуль і аргумент коефіцієнта похибки перетворювача:

$$F_i = F_i^{\text{вх}} F_i^{\text{внх}}; \quad (29)$$

$$\varphi_i = \varphi_i^{\text{вх}} + \varphi_i^{\text{внх}}. \quad (30)$$

Тоді функція перетворення перетворювача кутових переміщень приймає вигляд:

$$\Phi = \Phi_i^0 + \varphi_i. \quad (31)$$

На рис. 4, а представлено теоретичні нормовані амплітудно – частотні характеристики (27), а на рис. 4, б функції перетворення (26) 3-х частотного первинного перетворювача кутових переміщень при $R = 2048\lambda_i/2\pi$.

На рис. 5 – 9 представлено теоретичні залежності модуля F_i (29) та аргумента φ_i (30) коефіцієнта похибки перетворювача кутових переміщень від нестабільності частоти генератора δ при різних конструктивних параметрах.

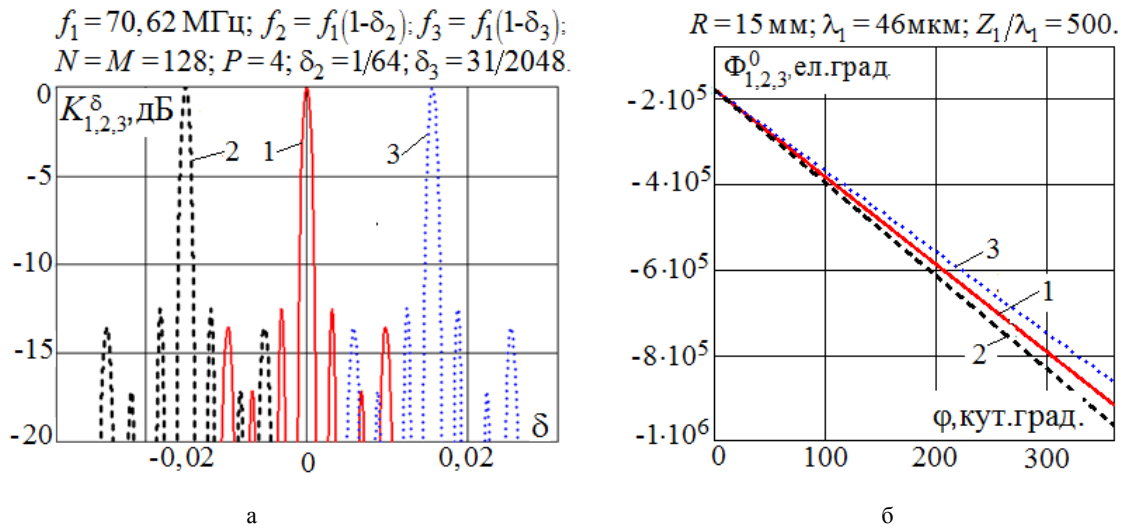


Рис. 4 – Теоретичні вихідні характеристики ПП кутових переміщень на ПАХ: а – нормована АЧХ; б – функції перетворення

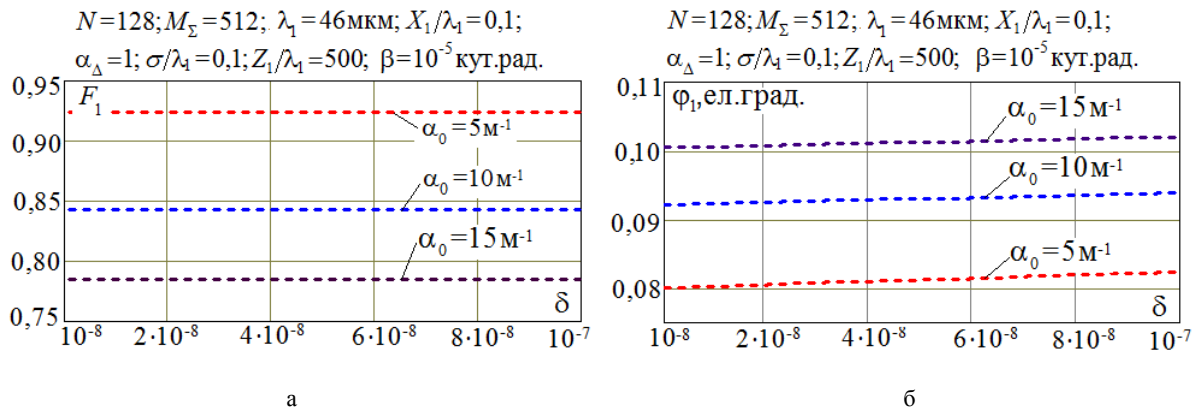


Рис. 5 – Теоретичні залежності коефіцієнта похибки ПП кутових переміщень на ПАХ від нестабільності частоти генератора δ при $X_1/\lambda_1 = 0,1$, $\sigma/\lambda_1 = 0,1$ та $\beta = 10^{-5}$: а – модуля F_1 ; б – аргумента Φ_1

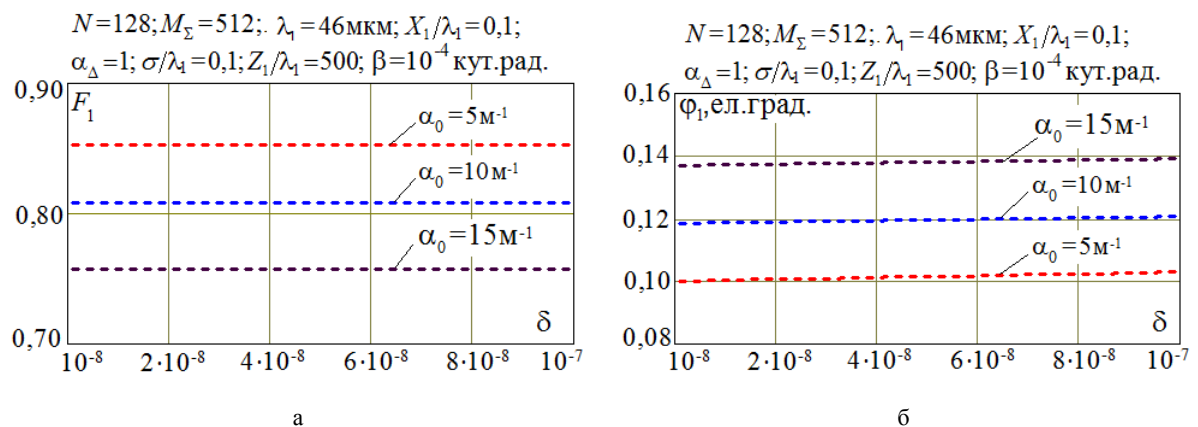


Рис. 6 – Теоретичні залежності коефіцієнта похибки ПП кутових переміщень на ПАХ від нестабільності частоти генератора δ при $X_1/\lambda_1 = 0,1$, $\sigma/\lambda_1 = 0,1$ та $\beta = 10^{-4}$: а – модуля F_1 ; б – аргумента Φ_1

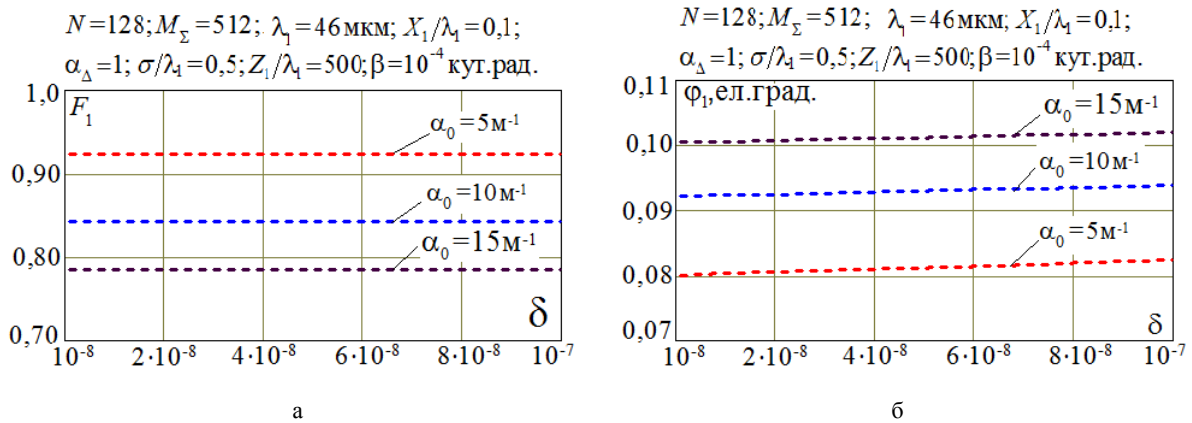


Рис. 7 – Теоретичні залежності коефіцієнта похибки ПП кутових переміщень на ПАХ від нестабільності частоти генератора δ при $X_1/\lambda_1=0,1$, $\sigma/\lambda_1=0,5$, $\beta=10^{-4}$: а – модуля F_1 ; б – аргумента φ_1

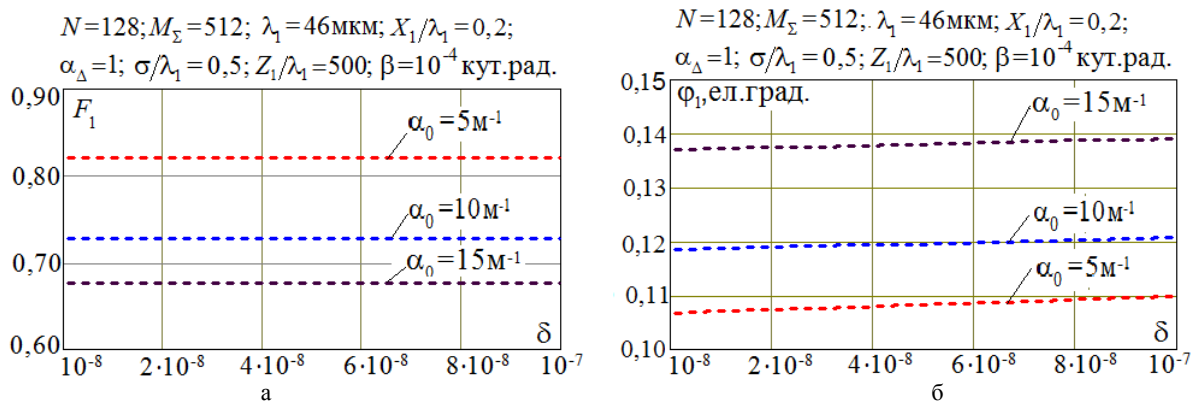


Рис. 8 – Теоретичні залежності коефіцієнта похибки ПП кутових переміщень на ПАХ від нестабільності частоти генератора δ при: $X_1/\lambda_1=0,2$, $\sigma/\lambda_1=0,5$, $\beta=10^{-4}$: а – модуля F_1 ; б – аргумента φ_1

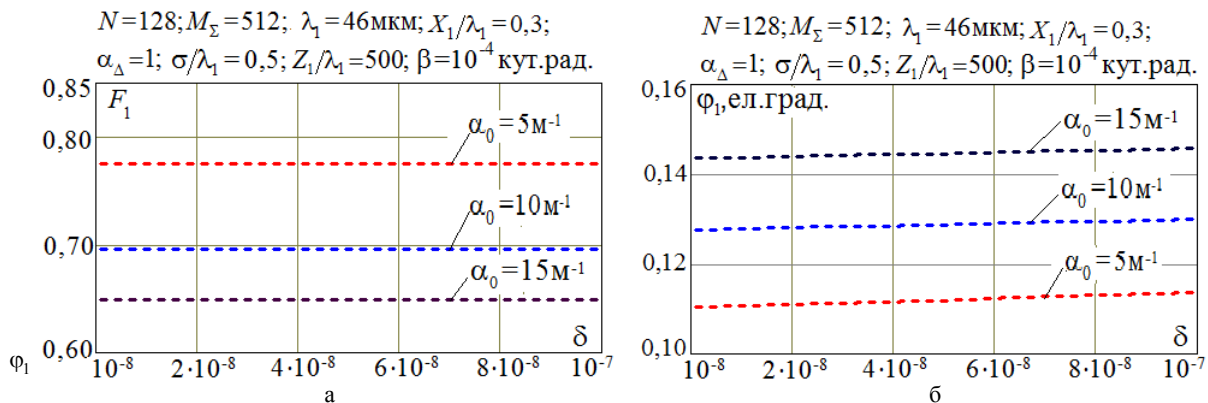


Рис. 9 — Теоретичні залежності коефіцієнта похибки ПП кутових переміщень на ПАХ від нестабільності частоти генератора δ при: $X_1/\lambda_1=0,3$, $\sigma/\lambda_1=0,5$, $\beta=10^{-4}$: а – модуля F_1 ; б – аргумента φ_1

Із результатів теоретичних розрахунків випливає, що при частотному розстроюванні в результаті нестабільності частоти генератора $\delta=10^{-8}\dots 10^{-7}$ модуль коефіцієнта похибки при заданих параметрах змінюється в інтервалі $F_1=0,65\dots 0,93$, а аргумент — $\varphi_1=0,08\dots 0,15$ ел.град.

Наприклад, при $\delta=10^{-8}\dots 10^{-7}$, $\beta=10^{-4}$, $\sigma/\lambda_1=0,5$, $X_1/\lambda_1=0,2$ теоретичне значення фазової похибки буде в інтервалі $\varphi_1=0,11\dots 0,14$ ел.град., що

сумірна роздільній здатності цифрового фазометра типу Ф5126.

Висновки. Аналіз математичної моделі, результатів чисельних розрахунків дають змогу сформулювати вимоги до конструктивних та електричних параметрів первинного перетворювача кутових переміщень на ПАХ:

- діапазон вимірювання $\varphi=0\dots 360$ кут.град.;
- довжина поверхневої акустичної хвилі $\lambda_1=30\dots 100$ мкм;

- торцеве биття приймача не більше $\beta = 10^{-4}$ радіан;
- відносний ексцентриситет приймача не більше $\sigma/\lambda_i \leq 0,5$;
- відносний зазор між поверхнею хвилеводу та ПАХ – приймачем $X_i/\lambda_i = 0,1 \dots 0,3$;
- кількість електродів секції вхідного ЗПП $N < 200$;
- кількість електродів секції ПАХ-приймача $M < 200$;
- кількість секцій приймача на кожну частоту $P = 4$;
- радіус хвилеводу $R = 10 \dots 20$ мм .
- короткочасна нестабільність частоти генератора $\delta = 10^{-8} \dots 10^{-7}$ за 1 секунду.

Таким чином, виконання цих вимог дозволяє створення перетворювачів для однозначного вимірювання кутових переміщень в діапазоні $\varphi = 0 \dots 360$ кут.град. при потенційних значеннях роздільної здатності і абсолютної похибки на точній шкалі, які сумірні с метрологічними параметрами індуктосинів, фотоелектричних перетворювачів та пристроїв на основі інтерферометрів, але мають значно менші масогабаритні показники, вартість та складність конструкції.

Список літератури:

1. Поляков, П. Ф. Акустоэлектроника. Физико-технологические основы и применение [Текст]: спр. пос. / П. Ф. Поляков, В. А. Хорунжий, В. П. Поляков. – Харьков: СМІТ, 2007. – 552 с.
2. Жовнір, М. Ф. Вимірювальні перетворювачі фізичних величин на поверхневих акустичних хвилях [Текст] / М. Ф. Жовнір, М. Г. Черняк, Д. В. Черненко, Л. М. Шеремет // Електроніка і зв'язь. – 2011. – № 1(60). – С. 153-157.
3. Fachberger, R. Monitoring of the temperature inside a lining of a metallurgical vessel using a SAW temperature sensor [Text] / R. Fachberger, A. Erlacher // Procedia Chemistry, 2009. – № 1 (1). – P. 1239-1242. doi: [10.1016/j.proche.2009.07.309](https://doi.org/10.1016/j.proche.2009.07.309)
4. Bogdan, O. ZnO Nanostructures as Sensing Element of Acoustic Wave Sensor [Text] / O. Bogdan, A. Orlov, O. Petrishev, V. Ulianova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2012. – № 6/12 (60) – P. 16-22. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/6021/5417>
5. Zbrutsky, A. Creation of low cost linear accelerometers for navigation and control systems [Текст] / A. Zbrutsky, N. Chernyak, G. Skripkovsky // Symposium Gyro Technology. – 2005. – P. 4.1-4.11.
6. Ленух, Я. И. Датчик угла поворота генераторного типа с элементом на поверхностных акустических волнах [Текст] / Я. И. Ленух // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – № 3. – С. 24-25.
7. Kalinin, V. Development of a calibration procedure for contactless torque and temperature sensors based on SAW resonators [Text] / V. Kalinin, R. Lohr, A. Leigh // 2008 IEEE Ultrasonics Symposium, 2008. – P. 1865-1868. doi: [10.1109/ultsym.2008.0459](https://doi.org/10.1109/ultsym.2008.0459)
8. Hribsek, M. F. Surface Acoustic Wave Sensors in Mechanical Engineering [Текст] / M. F. Hribsek, D. V. Tomic, M. R. Radosavljevic // FME Transactions. – 2010. – № 38. – P. 11-18.
9. Черненко, Д. В. Вимірювальні перетворювачі тиску на основі збудження електричного поля поверхневих акустичних хвиль [Текст] / Д. В. Черненко, О. М. Кузьменко, М. Ф. Жовнір // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2013. – № 1. – С. 62-66.
10. Жовнір, М. Ф. Математичні моделі сенсорів переміщень та тиску на основі збудження електричного поля поверхневих акустичних хвиль [Текст] / М. Ф. Жовнір, О. О. Олійник, Л. Д. Писаренко // Журнал нано та електронної фізики. – 2016. – № 8 (1). – С. 01024-01025. doi: [10.21272/jnep.8\(1\).01024](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01024)
11. Жовнір, М. Ф. Вимірювальні перетворювачі мікропереміщень

- та тиску на поверхневих акустичних хвилях [Текст] / М. Ф. Жовнір, М. В. Бітов, Л. Д. Писаренко // Електроніка та зв'язок. – 2016. – Т. 21, № 4 (93). – С. 49-57.
12. Жовнір, М. Ф. Оцінка потенційних роздільної здатності і точності вимірювальних перетворювачів лінійних та кутових переміщень на базі використання фазових набігань поверхневих акустичних хвиль [Текст] / М. Ф. Жовнір, О. В. Шостак // Електроніка та зв'язок. – 2015. – Т. 20, № 3 (86). – С. 101-106.
13. Жовнір, М. Ф. Розробка пристроїв на ПАХ для вимірювання лінійних та кутових переміщень [Текст] / М. Ф. Жовнір, О. О. Олійник // Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2015. – № 52 (1161). – С. 60-65.
14. Жовнір, М. Ф. Математична модель первинного перетворювача лінійних переміщень з рухомим приймачем поверхневих акустичних хвиль [Текст] / М. Ф. Жовнір // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Механіко-технологічні системи та комплекси». – 2016. – № 7 (1179). – С. 48-57.
15. Reindl, L. Wireless Passive Sensors: Basic Principles and Performances [Text] / L. Reindl // IEEE SENSORS. – 2008. – P. 1607-1610. doi: [10.1109/icsens.2008.4716758](https://doi.org/10.1109/icsens.2008.4716758)
16. Zhovnir, M. F. Radio SAW-Sensors for Physical Parameters Measurement [Text] / M. F. Zhovnir, O. M. Kuzmenko, S. I. Pokutnyi // Journal of Applied Chemistry. – 2015. – № 3 (1). – P. 7-13.
17. Mackensen, E. Wireless Passive SAW Identification Marks and Sensors [Text] / E. Mackensen, L. Reindl // Smart Sensors and MEMS. – 2004. – № 181. – P. 155-202. doi: [10.1007/978-1-4020-2929-5_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2929-5_5)
18. Matsuzaki, R. Wireless Monitoring of Automobile Tires for Intelligent Tires [Text] / R. Matsuzaki, A. Todoroki // MDPI – Sensors. – 2008. – № 8. – P. 8123-8138. doi: [10.3390/s8128123](https://doi.org/10.3390/s8128123)
19. Chernenko, D. Wireless Passive Sensor Using Frequency Coded SAW Structures [Text] / D. Chernenko, M. Zhovnir, O. Oliinyk, B. Tsyganok // 35th International Spring Seminar on Electronics Technology, 2012. doi: [10.1109/isse.2012.6273174](https://doi.org/10.1109/isse.2012.6273174)
20. Олинер, А. Поверхностные акустические волны [Текст] / А. Олинера. – Москва: Мир. – 1981. – 390 с.
21. Бирюков, С. В. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах [Текст] / С. В. Бирюков, Ю. В. Гуляев, В. В. Крылов, В. П. Плесский. – Москва: Наука. – 1991. – 416 с.
22. Жовнір, М. Ф. П'єзоелектричні плівкові хвилеводи поверхневих акустичних хвилях [Текст] / М. Ф. Жовнір // Журнал нано- та електронної фізики. – 2016. – Т. 8, № 4 (1), – С. 04007-1-04007-7. doi: [10.21272/jnep.8\(4\(1\)\).04007](https://doi.org/10.21272/jnep.8(4(1)).04007)
23. Морган, Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах [Текст] / Д. Морган. – Москва: Радио и связь, 1990. – 416 с.

Bibliography (transliterated):

1. Polyakov, P., Horunzhyj, V., Polyakov, V. (2007). Akustoelektronika. Fiziko-technologicheskie osnovy i primenenie. Kharkiv: SMYT, 552.
2. Zhovnir, M. F., Chernyak, M. G., Chernenko, D. V., Sheremet, L. M. (2011). Vymiryuvalni peretvoryuvachi fizychnyh velychyn na poverknevnyh akustychnyh hvyllyah. Electronics and Communications, 1 (60), 153-157.
3. Fachberger, R., Erlacher, A. (2009). Monitoring of the temperature inside a lining of a metallurgical vessel using a SAW temperature sensor. Procedia Chemistry, 1 (1), 1239-1242. doi: [10.1016/j.proche.2009.07.309](https://doi.org/10.1016/j.proche.2009.07.309)
4. Bogdan, O., Orlov, A., Petrishev, O., Ulianova, V. (2012). ZnO Nanostructures as Sensing Element of Acoustic Wave Sensor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 6(12(60)), 16-22. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/6021/5417>
5. Zbrutsky, A., Chernyak, M., Skripkovsky, G. (2005). Creation of low cost linear accelerometers for navigation and control systems. Symposium Gyro Technology, 4.1-4.11.
6. Lepykh, Ya. I. (2009). The turn angle gauge of generating type with an element on surface acoustic waves. Technology and design in electronic equipment, 3, 24-25.
7. Kalinin, V., Lohr, R., Leigh, A. (2008). Development of a calibration procedure for contactless torque and temperature sensors based on SAW resonators. 2008 IEEE Ultrasonics Symposium. 1865-1868. doi: [10.1109/ultsym.2008.0459](https://doi.org/10.1109/ultsym.2008.0459)

8. Hribsek, M. F., Tomic, D. V., Radosavljevic, M. R. (2010). Surface Acoustic Wave Sensors in Mechanical Engineering. FME Transactions, 38, 11–18.
9. Chernenko, D. V., Kuzmenko, O. M., Zhovnir, M. F. (2013). Vymiryvalni peretvoryuvachi tysku na osnovi zburennya elektrychnogo polya poverkhnivykh akustychnykh hvyl. Visnyk Kremenchuk'skogo Nacionalnogo Universytetu Imeni Mykhajla Ostrogradskogo, 1, 62–66.
10. Zhovnir, M. F., Oliinyk, O. O., Pysarenko, L. D. (2016). Mathematical Models of Pressure and Microdisplacement Sensors Based on Electric Field Perturbation of the Surface Acoustic Waves. Journal of Nano and Electronic Physics, 8 (1), 010241–010245. doi:[10.21272/jnep.8\(1\).010241](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).010241)
11. Zhovnir, M. F., Bitov, M. V., Pysarenko, L. D. (2016). Vymiryvalni peretvoryuvachi mikropremishchen' ta tysku na poverkhnivykh akustychnykh khvylyakh. Elektronika ta zv'yazok, 21, 4 (93), 49–57.
12. Zhovnir, M. V., Shostak, O. V. (2015). Ocinka potencijnyx rozdilnoy zdatnosti i tochnosti vymiryvalnyx peretvoryuvachiv liniynykh ta kutovykh peremishchen' z vykorystannya fazovykh nabigan poverkhnivykh akustychnykh hvyl. Electronics and Communications, 20, 3 (86), 101–106.
13. Zhovnir, M. V., Oliinyk, O. O. (2015). Rozrobka prystroyiv na PAKh dlya vymiryvannya liniynykh ta kutovykh peremishchen'. Visnyk NTU «KhPI» Seriya: Mekhaniko-tehnologichni systemy ta komplekxy, 52 (1161), 60–65.
14. Zhovnir, M. (2016). Matematychna model' pervynnoho peretvoryuvacha liniynykh peremishchen' z rukhomym pryumachem poverkhnivykh akustychnykh khvyly. Visnyk NTU «KhPI». Seriya «Mekhaniko-tehnologichni systemy ta komplekxy», 7 (1179), 48–57.
15. Reindl, L. M. (2008). Wireless Passive Sensors: Basic principles and performances. IEEE Sensors. 1607–1610. doi:[10.1109/icsens.2008.4716758](https://doi.org/10.1109/icsens.2008.4716758)
16. Zhovnir, M. F., Kuzmenko, O. M., Pokutnyi, S. I. (2015). Radio SAW-Sensors for Physical Parameters Measurement. Journal of Applied Chemistry, 3 (1), 7–13.
17. Mackensen, E., Reindl, L. (2004). Wireless Passive SAW Identification Marks and Sensors. Smart Sensors and MEMS, 181, 155–202. doi:[10.1007/978-1-4020-2929-5_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2929-5_5)
18. Matsuzaki, R., Todoroki, A. (2008). Wireless Monitoring of Automobile Tires for Intelligent Tires. MDPI – Sensors, 8 (12), 8123–8138. doi:[10.3390/s8128123](https://doi.org/10.3390/s8128123)
19. Chernenko, D., Zhovnir, M., Tsyganok, B., Oliinyk, O. (2012). Wireless passive pressure sensor using frequency coded SAW structures. 35th International Spring Seminar on Electronics Technology. doi:[10.1109/isse.2012.6273174](https://doi.org/10.1109/isse.2012.6273174)
20. Oliner, A. (1981). Poverkhnostnyye akusticheskiye volny. Moscow: Mir, 390.
21. Byryukov, S., Hulyaev, Yu., Krylov, V., Plessky, V. (1991). Poverkhnostnyye akusticheskiye volny v neodnorodnykh sredakh. Moscow: Nauka, 416.
22. Zhovnir, M. F. (2016). Piezoelectric Film Waveguides for Surface Acoustic Waves. Journal of Nano- and Electronic Physics, 8(4(1)), 04007–1–04007–7. doi:[10.21272/jnep.8\(4\(1\)\).04007](https://doi.org/10.21272/jnep.8(4(1)).04007)
23. Morhan, D. (1990). Ustroystva obrabotky sygnalov na poverkhnostnykh akustycheskykh volnakh. Moscow: Radyo y svyaz, 416.

Надійшла (received) 15.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Математична модель первинного перетворювача кутових переміщень з кільцевим п'єзоелектричним хвилеводом поверхневих акустичних хвиль/ М. Ф. Жовнір// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.42–51. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2079-5459.

Математическая модель первичного преобразователя кутовых перемещений с кольцевым пьезоэлектрическим волноводом поверхностных акустических волн/ Н. Ф. Жовнір// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.42–51. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2079-5459.

A mathematical model of the primary transducer of angular displacements with piezoelectric waveguide surface acoustic waves/ M. Zhovnir//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.42–51. – Bibliogr.: 23. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Жовнір Микола Федорович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; доцент, кафедри Електронних приладів та пристроїв, вул. Політехнічна, 16, корпус №12. Київ, Україна, 03056; e-mail: zhovnir101@gmail.com.

Жовнір Николай Федорович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; доцент кафедры Электронных приборов и устройств, ул. Политехническая, 16, корпус №12. Киев, Украина, 03056; e-mail: zhovnir101@gmail.com.

Zhovnir Mykola – candidate of technical sciences, senior research assistant, associate professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»; Department of Electronic Devices and Equipment, Polytechnique str, 16, Kyiv, Ukraine, 03056, e-mail: zhovnir101@gmail.com.

УДК 677-487.5.23.275

М. Н. НУРИЕВ, Т. Т. МУСАЕВА

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПАКОВОК КРЕСТОВОЙ НАМОТКИ

В статье рассмотрены вопросы разработки алгоритма распознавания поверхности паковок крестовой намотки. Разработан алгоритм для обработки видеороликов, содержащих первичные данные о форме бобины и получения на их основе массивов координат точек, характеризующих форму бобины. Разработан алгоритм получения объемной графической модели паковки на основе массивов координат точек, характеризующих форму бобины.

Ключевые слова: алгоритм, распознавание, крестовая намотка, бобина, видеоролики, массивы координат, графическая модель

У статті розглянуто питання розробки алгоритму розпізнавання поверхні пакувань хрестового намотування. Розроблено алгоритми для обробки відеороликів, що містять первинні дані про форму бобіни, і отримання на їх основі масивів координат точок, що характеризують форму бобіни. Розроблено алгоритм отримання об'ємної графічної моделі пакування на основі масивів координат точок, що характеризують форму бобіни.

Ключові слова: алгоритм, розпізнавання, перехресне намотування, бобіна, відеоролики, масиви координат, графічна модель

The article deals with issues such as the development of the algorithm recognition forging cross winding. The algorithms for processing videos containing primary data on the shape of the bobbin, and receive their array-based coordinates of points characterizing the shape of the reel. An algorithm for obtaining a volume model graphics package based on arrays of coordinates of points characterizing the shape of the reel.

Keywords: algorithm, recognition, cross winding, bobbin, videos, sets of coordinates, graphical model

Введение. В настоящее время имеется довольно широкий выбор устройств, используемых для регистрации изображения. Сформулируем основные требования, которым должно отвечать регистрирующее устройство, входящее в состав аппаратного комплекса для контроля формы паковок:

– разрешающая способность устройства должна позволять регистрировать отдельные нити наиболее распространенного ассортимента на поверхности паковки;

– устройство должно иметь систему оцифровки изображения и непосредственной передачи его для обработки в ЭВМ;

– в устройстве должна быть предусмотрена возможность оперативной, последовательной съемки изображений на вращающейся паковке.

Анализ литературных данных. Разрешающая способность фотоаппаратов зависит от качества применяемых фотоматериалов [1]. Обычно технические съемки штриховых изображений производятся на пленку «Микрат-600», позволяющую получать разрешение до 600 лин/мм. Однако процесс получения снимков требует специального оборудования, расходных материалов и мокрого химического процесса обработки пленок и отпечатков. Для обработки изображения на компьютере его необходимо предварительно оцифровывать при помощи сканера.

В последнее время, с развитием глобальных каналов связи получают широкое распространение WEB-камеры [2]. Основной задачей при создании этих устройств разработчики ставят простоту монтажа и настройки, а также на объем информации генерируемый устройством. В связи с этим любая камера имеет USB выход, который подключается непосредственно к компьютеру. Достоинство WEB-камеры является также то, что она позволяет осуществлять управление съемкой непосредственно при помощи программного обеспечения с компьютера. Однако, разрешение видеосъемки такой камеры, как правило, не превышает 640×480 пикселей что недостаточно для отображения тонких нитей на поверхности исследуемой бобины.

Основные теоретические положения. В работе [3] рассмотрено влияние поворота шторки на угол ψ_Z относительно оси ξZ (рис. 1, а).

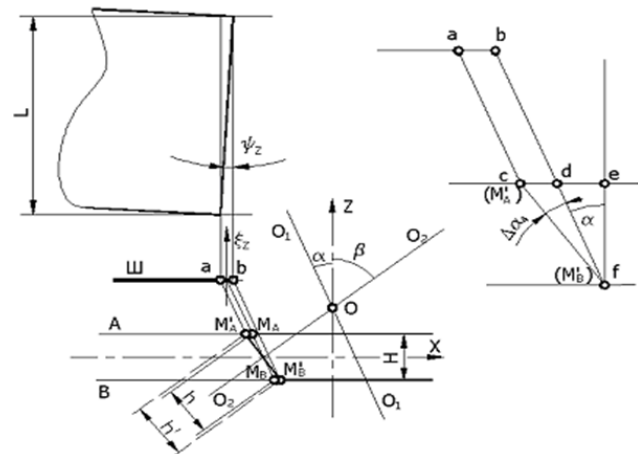


Рис. 1 – К определению погрешности масштаба преобразования, вызванного поворотом шторки вокруг оси ξZ параллельной оси Z

При этом края тени сместятся в плоскости шторки таким образом, что займут положения, обозначенные точками a и b. Длину отрезка ab можно рассчитать по формуле $ab = L \operatorname{tg} \psi_Z$. Схема хода лучей для расчета отклонения угла $\Delta\alpha_4$ показана на рис. 1, б. Отрезок $cd=ab$, тогда из треугольника fce с учетом того, что $de = H \operatorname{tg} \alpha$ получаем

$$\alpha + \Delta\alpha_4 = \operatorname{arctg} \frac{cd + ed}{H} = \operatorname{arctg} \frac{[\operatorname{tg} \alpha H + L \operatorname{tg} \psi_Z]}{H}$$

Окончательно имеем

$$\Delta\alpha_4 = \operatorname{arctg} \frac{[\operatorname{tg} \alpha H + L \operatorname{tg} \psi_Z]}{H} - \alpha \quad (1)$$

Объективы, особенно с большим увеличением, искажают изображение таким образом, что прямая линия на объекте превращается в линию, изогнутую по краям изображения [4]. Изображение профиля будет искривлено по краям и лишь в центральной зоне поля зрения оно наблюдается без искажений. В принятой системе координат искривленная средняя линия профиля может быть аппроксимирована параболой вида

$$y = ax^2, \quad (2)$$

где a – эмпирический коэффициент.

А линии выступов и впадин – параболой вида

$$y = a_1x^2 + h/2 \text{ и } y = a_2x^2 + h/2.$$

Тогда, при условии, что коэффициенты $a = a_1 = a_2$, максимальная абсолютная погрешность высоты профиля, наблюдаемая на краю изображения, будет равна

$$\Delta h_k = aL^2 / 4. \quad (3)$$

В случае если искажение изображения объективом отсутствует край тени должен представлять собой прямую линию. Однако, изображение искривляется вблизи границ поля зрения.

Для количественной оценки погрешности, вызванной этим искривлением изображение тени помещалось в окно программы AutoCAD в увеличенном виде. После чего средствами этой программы определялись координаты точек границы тени с шагом 1 см. Полученные данные аппроксимировались параболой вида (2). В результате, для использованного в аппаратном комплексе объектива, было получено следующее значение коэффициента $a = 3,28 \cdot 10^{-4}$.

Погрешность, связанная с искривлением изображения за счет несовершенства оптики является систематической погрешностью, которую можно устранить введением при обработке данных поправок, рассчитываемых по формуле (2). Требуемые поправки были учтены при разработке программного обеспечения аппаратного комплекса.

Материалы и методы исследования. Для снятия первичных данных о форме паковки разработано и изготовлено устройство. В основу его работы положен метод теневой проекции. Схема устройства представлена на рис. 2.

Для поиска изображения бобины в кадре предложено два варианта алгоритмов, модернизированных относительно [5, 6].

Блок-схема первого варианта алгоритма (поиска первой точки профиля паковок) представлена на рис. 3. На рис. 4. Приведено схематическое изображение бобины в кадре. Бобина условно показана черным цветом.

Изображения состоит из точек, образующих столбцы в направлении оси ОУ. Для поиска изображения бобины в кадре проводится оследовательный перебор точек в направлении оси ОУ начиная с левого крайнего столбца.

Принадлежность точек к изображению бобины определяется двум критериям: первый – цвет изображения, второй – минимальная ордината первого, имеющего контрастный, по отношению к фону, цвета.

Разница задается внутренним параметром MIN_REQUEST_WIDTH_BOBIN.

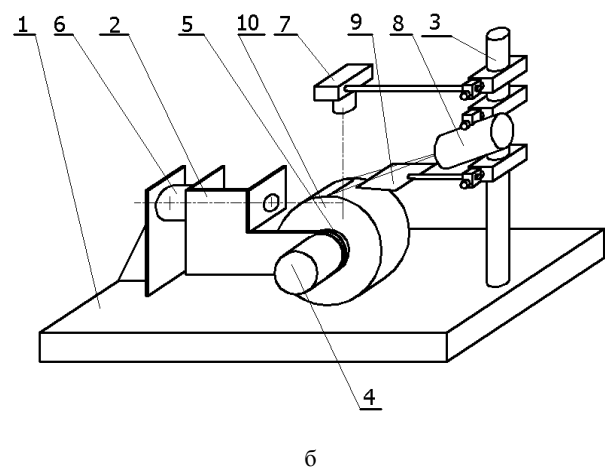
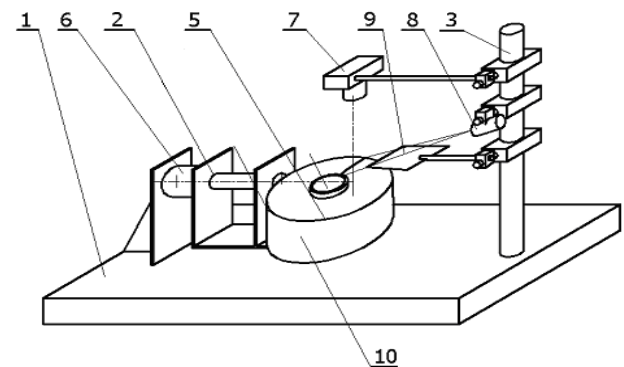


Рис. 2 – Схема устройства для снятия первичных данных о форме и размерах паковки: а – при контроле боковой поверхности паковки; б – при контроле торцевой поверхности паковки

Так на рис. 4 столбец 4 имеет высота 7 пикселей. В случае, если MIN_REQUEST_WIDTH_BOBIN равно 10, он будет распознан как принадлежащий изображению бобины. Изображение бобины будет распознано только начиная со второго столбца.

При втором варианте поиска бобины в кадре пользователь указывает точку, принадлежащую профилю и имеющую аппликату середины изображения бобины. Считывание координат начнется влево и вправо от указанной точки «одновременно». Следует отметить, что при втором способе алгоритм, приведенный на рис. 4, не используется.

Достоинство первого метода состоит в его полной автоматизации, пользователю не надо участвовать в настройке положения паковки. Второй метод в отличие от первого более быстрый. Выбор алгоритма используемого для распознавания координат профиля паковки происходит в меню настройки.

На рис. 4 правые 8 столбцов является фоном, при этом если значение параметра PixCheckEndBobin меньше 8, то конец профиля будет найден. Если же значение будет более 8, то конец профиля найден не будет, и координаты фона попадут в массив с координатами профиля.

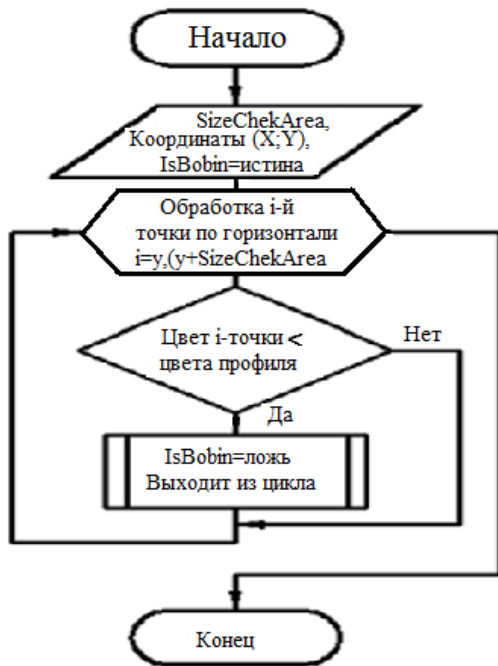


Рис. 3 – Блок-схема поиска первой точки профиля паковки белым

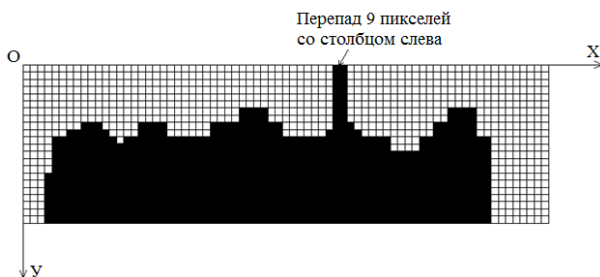


Рис. 4 – Схематическое изображение бобины в кадре

После того как найден конец профиля, в массив записывается флаг конца бобины, который задается внутренним параметром `FLAG_EMPTY_BOBIN`.

Координаты профилей каждого видеоролика хранятся в отдельном массиве. В программном обеспечении (ПО) для хранения полученных координат предусмотрено три массива: `BMPPProfileCoord0_1`, `BMPPProfileCoord0_2`, `BMPPProfileCoord0_3`, каждый из которых содержит координаты профилей двух торцов и боковой поверхности соответственно. Эти массивы хранят абсолютные координаты профиля. Для построения трехмерной модели паковки эти координаты преобразуются в относительные.

Результаты исследования. Рассмотрим процесс на примере рис. 4. Заполнение массива кадра начинается с того момента, когда найдена первая точка профиля бобины (столбец 5). Ее координата по Y принимается равной нулю. Далее координаты следующих точек принимаются относительно первой найденной.

Исходя из рис. 2, массив координат профиля (кадра) будет выглядеть следующим образом $(0, 0, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 0, -1, 0, 0, \dots, -3000)$. В конце массива стоит флаг `FLAG_EMPTY_BOBIN`. Значение флага выбрано таким, чтобы его нельзя было принять за координату очередной точки профиля. Аналогично хранится информация о каждом кадре. Размерность мас-

сива задается внутренним параметром `MAX_VIDEO_WIDTH`, который определяется, исходя из ширины кадра в пикселях.

Масштаб полученного изображения, как это показано в [7–10], определяется взаимным положением осветителя, бобины, шторки и фотоприемника. Кроме того, на него влияют оптическое и цифровое увеличение камеры. Для получения четкой тени шторку необходимо устанавливать как можно ближе к бобине. При этом в случае смены типоразмера бобины или контролируемой поверхности (боковая поверхность или торец) происходит изменение масштаба.

Определение масштаба теоретическими методами, изложенными в [5, 6], требует контроля большого числа размеров и обеспечения их точности. Для исключения этого в состав устройства входит мерная метка, которая представляет собой металлическую полоску шириной 1 см, расположенную в поле зрения регистрирующей камеры за пределами изображения бобины.

Для определения масштаба изображения, пользователь, с помощью манипулятора «мышь», отмечает координаты начала и конца мерного отрезка на изображении. Таким образом, программа получает координаты двух точек на изображении, расстояние между которыми на реальном объекте составляет 1 см. По изображению производится подсчет количества пикселей между отмеченными точками. После чего рассчитывается масштаб изображения, как количество пикселей изображения в одном сантиметре. Масштаб может быть задан вручную, если пользователь его знает.

Полученное значение масштаба сохраняется для использования в процессе обработки последующих кадров, если настройка устройства для съемки видеороликов не изменилась. В дальнейшем полученный масштаб используется при построении визуальной модели паковки и для вычисления единичных показателей, характеризующих форму паковки и отклонения формы от заданной.

Выводы

1. Разработан алгоритм, совмещающий процессы распознавания точек профиля паковки на ее изображение, полученном методом теневой проекции и фильтрации изображения от сопутствующих процессу съёмки дефектов.

2. Предложен метод расчета масштаб изображения, позволяющий снизить требования к точности позиционирования элементов устройства для контроля профиля паковок друг относительно друга и по отношению к бобине.

Список літератури:

1. Нуриев, М. Н. Обнаружение дефектов структуры намотки по изображению поверхности бобины с помощью преобразования Хоха [Текст] / М. Н. Нуриев // Известия Вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008. – № 3. – С. 128–131.
2. Рудовский, П. Н. Получение графической модели паковок крестовой мотки [Текст] / П. Н. Рудовский, М. Н. Нуриев, П. Н. Киселев // Известия Вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006. – № 3. – С. 124–125.
3. Рудовский, П. Н. Разработка комплексного показателя для оценки формы паковок крестовой мотки [Текст] / П. Н. Рудовский, М. Н. Нуриев, П. Н. Киселев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006. – № 5. –

- C. 131–133.
4. *Нурієв, М. Н.* Разрушающие методы контроля распределения плотности в теле намотки [Текст] / *М. Н. Нурієв* // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. – № 4 (55). – С. 44–48.
 5. *Киприна, Л. Ю.* Оценка качества структуры текстильных паковок с использованием современных информационных технологий [Текст] / *Л. Ю. Киприна, П. Н. Рудовский*. – Кострома: КГТУ, 2011. – 111 с.
 6. *Волгин, А. Б.* Обработка и распознавание цифрового изображения самокрученных нитей с целью определения значения и направления крутки [Текст] / *А. Б. Волгин, П. Н. Рудовский* // Вестник Костромского государственного технологического университета. – 2012. – № 2 (29). – С. 37–39.
 7. *Trisch, R.* Development of qualimetric approaches to the processes of quality management system at enterprises according to international standards of the ISO 9000 series [Text] / *R. Trisch, E. Gorbenko, N. Dotsenko, N. Kim, G. Kiporenko* // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/3 (82). – 18–24. doi: [10.15587/1729-4061.2016.75503](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75503)
 8. *Ashhepkova, N. S.* Mathcad in the kinematic and dynamic analysis of the manipulator [Text] / *N. S. Ashhepkova* // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – № 5/7 (77). – 54–63. doi: [10.15587/1729-4061.2015.51105](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51105)
 9. *Кушниренко, О.* Повышение помехоустойчивости «скользящего» корреляционного алгоритма распознавания печатных символов [Текст] / *О. Кушниренко, А. Садченко, А. Троянский* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4/2 (70). – С. 32–36. Режим доступа: <http://journals.urau.ua/ejet/article/view/26303/23978>
 10. *Godlevskij, M. D.* (2015). Static planning models synthesis of quality improvement of software development process [Text] / *M. D. Godlevskij, A. A. Goloskokova* // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – № 3/2 (75). – 23–29. doi: [10.15587/1729-4061.2015.43003](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43003)
 1. *Nuriev, M. N.* (2008). Obnaruzhenie defektov struktury namotki po izobrazheniju poverhnosti bobiny s pomoshh'ju preobrazovaniya Noha. Izvestija Vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti, 3, 128–131.
 2. *Rudovskij, P. N., Nuriev, M. N., Kiselev, P. N.* (2006). Poluchenie graficheskoy modeli pakovok krestovoj motki. Izvestija Vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti, 3, 124–125.
 3. *Rudovskij, P. N., Nuriev, M. N., Kiselev, P. N.* (2006). Razrabotka kompleksnogo pokazatelya dlja ocenki formy pakovok krestovoj motki. Izvestija vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti, 5, 131–133.
 4. *Nuriev, M. N.* (2016). Razrushajushhie metody kontrolja raspredelenija plotnosti v tele namotki. Progressivnye tehnologii i sistemy mashinostroeniya, 4 (55), 44–48.
 5. *Kiprina, L. Ju., Rudovskij, P. N.* (2011). Ocenka kachestva struktury tekstil'nyh pakovok s ispol'zovaniem sovremennyh informacionnyh tehnologij. Kostroma: KGTU, 111.
 6. *Volgin, A. B., Rudovskij, P. N.* (2012). Obrabotka i raspoznavanie cifrovogo izobrazheniya samokruchenyh nitej s cel'ju opredelenija znachenija i napravlenija krutki. Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta, 2 (29), 37–39.
 7. *Trisch, R., Gorbenko, E., Dotsenko, N., Kim, N., Kiporenko, G.* (2016). Development of qualimetric approaches to the processes of quality management system at enterprises according to international standards of the ISO 9000 series. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(3(82)), 18. doi: [10.15587/1729-4061.2016.75503](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75503)
 8. *Ashhepkova, N. S.* (2015). Mathcad in the kinematic and dynamic analysis of the manipulator. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(7(77)), 54–63. doi: [10.15587/1729-4061.2015.51105](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51105)
 9. *Kushnirenko, O., Cadchenko, A., Trojanskij, A.* (2014). Improving noise immunity of "sliding" correlation algorithm for printable characters recognition. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 4(2(70)), 32–36.
 10. *Godlevskij, M. D., Goloskokova, A. A.* (2015). Static planning models synthesis of quality improvement of software development process. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(2(75)), 23–29. doi: [10.15587/1729-4061.2015.43003](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43003)
- Bibliography (transliterated):**
1. *Nuriev, M. N.* (2008). Obnaruzhenie defektov struktury namotki po izobrazheniju poverhnosti bobiny s pomoshh'ju preobrazovaniya Noha. Izvestija Vuzov. Tehnologija tekstil'noj

Поступила (received) 06.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Разработка алгоритма распознавания поверхности паковок крестовой намотки/ М. Н. Нурієв, Т. Т. Мусаєва // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.52–55. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Разработка алгоритма распознавания поверхности паковок крестовой намотки/ М. Н. Нурієв, Т. Т. Мусаєва// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.52–55. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Development of algorithms surface recognition forging cross winding/ M. N. Nuriev, T. T. Musaeva//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.52–55. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Нурієв Магомедлі Нуреддин огли – доктор технічних наук, Азербайджанський Державний Економічний Університет, професор кафедри «Стандартизація та сертифікація», м. Баку, вул. Істіглаліят, 6, AZ1001

Мусаєва Тарана Тахір кизи – Азербайджанський Державний Економічний Університет, викладач кафедри «Стандартизація та сертифікація», вул. Істіглаліят, 6, м. Баку, Азербайджан, AZ1001

Нурієв Магомедлі Нуреддин огли – доктор технічний наук, Азербайджанський Государственный Экономический Университет, профессор кафедры «Стандартизация и сертификация»; Азербайджан, г. Баку, ул. Истиглалият, 6, AZ1001

Мусаєва Тарана Тахір кызы – Азербайджанський Государственный Экономический Университет, преподаватель кафедры «Стандартизация и сертификация»; ул. Истиглалият, 6, г. Баку, Азербайджан, AZ1001

Nuriyev Memmedali Nuraddin – Doctor of Mathematical Sciences, Azerbaijan State Economic University, Professor, Department of "Standardization and Certification"; Azerbaijan, Baku, Istiglaliyyat str., 6, AZ1001

Musaeva Tarana Tahir – teacher, Azerbaijan State Economic University, Department of "Standardization and Certification", Azerbaijan, Baku, Istiglaliyyat str., 6, AZ1001УДК 65.012.3: 316.422

О. С. САВЕЛЬЄВА, К. І. БЕРЕЗОВСЬКА, І. ХЕБЛОВ, Х. ВАЛІД ШЕР, І. М. ГУР'ЄВ, С. В. КОШУЛЯН

ВІРТУАЛЬНА ПЕРЕДИСЛОКАЦІЯ ДИСКРЕТНОГО ПРОСТОРУ-ЧАСУ В ЗАДАЧАХ ПЛАНУВАННЯ ПРОЕКТНОЇ ЛОГІСТИКИ

Для ефективного застосування фізичних аналогій при оптимізації непередбачених ресурсних потоків у проектному середовищі, які виникають, наприклад, при компенсації ризикових подій, необхідна наявність адекватної дискретної адаптивної віртуальної моделі простору управління проектами. Запропоновано метод побудови «гарячої» моделі на основі попередньої віртуальної передислокації її елементів в усіх функціональних областях. Модель практично реалізована при будівництві енергоспоруджень з позитивним технічним ефектом.

Ключові слова: проектні ризики, ресурсні потоки, «гаряча» модель, віртуальна передислокація, фізичні аналогії.

Для эффективного применения физических аналогий при оптимизации непредвиденных ресурсных потоков в проектной среде, возникающих, например, при реализации рисков событий, необходимо наличие адекватной дискретной адаптивной модели пространства управления проектами. Предложено построение такой модели с помощью виртуальных элементов с переменной проницаемостью и емкостью. Модель реализована при строительстве энергооборудований с положительным техническим эффектом.

Ключевые слова: проектные риски, ресурсные потоки, «горячая» модель, виртуальная передислокация, физические аналогии.

For the effective use of physical analogies in the optimization of emergency resource in the environment of design flows that occur, for example, when payment risk events, you need adequate adaptive virtual space discrete models of project management. The proposed method of constructing "hot" based on the model of the previous virtual relocation of its members in all functional areas. The model is practically implemented in the construction energoprojekt with a positive technical effect. Any thermodynamic substance (heat, pressure, weight, etc.), cannot abruptly go through any small area carrying, she must go all the way through all of the elements between the beginning and the end of the transfer without tearing and logistics resource can also move in that sense continuously, and may "jump" to any distance from the project start element to the end, bypassing all the intermediate elements. For playback of such "jumps" in the model a method is proposed, which involves preliminary "hot" relocation of a discrete space-time of the project activities. Under hot-relocation will understand prior changes in the structure of the original ordered discrete space-time, which runs continuously during the execution of the project, regardless of whether there are some risk events or not. That is, the current model structure of a discrete space-time is constantly changing, reproducing the current state of the existing cell and storage resources. The developed method of on-line geometrical adaptation of the structure of the elements of the environment to the real needs of the optimization processes, with the Express design of logistics flows, aimed at minimizing losses during the realization of risk events. Tests in Corporation "UNION" showed: the project execution period is reduced by 11 %; the cost of implementation of the project was reduced to 1.25 %; the amount of risk, which managed to be prevented – 17 %.

Keywords: project risks, resource flows, hot model, virtual relocation, physical analogy.

Вступ. Останнім часом широкого поширення набувають проекти створення великих розповсюджених об'єктів, які відрізняються розташуванням на значній території, що ускладнює, в першу чергу, проектну логістику, як планову, проектувану при початковому плануванні проекту, так і надзвичайну, викликану небажаними ризиковими подіями на об'єкті.

Управління проектом створення великих розповсюджених об'єктів, як і будь-яким іншим стратегічним процесом, підлягає ретельному структурному плануванню, яке забезпечує ефективне виконання всіх передбачених проектом робіт в задані строки.

Таке планування передбачає і очікування різноманітних подій, які в проектному управлінні називаються ризиковими. План проекту в цілому передбачає деякі дії з компенсації «планових» ризикових подій, для чого створює запаси коштів, матеріалів, часу, виходячи з ймовірності настання кожної такої події та прогнозованих витрат на таку компенсацію.

Аналітичний огляд. На жаль, проектна діяльність, як правило, розвивається не за первинним планом, реагуючи таким чином на безліч ризикових подій, що виникають під впливом турбулентного навколишнього середовища [1]. Дійсно, обидва показники планового ризику (ймовірність настання, витрати на компенсацію) носять стохастичний характер, крім того, абсолютно стохастичні незаплановані ризики, найбільш небезпечні саме своєю несподіваністю. При цьому живучість проекту (ймовірність його виконання у визначені терміни, при заданих ресурсах і заданій якості) знижується, аж до повної зупинки його виконання (рис. 1).



а



б

Рис. 1 – Ризики (втрати): а – проектної діяльності, б – продукту проекту

© О. С. Савельева, К. И. Березовская, И. Хеблов, Х. Валід шер, И. М. Гур'ев, С. В. Кошулян. 2016

У зв'язку з цим менеджмент проекту повинен реагувати на будь-які ризикові події швидко, найчасті-

ше, в форс-мажорних обставинах, які не залишають достатньо часу для ретельного аналізу обстановки і прийняття ефективних рішень щодо усунення наслідків прогнозованих і, особливо, несподіваних ризикових подій.

Найважливішою складовою такого реагування є вірогідний перерозподіл ресурсів проекту (фінансів, енергії, матеріалів, виконавців, інформації) між його елементами – проектна логістика [2], для передбачених ризикових подій – планова, а для несподіваних – надзвичайна.

З цього випливає, що практичне реагування на ризики планових та надзвичайних етапів проектів містить елементи, неможливі без логістики: закупівля, доставка та ін. передбачені відповідними стандартами [3]. На жаль, ці стандарти не дають інформацію про те, як вибудувати таку логістику, щоб вона при мінімальних допустимих витратах у межах проектного бюджету встигла врятувати проект від наслідків ризикових подій.

Як відомо, проектна логістика – це наука про управління й оптимізацію матеріальними, фінансовими та інформаційними потоками, потоками послуг на основі застосування сучасних технологій і найбільш прогресивних економічних рішень, яка інтегрує внутрішні і зовнішні матеріалопотоки і направлена на досягнення місії та цілей проекту [4].

Оскільки ресурси і час проекту завжди обмежені, а аварійний перерозподіл, як правило, зачіпає інтереси ще й інших, не тільки постраждалих від ризикових подій, функціональних областей проекту і його учасників, завдання неминуче зводиться до багатоцільовий багатовимірної оптимізації з великою кількістю обмежень [5–7].

Швидке і точне аналітичне рішення подібних задач оптимізації в умовах проектною діяльності неможливе через відсутність на момент ризикової події багатьох вихідних даних і адекватних математичних моделей, а існуючий когнітивний підхід, в якому пошук кращих рішень здійснюють на шляху досягнення критеріальної подібності між параметрами проектного та термодинамічного процесів [8], обмежений відсутністю адекватної формалізації проектного середовища, в якому ці процеси протікають.

Адже термодинамічні процеси протікають крізь простір послідовно, долаючи на своєму шляху усі проміжні елементи шляху, а процеси логістики можуть здійснюватися й безпосередньо між елементами, які розташовані один від одного на значній відстані! Більш того, навіть поняття «відстань» у цьому випадку не має сталого визначеного сенсу, адже розбиття простору на елементи управління проектами є вельми умовним [9].

Відсутність скінченного і повного опису проектного середовища, в рамках якого повинна починатися «битва за проект», її елементів і властивостей, а також методів адаптації моделей середовища до реальних подій процесів управління і пов'язаних з цим проектних ризиків, робить будь-який метод оптимізації не-

суворими, а його результати неефективними.

Мета роботи. Метою роботи є збереження ефективності проектною діяльності протягом усього періоду її реалізації за рахунок вчасної та повної компенсації наслідків ризикових подій в усіх функціональних областях шляхом побудови та впровадження в управління ризиками проекту адекватної дискретної адаптивної віртуальної моделі надзвичайної логістики в просторі управління проектами.

Для досягнення цієї мети в роботі були висунуті та розв'язані наступні задачі: визначено поняття проектною логістики у надзвичайних ситуаціях, виконано класифікацію ресурсів, що переносяться, з точки зору надзвичайної логістики, розроблено метод попередньої передислокації дискретного простору-часу з метою підтримання «гарячого» стану системи компенсації наслідків ризикових подій, виконані практичні випробування результатів дослідження з позитивним техніко-економічним ефектом.

Проектна логістика у надзвичайних ситуаціях. Розглянемо процеси перенесення ресурсів для компенсації наслідків ризикових подій на прикладі надзвичайної логістики – нового, по відношенню до початкового проектного плану, етапу проектною діяльності, що забезпечує матеріально-технічними, енергетичними, інформаційними, людськими та іншими видами постачання розв'язання виникаючих в результаті реалізації проектною діяльності проблем, пов'язаних з прогнозованими або латентними ризиковими подіями.

Як сказано вище, будь-яка спроба формалізувати ці процеси з метою надання їм більш або менш адекватного математичного опису стикається з серйозними труднощами, пов'язаними, в основному, з багатовекторністю, багатофакторністю, а також внутрішньою і зовнішньою взаємопов'язаністю параметрів проектною діяльності.

Дійсно, в одне логістичне проектне рівняння необхідно звести і фінанси, і матеріали, і енергію, і терміни, і документи, і багато іншого. Причому керувати цим, за аналогією з рівняннями переносу, доводиться залежною змінною в просторі-часу незалежних змінних, яких з урахуванням функціональних областей проектною діяльності, як мінімум, одинадцять [10]. І це тільки за однієї змінної на кожен область. У складних проектах розмірність такого простору може бути значно вище.

Класифікація ресурсів, що переносяться. Робота над формалізацією надзвичайної логістики починається з класифікації ресурсів, що переносяться. Причому, класифікацію здійснювали не звичайну – за фізичними станами (табл. 1), а з точки зору рівнів абстракції (табл. 2), на яких можуть бути розглянуті будь-які ресурси.

Наприклад, кошти можуть бути перераховані по Інтернету, і тоді вони потрапляють в рівень абстракції «інформаційний», а можуть бути доставлені готівкою з нарочним, тоді цей же ресурс розглядається на рівні «дрібнодисперсний» або навіть «людський фактор».

Таблиця 1 – Традиційна класифікація проектних ресурсів на різні фізичні стани

№№ з/п	Назва ресурсу	Фізичний стан	Швидкість передачі
1	Г – гроші	Інформаційний носій	Велика
2	І – інформація	Інформаційний носій	Велика
3	Д – документи	Інформаційний носій	Велика
4	Е – енергія	Линії електропередач, трубопроводи	Середня
5	М – матеріали	Грузовий транспорт	Мала
6	К – комплектуючі	Грузовий транспорт	Мала
7	О – оснастка	Грузовий транспорт	Мала
8	Т – техніка	Грузовий транспорт	Мала
9	У – учасники	Пасажирський транспорт	Мала

Таблиця 2 – Проектна логістична класифікація за рівнями абстракції

№№ з/п	Рівень абстракції	Назва ресурсу	Швидкість передачі	Ризики передачі
1	Інформаційний	Г – Гроші,	Велика	Втрати або пошкодження
2	Дрібнодисперсний	І – інформація,	Середня	Втрати або пошкодження
3	Крупнодисперсний	Е – енергія,	Мала	Пошкодження
4	Людський фактор	М – матеріали, К – комплектуючі, О – оснастка, Т – техніка, У – учасники, Д – документи	—	Соціальні і медичні проблеми

Навіть доставка підйомного крана на сотні кілометрів може бути розглянута на природному для нього «крупнодисперсному» рівні, а може і на «інформаційному», якщо, наприклад, у зоні ризикового події є інший такий же кран, і для залучення його в усунення наслідків досить подзвонити по телефону – типовий «інформаційний» рівень.

Для формалізації незалежних змінних, тобто середовища проектної діяльності в роботі його розглядали у вигляді дискретного десятивимірного гіперкуба, уздовж вимірювань якого відкладено по одному параметру з кожної функціональної області проекту, що рухається в часі [10]. Кожному дискретному елементу середовища ставиться у відповідність унікальні координати і конкретний час.

Беззаперечно, існує суттєва різниця між термодинамічними перенесеннями в межах неперервного фізичного середовища і логістичним проектним перенесенням. І справа тут навіть не в тому, що термодинамічний процес неперервний, а логістичний є дискретним. Як зазначено в аналітичному огляді, будь-яка термодинамічна субстанція (тепло, тиск, маса тощо), не може стрибкоподібно перейти через будь-яку малу ділянку перенесення, – вона повинна пройти весь шлях крізь усі елементи між початком і кінцем перенесення без розривів, а логістичний ресурс також може рухатися у цьому сенсі неперервно, а може і «перестрибнути» на будь-яку відстань від проектного початкового елемента до кінцевого, минаючи всі проміжні елементи.

Для відтворення таких «стрибків» в моделі пропонується метод, який передбачає попередню «гарячу» передислокацію дискретного простору-часу проектної діяльності.

Метод попередньої «гарячої» передислокації дискретного простору-часу. Під «гарячою» передислокацією будемо розуміти попередню зміну структури початково впорядкованого дискретного простору-часу, яка виконується постійно під час виконання

проекту, незалежно від того, відбуваються деякі ризикові події або ні. Тобто, поточна модель структури дискретного простору-часу постійно змінюється, відтворюючи поточний стан наявних в елементах та на складах ресурсів.

Розглянемо конкретний приклад. Для цього розіберемо простір проектної діяльності на скінченну кількість елементів та пронумеруємо їх так, як це показано на рис. 2. На рисунку умовно показаний двовимірний простір ($N = 2$), Початкова нумерація довільна, і може бути виконана в будь-який інший спосіб. Центральну клітинку на рисунку залишаємо вільною. Будемо вважати, що за кожним елементом закріплена відома кількість деякої вимірюваної субстанції, яка може бути віднесена до одного з перерахованих в таблиці 1 ресурсів. Хай це буде деякий матеріал, використовуваний в проектній діяльності, кількість якого в межах кожного елемента, позначеного на рис. 2, дорівнює: $Q_1^0, Q_2^0, \dots, Q_{80}^0$.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40		41	42	43	44
45	46	47	48	49	50	51	52	53
54	55	56	57	58	59	60	61	62
63	64	65	66	67	68	69	70	71
72	73	74	75	76	77	78	79	80

Рис. 2 – Початкове розташування елементів проектної діяльності

Таким чином отримуємо стан розподілу відповідного ресурсу на початок здійснення проекту. З часом

з різних причин (технологічне використання, втрата, перерозподіл між елементами, тощо) ця картина змінюється та на i -й ітерації врахування залишків набуває такого вигляду: $Q_1^i, Q_2^i, \dots, Q_{80}^i$.

Така модель дозволяє контролювати об'єм залишків відповідного ресурсу протягом усіх ітерацій проектної діяльності – від її початку до завершення. В ідеальному випадку такий розподіл ресурсів та його зміна повинна відповідати плановому плину процесу. На жаль, як було згадано вище, на плановий плин процесу постійно очікують різноманітні ризики, для компенсації наслідків яких необхідно виконати надзвичайний, відносно швидкий перерозподіл ресурсів, який руйнує заплановані перерозподіли.

Враховуючи те, що в реальній проектній діяльності N значно більше двох (реально, тисячі) елементів (вздовж кожного з розмірів простору значно більше дев'яти), а також те, що прийняття рішення з компенсації наслідків ризикової події треба робити якнайшвидше, пропонується застосувати віртуальну модель яка створюється паралельно реальній та супроводжує її протягом усіх ітерацій проекту. Для цього виконується ранжування усіх елементів за кількістю відповідного ресурсу таким чином, що елементи з найбільшим вмістом ресурсу розташовувалися ближче до центральної клітинки моделі, утворюючи шар з найбільш насичених ресурсом елементів (рис. 3).

Аналогічно утворюється наступний шар елементів і т.д. Таким чином, якщо в реальній моделі розташування ресурсів по елементах проектної діяльності із часом змінюється лише їхня кількість Q , то в віртуальній моделі змінюється вже розташування самих елементів на схемі, тобто відбувається віртуальна передислокація в межах дискретного простору-часу проектної діяльності. Зазначимо, що така передислокація здійснюється на кожній ітерації проектної діяльності незалежно від того, відбулася чи ні прогнозована або несподівана ризикова подія.

В результаті, кожний промінь, який виходить з центральної клітинки та проходить крізь умовні центри інших (рис. 3), є шляхом, за яким може бути здійснено транспортування ресурсу.

49	2	30	41	75	6	77	63	9
80	71	12	13	58	60	61	17	43
19	20	21	22	48	24	25	47	27
35	29	39	31	32	11	34	72	36
76	38	3	78	50	44	18	42	42
54	46	16	37	1	40	15	52	53
62	55	65	57	14	59	51	26	45
67	64	56	69	8	68	66	4	33
28	73	74	5	23	7	10	79	70

Рис. 3 – «Гаряче» розташування елементів проектної діяльності яке виникає після чергового етапу віртуальної передислокації

З правил побудови моделі виходить, що на i -й ітерації:

$$Q_{11}^i > Q_{25}^i > Q_{17}^i > Q_9^i \tag{1}$$

Механізм підтримки прийняття рішень із надзвичайної (додаткової, викликаного ризиковими подіями) проектної логістики, виглядає наступним чином. Як тільки така подія відбувається, в останній віртуальній моделі елемент, в якому подія відбулася (наприклад елемент № 52 на рис. 4), переміщується в центральну клітинку, а розрахунок параметрів логістики виконується вздовж однієї з осей, в якій градієнт кількості ресурсу найбільший.

49	2	30	41	75	6	77	63	9
80	71	12	13	58	60	61	17	43
19	20	21	22	48	24	25	47	27
35	29	39	31	32	11	34	72	36
76	38	3	78	50	44	18	42	42
54	46	16	37	1	40	15	52	53
62	55	65	57	14	59	51	26	45
67	64	56	69	8	68	66	4	33
28	73	74	5	23	7	10	79	70

Рис. 4 – Схема до визначення напрямку перерозподілу ресурсів за допомогою віртуальної передислокації простору-часу проектної діяльності

У підсумку, коли напрямок із найбільшим градієнтом знайдено, саме до нього застосовується метод термодинамічної аналогії, і на цьому план надзвичайної логістики вважається сформованим!

Загальна схема підтримки проектних рішень за допомогою методу попередньої «гарячої» віртуальної передислокації дискретного простору-часу наведена на рис. 5.

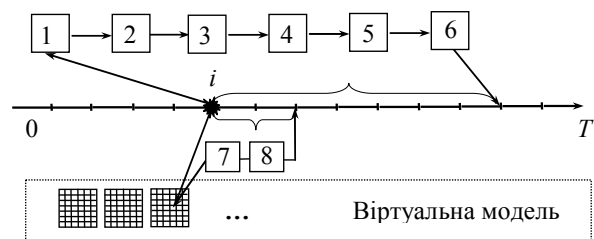


Рис. 5 – Схема методу попередньої «гарячої» передислокації дискретного простору-часу

В її основі дискретна адаптивна віртуальна модель простору управління проектами, яка від ітерації до ітерації накопичує інформацію про зміну поточного стану розподілу ресурсів по елементах проектної діяльності та на складах.

На рис. 5 позначено: 1 – збирання інформації з усіх елементів проектної діяльності про наявність необхідного ресурсу, 2 – визначення елементів, з яких

можна «позичити» необхідну кількість ресурсу, 3 – визначення шляху доставки ресурсу, 4 – визначення способу (технології) доставки ресурсу, 5, 7 – визначення плану надзвичайного переміщення ресурсу, 6, 8 – здійснення надзвичайного переміщення ресурсу до елемента, де відбулася ризикова подія.

Згідно з рис. 5, плановий життєвий цикл проекту $0 \dots T$, який складається з окремих ітерацій, на i -й ітерації переривається незапланованою ризиковою подією в елементі R , що потребує негайного втручання менеджера для ліквідації наслідків останньої. Хай до такої ліквідації необхідно залучити додаткову до планової – надзвичайну логістику, суть якої полягає в аварійному перекиданні різних ресурсів (матеріалів, коштів, енергії, обладнання, тощо) від одних до інших елементів (передбачається, що цей ресурс там є в достатній кількості), незалежних складів або інших джерел.

Розрахунок параметрів надзвичайної логістики потребує від менеджера отримання та переробки значного об'єму інформації, що он-лайн з плановим виконанням проекту може розтягнутися на велику кількість ітерацій проектної діяльності, аж до призупинки останньої. Якщо ж з самого початку проекту створюється та підтримується на кожній ітерації віртуальна модель, то її наявність може значно зменшити час прийняття рішень (див. рис. 5), оскільки уся необхідна інформація про поточний стан розподілу ресурсів по елементах та джерелах міститься в такій моделі.

Практичні випробування результатів дослідження. Наведені рішення дозволили запропонувати інформаційну підсистему підтримки прийняття логістичних рішень «RILAM-L» загальної системи оптимізації процесів прийняття проектних рішень, а також зниження вартості та термінів виконання проектів «RILAM», що складається з блоків класифікації ресурсу, розрахунку логістичних параметрів надзвичайного етапу проекту, компенсації наслідків ризикових подій, побудови десятивимірної логістичної моделі, адаптації (спотворення) проектної середовища під клас ресурсу, а також розрахунку логістичних параметрів надзвичайного етапу проекту.

Підтверджена можливість ефективного використання нових проектно-орієнтованих методів і моделей для успішного управління ресурсами і середовищем в проектах будівництва споруд відповідального призначення.

В Корпорації «СОЮЗ» (м. Одеса) були проведені випробування системи «RILAM-L» оптимізації витрат на запобігання і компенсацію наслідків ризикових подій, заснованої на проектуванні за допомогою віртуальної моделі передислокації простору-часу для планування надзвичайної логістики ресурсів на основі фізичних аналогій.

Система «RILAM-L» була задіяна при управлінні проектом будівництва підстанції ПС 750/330 кВ «Кавовська» з позитивним техніко-економічним ефектом.

Обговорення результатів. Результати роботи створюють можливість використання для планування процесів, необхідних для компенсації ризикових подій у проектній діяльності, за допомогою термодинамічних аналогій. Розроблена для цього віртуальна адаптивна модель дискретного формалізованого середовища процесів перенесення проектних ресурсів до-

зволяє співвідносити в процесі моделювання такі обставини, які серйозно відрізняють фізичні процеси від проектних.

До таких процесів належать, зокрема, фізичні закони та проектні правила перенесення ресурсу. Подолано суперечність, яка виникає від того, що фізичні процеси довільні, а проектні визначаються рішеннями, що приймаються менеджерами проекту.

Поставлені і вирішені в роботі завдання є основою для подальшого продовження наукових досліджень і практичного впровадження адаптивних моделей з метою математичної підтримки проектної діяльності на етапах запобігання і компенсації наслідків проектних ризиків.

Висновки. В результаті аналізу планових та несподіваних ризикових подій визначено поняття проектної логістики у надзвичайних ситуаціях як перенесення різноманітних ресурсів проекту для ліквідації наслідків ризикових подій.

Виконано класифікацію ресурсів, що переносяться, з точки зору надзвичайної логістики, яка відрізняється від класифікації за фізичною суттю ресурсів (гроші, матеріали, інформація, люди, тощо), а виконується за методами та швидкістю їхнього перенесення.

Розроблено метод попередньої передислокації дискретного простору-часу з метою підтримання «гарячого» стану системи компенсації наслідків ризикових подій, який дозволяє створювати та підтримувати у «гарячому» стані віртуальну модель поточного стану розподілу ресурсів по елементах проектної діяльності.

В Корпорації «СОЮЗ» (м. Одеса) були проведені випробування системи «RILAM-L» оптимізації витрат на запобігання і компенсацію наслідків ризикових подій, заснованої на проектуванні за допомогою віртуальної моделі передислокації простору-часу для планування надзвичайної логістики ресурсів на основі фізичних аналогій.

Випробування показали наступні техніко-економічні результати: терміни виконання проекту знижено на 11 %; вартість виконання проекту знижена в 1,25 рази; кількість ризиків, які вдалося попередити, зросла на 17 %.

Список літератури:

1. Вишняков, Я. Д. Общая теория рисков [Текст] / Я. Д. Вишняков, Н. Н. Радаев. – Москва: Академия, 2008. – 368 с.
2. Савельева, О. С. Формалізація простору управління проектами [Текст]: зб. наук. пр. / О. С. Савельева, А. Л. Становский, И. И. Становская, Е. И. Березовская, И. Хеллов, И. Н. Гурьев, И. А. Саух // Нові рішення в сучасних технологіях. – 2016. – № 42 (1214). – С. 154–159.
3. Руководство к Своду знаний по управлению проектами (Руководство РМВОК®) [Текст]. – Институт управления проектами, 2013. – 586 с.
4. Курочкин, Д. В. Логистика [Текст] / Д. В. Курочкин. – Минск: ФУАинформ, 2012. – 268 с.
5. Шоробура, Н. Н. Разработка моделей и программных средств для многокритериальной оптимизации слабосвязанных объектов в компьютерных информационных системах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2004/kita/shorobura/diss/index.htm>
6. Духанина, М. А. Эволюционная оптимизация слабосвязанных систем [Текст] / М. А. Духанина, Е. Ю. Лебедева, П. С. Швеиц, Л. А. Одукалец // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. С. Пухова. – 2013. – № 67. – С. 74–81.

7. Zhang, X. Effective medium theory for anisotropic metamaterials [Text] / X. Zhang, Y. Wu // Scientific Reports. – 2015. – № 5. – P. 7892 doi: [10.1038/srep07892](https://doi.org/10.1038/srep07892)
8. Савельева, О. С. Разработка термодинамической критериальной поддержки когнитивных моделей переноса в управлении проектами и программами [Текст] / О. С. Савельева, И. И. Становская, А. В. Торopenко, И. Н. Щедров, Е. И. Березовская // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 6/3 (78). – С. 53–59. doi: [10.15587/1729-4061.2015.55714](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55714)
9. Становская, И. И. Фрактальная размерность проектной деятельности [Текст]: мат. XXI семин. / И. И. Становская, Е. В. Колесникова, И. Н. Гурьев // Моделирование в прикладных научных исследованиях, 2013. – С. 23–25.
10. Чернов, С. К. Облік ризиків і невизначеностей в організаційних проектах [Текст] / С. К. Чернов. – Управління проектами та розвиток виробництва. – 2006. – № 1 (17). – С. 41–44.
3. Руководство к Svodu znanij po upravleniju proektami (Rukovodstvo PMBOK®) (2013). Institut upravlenija proektami, 586.
4. Kurochkin, D. V. (2012). Logistika. Minsk: FUAinform, 268.
5. Shorobura, N. N. (2004). Razrabotka modeley i programmyh sredstv dlya mnogokriterialnoy optimizatsii slozhnyh ob'ektov v kompyuternykh informatsionnykh sistemah. Available at: <http://masters.donntu.org/2004/kita/shorobura/diss/index.htm>
6. Duxanina, M. A., Lebedyeva, E. Yu., Shvecz, P. S., Odukalicz, L. A. (2013). Evolyucijna opyt' mizaciya slabosvyazanny'x sy'stem. Zbirny'k naukovy'x prac' Insty'tutu problem modelyuvannya v energety'ci im. G. S. Puxova, 67, 74–81.
7. Zhang, X., Wu, Y. (2015). Effective medium theory for anisotropic metamaterials. Scientific Reports, 5, 7892. doi: [10.1038/srep07892](https://doi.org/10.1038/srep07892)
8. Saveleva, O. S., Stanovskaya, I. I., Toropenko, A. V., Schedrov, I. N., Berezovskaya, E. I. (2015). Thermodynamic criterial support for the cognitive transfer models in the project and program management. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(3(78)), 53–59. doi: [10.15587/1729-4061.2015.55714](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55714)
9. Stanovskaya, I. I., Kolesnikova, E. V., Gurev, I. N. (2013). Fraktalnaya razmernost' proektnoy deyatel'nosti. Modelirovanie v prikladnykh nauchnykh issledovaniyakh, 23–25.
10. Chernov, S. K. (2006). Oblik ryzykiv i nevyznachenostej v organizacijnyx proektax. Upravlinnya proektami ta rozvitok virobnitstva, 1 (17), 41–44.

Bibliography (transliterated):

1. Vishnyakov, Ya. D., Radaev, N. N. (2008). Obschaya teoriya riskov. Moscow: Akademiya, 368.
2. Saveleva, O. S., Stanovskiy, A. L., Stanovskaya, I. I., Berezovskaya, E. I., Heblou, I., Gurev, I. N., Sauh, I. A. (2016). Formalizatsiya prostranstva upravleniya proektami. Novi rishennya v suchasnykh tehnologiyah, 42 (1214), 154–159.

Поступила (received) 11.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Віртуальна передислокація дискретного простору-часу в задачах планування проектної логістики/ О. С. Савельєва, К. І. Березовська, І. Хеблов, Х. Валід Шер, І. М. Гур'єв, С. В. Кошулян// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.56–62. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Виртуальная передислокация дискретного пространства-времени в задачах планирования проектной логистики/ О. С. Савельева, Е. И. Березовская, И. Хеблов, Х. Валід Шер, И. Н. Гурьев, С. В. Кошулян// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.56–62. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

The discrete space-time virtual relocation in project logistics planning/ O. Saveleva, K. Beresovska, I. Heblou, H. Valid Sher, I. Gurjev, S. Koshulyan//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.56–62. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Савельєва Оксана Степанівна – доктор технічних наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет, професор кафедри нафтогазового та хімічного машиностроєння, пр. Шевченка, 1, г. Одеса, Україна, 65044; e-mail: okssave@gmail.com.

Березовська Катерина Ігорівна – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машиностроєння; пр. Шевченка, 1, г. Одеса, Україна, 65044; e-mail: beresovska@gmail.com.

Хеблов Ісмаїл – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машиностроєння; пр. Шевченка, 1, г. Одеса, Україна, 65044; e-mail: heblou@gmail.com.

Хусайн Валід шер – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машиностроєння; пр. Шевченка, 1, г. Одеса, Україна, 65044.

Гур'єв Іван Николаевич – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машиностроєння; пр. Шевченка, 1, г. Одеса, Україна, 65044; e-mail: ihuriev@odessa.gov.ua

Кошулян Сергій Вікторович – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машиностроєння; пр. Шевченка, 1, г. Одеса, Україна, 65044; e-mail: seregal2451@rambler.ru.

Савельєва Оксана Степанівна – доктор технічних наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет, професор кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування; пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: okssave@gmail.com.

Березовська Катерина Ігорівна – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування; пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: beresovska@gmail.com.

Хеблов Ісмаїл – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: heblov@gmail.com.

Хуссєїн Валід Шер – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044.

Гур'єв Іван Миколайович – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: ihuriev@odessa.gov.ua.

Кошулян Сергій Вікторович – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044;

Oksana Saveleva – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Odessa National Polytechnic University, Professor, Department of oil and gas and chemical engineering; Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: okssave@gmail.com.

Ekaterina Berezovska – Odessa National Polytechnic University, Postgraduate of the Department of oil and gas and chemical engineering; Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: beresovska@gmail.com.

Heblov Ismail – Odessa National Polytechnic University, Postgraduate of the Department of oil and gas and chemical engineering; Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: heblov@gmail.com.

Walid Sher Hussain – Odessa National Polytechnic University, Postgraduate of the Department of oil and gas and chemical engineering; Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, 65044.

Ivan Guryev – Odessa National Polytechnic University, Postgraduate of the Department of oil and gas and chemical engineering; Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: ihuriev@odessa.gov.ua

Sergiy Koshulyan – Odessa National Polytechnic University, Postgraduate of the Department of oil and gas and chemical engineering; Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, 65044; e-mail: serega12451@rambler.ru.

УДК 519.812.3: 519.816

О. В. ШУЛИМА, В. В. ШЕНДРИК, П. ДАВІДСОН

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАДАЧІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ГІБРИДНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Розглядається модель прямої агрегації оціночних критеріїв в задачі багатокритеріального аналізу альтернативних варіантів побудови енергетичних мереж з відновлювальними джерелами енергії. Для розрахунку загальної функції корисності пропонується процедура приведення кількісних і якісних критеріїв до «нечіткості». За схемою Беллмана-Заде розглядається ранжування альтернативних рішень вибору структури енергетичної системи в межах трьох сценаріїв. При умові неявної переваги альтернативи пропонується оцінка альтернатив за максимумним критерієм.

Результати досліджень можуть бути використані у відповідній системі підтримки прийняття рішень.

Ключові слова: енергетична система, відновлювальні джерела енергії, альтернативи, багатокритеріальна задача прийняття рішень.

Рассматривается модель прямой агрегации оценочных критериев в задаче многокритерийного анализа альтернативных вариантов построения энергетических сетей с возобновляемыми источниками энергии. Для расчета общей функции полезности предлагается процедура приведения количественных и качественных критериев к «нечеткости». По схеме Беллмана-Заде рассматривается ранжирование альтернативных решений выбора структуры энергетической системы в пределах трех сценариев. При условии неявного преимущества альтернативы предлагается оценка альтернатив по максимумному критерию.

Результаты исследований могут быть использованы в соответствующей системе поддержки принятия решений.

Ключевые слова: энергетическая система, возобновляемые источники энергии, альтернативы, многокритерийная задача принятия решений.

The paper is considering a problem of providing energy via Hybrid Renewable Energy Systems. It is proposed a model of direct evaluation of aggregated criteria and a model of ranking alternatives in multicriteria analysis of building energy grid with renewable energy sources.

A systematic multicriteria decision analysis technique is described for alternative selection and bid evaluation based on utility theory and which permits different types of criterias to be evaluated. To do it is proposed to use the scheme Bellman-Zadeh and ranking alternatives within different scenarios: socio-economic and energy-efficient. To calculate the total utility function proposed procedure to bring quantitative and qualitative criteria to the "fuzziness". If results show implicit benefits then offered to evaluate alternatives by maximin criterion.

A Ukraine case study is used to illustrate the technique. The theoretical basis and the advantages of the technique are also presented. The research results can be used in the appropriate decision support system.

Keywords: energy system, renewable energy sources, alternatives, the multicriteria decision making problem.

Вступ. Аналіз сучасного стану проблеми щодо вибору структури гібридної енергетичної системи з відновлювальними джерелами енергії (ГЕСВДЕ) представлений в роботі [1]. Незважаючи на численні публікації стосовно підвищення ефективності рішень щодо планування електрифікації комплексу будівель за допомогою відновлювальних джерел енергії, існує ряд проблем, які вимагають подальшого дослідження.

В процесі проектування ГЕСВДЕ вирішуються завдання визначення оптимальної конфігурації ГЕСВДЕ, а саме кількості та потужності елементів

відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) системи, їх вид (сонячні панелі чи вітрові турбіни).

При прийнятті рішення найважливіше – вибрати кращий в термінах оптимальності варіант. Отже, головне – не прогнозувати, які показники забезпечить реалізація тієї чи іншої альтернативи, а визначити перевагу одного варіанту перед іншими. Під час вирішення цього завдання доцільно врахувати декілька критеріїв одразу, що можна зробити, використовуючи методи багатокритеріальної оптимізації.

© О. В. Шулима, В. В. Шендрик, П. Давідсон. 2016

Для вирішення завдань такого виду перспективно використовувати інформаційні технології, які дозволяють об'єднати в єдиному процесі найбільш ефективні математичні методи оптимізації з досвідом і знаннями особи-експерта. Такі технології реалізуються на основі так званих систем підтримки прийняття рішень (СППР) та допомагають підготувати інформацію у зручному для особи, що приймає рішення виді.

Постановка задачі прийняття рішень. Базову задачу вибору структури ГЕСВДЕ будемо розглядати в наступній постановці. Задано:

- множина елементів системи з ВДЕ, що можуть бути складовими частинами енергетичної системи, відповідно сонячних панелей, вітрогенераторів та акумуляторних батарей:

$$P = \{pv_e\}, W = \{wt_e\}, A = \{ab_e\} \quad e = \overline{1, n}$$

- набір $I = \{i\}$, $dei = \langle pv_e, wt_e, ab_e \rangle$, що містить визначену кількість альтернатив (варіантів структури ГЕСВДЕ), що задаються характеристиками ВДЕ.

- набір $K = \{j_m\}$, $m = \overline{1, m}$ означених критеріїв, згідно яких проходить оцінка альтернатив.

У роботі [2, 3] визначається структура розробленої СППР. Загалом сукупність задач процес вибору структури ГЕСВДЕ можна розділити на дві стадії.

Step¹ – структурний синтез системи. Суть задачі полягає у визначенні усіх можливих конфігурацій ГЕСВДЕ $i \in I$ ляхом уточнення множин елементів системи P, W, T .

$$Step^1 : \{Objs, P, W, T\} \rightarrow \{i, I\} \quad (1)$$

Step² – оцінка ефективності та вибір кращого варіанта системи. У процесі виконання завдання проводиться оцінка варіантів побудови ГЕСВДЕ $i \in I$ о заданій множині критеріїв $K(i)$ і вибір оптимального варіанта з $i_0 = \arg \text{opt } K(i)$, $i \in I$ Вирішення цієї задачі базується на заданих структурних і технологічних характеристиках системи, обмеженнях на рівні енергетичного ефекту: надлишок згенерованої енергії (REPG), ймовірність втрати живлення (DPSP) і витрати (COE).

$$Step^2 : \{Objs, I, B, REPG, DPSP, COE\} \rightarrow \{i_0, K(i)\} \quad (2)$$

де B – множина значень параметрів елементів системи.

Загальна математична модель задачі вибору оптимальної структури системи. Оптимізацію рішення пропонується проводити за наступними сценаріями:

I рівень: соціально-економічний за показником вартості енергії (COE) і енергетично ефективний сценарій за показником REPG надлишок згенерованої енергії, а також набором якісних критеріїв з розрахованими вагами стосовно виду сценарію.

II рівень: енергетично ефективний сценарій за показником DPSP – ймовірність втрати живлення, а також набором якісних критеріїв з розрахованими вагами стосовно виду сценарію.

Для вибору єдиного рішення задачі пропонується використовувати положення теорії корисності, відповідно до якої в рамках сценаріїв проводиться оцінка альтернатив за наборами критеріїв і здійснюється вибір оптимальних альтернатив по загальному значенню функції $R_i(z)$ рамках сценарію.

Після вибору кращих альтернатив в рамках сценаріїв I рівня, відібрані альтернативи оцінюються в новому (остаточному) сценарії, де вирішується оптимізаційна задача II рівня.

Загальна математична модель задачі вибору оптимальної структури системи може бути подана у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_0 \rightarrow \arg \max R_i(z) \\ COE(i) \rightarrow \min_{i \in I} \\ COE(i) \leq COE^* \\ REPG(i) \rightarrow \max_{i \in I} \\ REPG(i) \geq REPG^* \\ DPSP(i) \leq DPSP^* \\ DPSP(i) \rightarrow \min_{i \in I} \end{array} \right. \quad (3)$$

де $R_i(z)$ адитивна функція загальної корисності, COE – цільова функція витрат на установку, $REPG(i)$ цільова функція енергоефективності I рівня, $DPSP(i)$ цільова функція енергоефективності II рівня, COE^* граничні значення показника вартості системи, $REPG^*$ граничні значення показника енергоефективності системи, $DPSP^*$ граничні значення показника дефіциту енергії в системі.

Ціль та задачі дослідження. Необхідно визначити оптимальний (найбільш відповідний) з множини варіант структури ГЕСВДЕ $i_0 \in I$ де I – можлива множина альтернатив, з урахуванням заданих обмежень на витрати та показники енергоефективності.

Для досягнення мети пропонується вирішити наступні задачі:

1. Визначити множину альтернатив, кожна з яких представляє собою певний вид енергетичної мережі.

2. Визначити критерії для оцінки альтернатив.

3. Визначити механізм призначення ваги критеріям, відповідно до трьох сценаріїв (етапів оптимізації наведених вище).

4. Визначити алгоритм оцінки та ранжування альтернатив з урахуванням пріоритету критеріїв, вираженим вагами в межах трьох сценаріїв.

Особливості гібридної енергетичної системи, як об'єкта спостереження. У даній роботі в якості об'єкта спостереження виступають попередньо визначені конфігурації гібридної енергетичної мережі з відновлювальними джерелами енергії.

Дані конфігурації визначаються з огляду на те, що загальна модель представляє собою комплексну

модель гібридної вітро-сонячної системи електропостачання окремого об'єкта. В ній використовуються два взаємодоповнюючі канали генерування електричної енергії від відновлюваних джерел енергії вітру та сонця, що реалізуються за допомогою, відповідно, вітроелектроустановки (ВЕУ) та сонячної батареї (СБ). Для запобігання випадків повної втрати живлення при недостатній генерації електроенергії компонентами ГЕСВДЕ, в конфігурації системи включено акумуляторні батареї (АБ).

Тестове дослідження моделі відбувалось на основі 5-ти конфігурацій, які приведені в табл. 1:

Таблиця 1 – Конфігурації ГЕСВДЕ

№	СБ	ВЕУ	АБ
1	ACS-50D	Techmlv1kw	Varta lad60
2	ACS-100D	Techmlv1kw	Varta lad260
3	ACS-250D	Techmlv3kw	Varta lad260
4	ACS-100D	Techmlv5kw	Varta lad115
5	ACS-250D	Techmlv5kw	Varta lad260

Кожен вид сонячної батареї характеризується власною потужністю, кількістю сонячних модулів, ціною, вартістю обслуговування та ін. Параметри ВЕУ визначаються потужністю, площею лопастей, вартістю обслуговування та ціною. Параметри АБ визначаються ємністю батареї, ціною та кількістю одиниць.

Методи вибору оптимальних рішень при багатокритеріальній постановці задачі оптимізації

Основна мета багатокритеріального процесу прийняття рішень полягає у виборі альтернатив, що мають найвищі оцінки відповідно до набору оціночних критеріїв.

Серед методик, які дозволяють провести вибір оптимальної альтернативи серед запропонованих, найбільш популярним є спосіб прямого агрегування [4], де, як правило, відбір проходить в два етапи:

1. Оцінка альтернативи за кожним критерієм і агрегацію оцінок в єдину глобальну функцію корисності з врахуванням вагових коефіцієнтів;

2. Ранжування альтернатив на основі отриманої оцінки.

Спосіб розрахунку такої агрегованої функції корисності залежить від двох різних груп методологій.

Традиційні моделі прийняття рішень (так звані «чіткі моделі»), дають в результаті числовий індекс. Така оцінка дозволяє провести пряме ранжування потенційних альтернатив.

Якщо s_{ij} оцінка i -ї альтернативи за критерієм j , а w_j – вага кожного критерію, в чіткому аналізі найпростіший спосіб агрегації полягає в їх лінійній комбінації. В умовах, що $\sum_{j=1}^m w_j = 1$, оцінка (корисність) кожної альтернативи розраховується як:

$$R_i = \sum_{j=1}^m w_j s_{ij} \quad (4)$$

В умовах, коли судження краще представлене в якісному відношенні, тобто за допомогою термінів

мови (добре, гірше, досить добре, і т.д.), можуть виникнути проблеми в підрахунку загального числового індексу.

Друга група методів вирішує дану проблему з використанням методів «нечіткої логіки». Зокрема, існують методи багатокритеріальної оцінки, такі як ELECTRE III [5], Promethee [6], VIKOR [7], TOPSIS [7], та ін. Вони засновані на побудові глобальної моделі переваг із використанням значення ваги критеріїв. Альтернативи оцінюються за допомогою показника їх відповідності або НЕ відповідності моделі переваг, використовується дихотомія так / ні (0 або 1), представлена як ступінь впевненості.

«Нечіткі» множини здатні управляти «лінгвістичними змінними», через які експерти дають свої оцінки. Такий підхід дозволяє збільшити гнучкість алгоритму ранжування.

З огляду на це для вирішення задачі пропонується використання наступного методу нечіткого багатокритеріального аналізу варіантів:

1) критерії розглядаються як нечіткі множини, які задані на універсальній множині альтернатив за допомогою функції приналежності;

2) функції приналежності нечітких множин визначаються за методом статистичної експертної оцінки інформації;

3) коефіцієнти важливості критеріїв концентрують відповідні нечіткі множини;

4) рішення приймається за схемою Беллмана-Заде [8] шляхом перетину нечітких множин критеріїв, що відповідає вибору варіанту, який краще за інших задовольняє одночасно всім критеріям.

5) ранжування отриманих рішень методом побудови матриці поступок.

Модель нечіткого багатокритеріального аналізу варіантів. Використаємо наступну методіку:

Нехай \tilde{s}_{ij} нечітка оцінка за критерієм j альтернативи i , представлена через функцію приналежності $\mu_{\tilde{s}_{ij}}(s_{ij})$ нехай \tilde{w}_j нечітка вага критерію j з функцією приналежності $\mu_{\tilde{w}_j}(w_j)$. Аналіз серед альтернатив проводиться в п'ять етапів:

1. Необхідно виділити критерії і розділити їх на дві групи: якісні і кількісні.

Якісні критерії виражаються через лінгвістичні змінні, які можуть бути переведені в нечіткі множини. Крім того, кількісними критеріями будемо управляти як нечіткими множинами.

2. Необхідно розрахувати функції приналежностей якісних критеріїв.

Задача побудови функції приналежності для якісних критеріїв постає в наступній умові:

Дано дві множини: множина термів U і універсальна множина $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$. Нечітка оцінка \tilde{L}_h якою описується лінгвістичний терм l_h , $h = \overline{1, m}$ на універсальній множині U представляється у вигляді [8]:

$$\tilde{L}_h = \left(\frac{\mu_{l_h}(u_1)}{u_1}, \frac{\mu_{l_h}(u_2)}{u_2}, \dots, \frac{\mu_{l_h}(u_n)}{u_n} \right) \quad (5)$$

Необхідно визначити ступені приналежності елементів множини U до елементів множини L тобто знайти $\mu_h(u_b)$ для всіх $h = \overline{1, m}$, $b = \overline{1, n}$.

Як метод побудови функцій приналежності, у роботі пропонується метод статистичної обробки суджень групи експертів.

Метод статистичної обробки експертної інформації. Кожен експерт заповнює анкету, в якій вказує своє судження про наявність у елементів u_b , $i = \overline{1, n}$ властивостей деякої нечіткої множини \widetilde{L}_h ($h = \overline{1, m}$) Введемо наступні позначення: K – кількість експертів; $b_{h,b}^k$ думка k -го експерта про наявність у елемента u_b властивостей нечіткої множини \widetilde{L}_h $k = \overline{1, K}$, $h = \overline{1, m}$, $b = \overline{1, n}$ Будемо вважати, що експертні оцінки бінарні, тобто: $b_{h,b}^k \in \{0,1\}$ де 1 (0) вказує на наявність (відсутність) у елемента u_b властивостей нечіткої множини \widetilde{L}_h За результатами опитування експертів, ступінь приналежності нечіткій множині \widetilde{L}_h ($h = \overline{1, m}$) розраховуються наступним чином [9]:

$$\mu_h(u_b) = \frac{1}{K} \sum_{k=1, K} b_{h,b}^k \quad (6)$$

3. Необхідно привести оцінки кількісних критеріїв до єдиного простору з якісними. Під час розрахунку кількісних критеріїв, необхідно нормалізувати відповідні бали, щоб отримати, як і для якісних критеріїв, значення в просторі $[0,1]$. Рівняння (5) показує алгоритм нормалізації, де ϵ оцінкою кількісного критерію:

$$s_{ij} = \left(\frac{v_i(s) - v_i^-}{v_i^+ - v_i^-} \right)^{\mathcal{G}_i} \quad (7)$$

де $v_i(s)$ значення i -го критерію для варіанта системи; v_i^+, v_i^- максимальне і мінімальне значення критерію відповідно.

\mathcal{G}_i параметр, що визначає вид залежності. При $\mathcal{G}_i = 1$ реалізується лінійна залежність, при $0 < \mathcal{G}_i < 1$ випукла, при $\mathcal{G}_i > 1$ увігнута.

4. Провести розрахунок загальної нечіткої множини альтернативи. Розрахунок представляє собою сукупну оцінку критеріїв кожної альтернативи. Якщо ми припустимо, що в рівнянні (1) деякі значення s_{ij} w_j представлені нечіткими множинами, то значення R_i уде також нечітким, і має бути проранжоване. Агрегована оцінка кожної з альтернатив (адитивна функція загальної корисності) виходить шляхом модифікації рівняння (4) у такий спосіб:

$$R_i(z) = \frac{\sum_{j=1}^m w_j s_{ij}}{\sum_{j=1}^m w_j}, \quad z = (w_1 \dots w_m; s_{i1} \dots s_{im}) \quad (8)$$

5. Провести остаточне ранжування альтернатив. Як правило, при виборі альтернатив ГЕСВДЕ необхідно не тільки вибрати одну оптимальну, а ранжувати їх в деяку послідовність так, щоб у випадку необхідності можна було б обрати найближчу до найкращої альтернативи.

Така ситуація може виникнути, коли на кроці 4 отримаємо однакові оцінки для альтернативних рішень. Для вирішення сформованої задачі застосуємо метод, запропонований у [10].

Сформуємо матрицю Rang:

$$\text{Rang} = \begin{matrix} & \begin{matrix} j_1 & j_2 & \dots & j_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} r_{i_1 j_1} & r_{i_1 j_2} & \dots & r_{i_1 j_m} \\ r_{i_2 j_1} & r_{i_2 j_2} & \dots & r_{i_2 j_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i_n j_1} & r_{i_n j_2} & \dots & r_{i_n j_m} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (9)$$

де $r_{ij} = w_j s_{ij}$ оцінка альтернативи i по критерію j .

Для кожної альтернативи введемо до розгляду матрицю $\widetilde{\text{Rang}}^{-i}$ яку визначимо наступним чином. Для кожної альтернативи i видалимо i -й рядок, що відповідає за її оцінки. Матрицю $\widetilde{\text{Rang}}_i$ можна розглядати як матрицю поступок усіх альтернатив до i -ї.

Найгіршим випадком для кожної альтернативи є мінімум поступок з боку інших альтернатив. Цей мінімум визначається як мінімальне значення по кожному із критеріїв (операція перетину елементів кожного рядку матриці поступок по кожному з критеріїв), тобто:

$$\mu_m = \min \{ \mu_m^{-i}(x) \} \quad (10)$$

де m – кількість критеріїв.

Таким чином отримаємо нові матриці поступок для кожної з альтернатив, що містять один рядок – мінімальні оцінки за кожним із критеріїв.

До отриманих матриць застосовуємо максимінний підхід [10]: відповідно до цього підходу рекомендується обирати таку з альтернатив i , песимістична оцінка якої є найкращою, тобто серед мінімальних значень обираємо максимальне:

$$\mu(x) = \max \{ \mu_k \} \quad (11)$$

Визначення нечіткої ваги критеріїв. В табл. 2 наведені кількісні і якісні критерії, які використовуються при оцінці альтернатив.

Розподіл ваги критеріїв відбувається у відповідності до трьох сценаріїв:

1. Соціально-економічний – ранжування альтернатив у відповідності до економічної і соціальної корисності

2. Енергетично ефективний сценарій 1 рівня – ранжування альтернатив у відповідності до мінімізації надлишків згенерованої енергії.

3. Енергетично ефективний сценарій 2 рівня – ранжування альтернатив у відповідності до мінімізації ймовірності втрати живлення.

Таблиця 2 – Оціночні критерії

Позначення	Критерій	Описання
A	Витрати (COE)	власне витрати коштів на основні установки ВДЕ, не враховуються витрати на типове обладнання для всіх конфігурацій системи, кількісна оцінка
C	Шум	Якісна оцінка, являє собою лінгвістичну змінну, оцінюється на основі даних про потужність вітрогенератора та відстань розташування установки до дому
D	Естетична цілісність	Якісна оцінка, являє собою лінгвістичну змінну, оцінюється на основі даних про площу ділянки монтажу, площі даху, площі вітрогенератора.
F	Вплив особливостей ділянки на виробництво електроенергії	Якісна оцінка, являє собою лінгвістичну змінну, оцінюється на основі даних про затіненість специфічної ділянки, форму рельєфу.
G	Витрати на обслуговування	Якісна оцінка, являє собою лінгвістичну змінну, оцінюється на основі даних про вид генеруючих потужностей, якість компонентів та ціну системи.
H	Витрати на ремонт	Якісна оцінка, являє собою лінгвістичну змінну, оцінюється на основі даних про вид генеруючих потужностей, виробника та ціну системи.
M	REPG	Розрахункове значення показника надлишків згенерованої енергії, кількісна оцінка
N	DPSP	Розрахункове значення показника ймовірністю втрати живлення, кількісна оцінка

Процедура зважування полягає в наступному: критерії на першому етапі розподіляються на низький, середній і високий пріоритет. Потім, для кожної з цих груп критеріїв класифікуються як більш і менш важливі. Це обумовлено тим, щоб уникнути:

- рішення по абсолютній шкалі (Са краще Сb краще, ніж Сg і так далі);
- внесення ряду довічного порівняння.

До шести груп критеріїв були призначені значення лінгвістичних змінних. На рисунку 1 показано нечіткі ваги критеріїв через які представлені лінгвістичні змінні критеріїв.

У табл. 3 показаний розподіл ваги критеріїв для трьох сценаріїв.

Ваги критеріїв

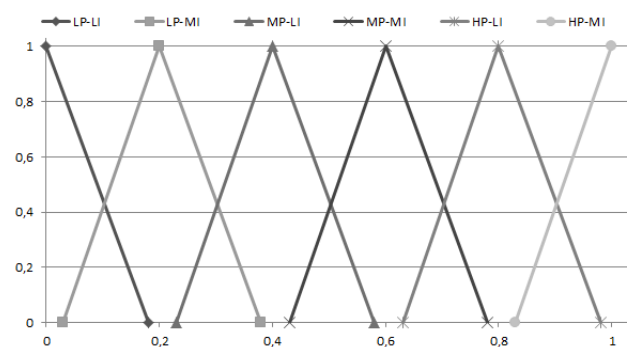


Рис. 1 – Ваги критеріїв

Таблиця 3 – Розподіл ваги критеріїв

Соціально-економічний сценарій					
Високий пріоритет		Середній пріоритет		Низький пріоритет	
Менш важливо	Більш важливо	Менш важливо	Більш важливо	Менш важливо	Більш важливо
G, H	A	D	C	M, N	F
Енергетично ефективний сценарій 1 рівня					
Високий пріоритет		Середній пріоритет		Низький пріоритет	
Менш важливо	Більш важливо	Менш важливо	Більш важливо	Менш важливо	Більш важливо
F	M	C	D, N	A, G	H
Енергетично ефективний сценарій 2 рівня					
Високий пріоритет		Середній пріоритет		Низький пріоритет	
Менш важливо	Більш важливо	Менш важливо	Більш важливо	Менш важливо	Більш важливо
M	N	F, G	H	C, D	A

Приклад побудови функцій приналежності критеріїв на основі обробки експертної інформації

Розглянемо методику побудови функції належності на прикладі критерію «Шум».

У загальному вигляді модель нечіткого логічного виведення рішення щодо значення критерію «Шум» можна подати функцією:

$$Z = F(ZY, BY). \tag{12}$$

де ZY – змінна, що характеризує «ВідстаньВідДому», BY – змінна, що характеризує «ПотужністьВЕУ».

Визначимо лінгвістичну змінну ZY – «ВідстаньВідДому» на універсальній множині U(ZY) = [0,50] (м). Терм-множина лінгвістичної змінної

T(ZY) = < мала, середня, велика> складається із термів лінгвістичних змінних ZY1, ZY2, ZY3.

Визначимо лінгвістичну змінну BY – «ПотужністьВЕУ» на універсальній множині U(Y) = [0,10] (кВт). Терм-множина лінгвістичної змінної T(BY) = < мала, середня, велика> із термів лінгвістичних змінних BY1, BY2, BY3.

Лінгвістична змінна Z визначається на універсальній множині U(Z) = [0,1]. Терм-множина лінгвістичної змінної T(Z) = <тихо, помірно, гучно> складається із термів лінгвістичних змінних Z1, Z2, Z3.

Для визначення значення критерію «Шум» сформовано правила вигляду

$$\text{If } ZY \text{ is } ZY1 \text{ and } BY \text{ is } BY2 \text{ then } Z=Z2.$$

У даному правилі передумовами є ZY і $ZY1$, BY і $BY2$. Інтерпретація правила: Якщо «ВідстаньВідДому» = $ZY1$ і «ПотужністьВЕУ» = $BY2$, то значення критерію шум = NC .

Фрагмент бази правил для формування рішення наведено на рис. 2.

Приклад побудови функції приналежності термів лінгвістичної змінної BY – «ПотужністьВЕУ» на універсальній множині $U(Y) = [0,10]$ подано нижче. Результати опитування трьох експертів наведені в табл. 4.

Результати обробки експертних суджень представлені в табл. 5. Числа над пунктирною лінією - це

кількість голосів, відданих експертами за приналежність нечіткій множині відповідного елемента. Числа під пунктирною лінією - ступінь приналежності, розрахований за формулою (4).

Аналогічним чином будуються функції приналежності термів лінгвістичної оцінки змінної «ВідстаньВідДому».

Реалізація нечіткого логічного висновку моделі визначення значення критерію «Шум» здійснюється за алгоритмом Мамдані. Для дефазифікації обрано метод середнього центру [11]. Вікно переглядів результатів моделювання з функцією належності для всіх лінгвістичних змінних наведено на рис. 3.

```

1. If (ВідстаньДоДому is Мала) and (ПотужністьВЕУ is Мала) then (Шум is Помірно) (1)
2. If (ВідстаньДоДому is Мала) and (ПотужністьВЕУ is Середня) then (Шум is Помірно) (1)
3. If (ВідстаньДоДому is Мала) and (ПотужністьВЕУ is Велика) then (Шум is Гучно) (1)
4. If (ВідстаньДоДому is Середня) and (ПотужністьВЕУ is Мала) then (Шум is Тихо) (1)
5. If (ВідстаньДоДому is Середня) and (ПотужністьВЕУ is Велика) then (Шум is Гучно) (1)
6. If (ВідстаньДоДому is Велика) and (ПотужністьВЕУ is Мала) then (Шум is Тихо) (1)
7. If (ВідстаньДоДому is Велика) and (ПотужністьВЕУ is Середня) then (Шум is Помірно) (1)
8. If (ВідстаньДоДому is Велика) and (ПотужністьВЕУ is Велика) then (Шум is Гучно) (1)
9. If (ВідстаньДоДому is Середня) and (ПотужністьВЕУ is Середня) then (Шум is Помірно) (1)

```

Рис. 2 – Фрагмент бази правил для формування рішення щодо критерію «Шум»

Таблиця 4 – Результати анкетування експертів

	терми	1-2 кВт	3-4 кВт	5-6 кВт	7-8 кВт	9-10 кВт
Експерт 1	мала	1	1	0	0	0
	середня	0	0	1	0	0
	велика	0	0	1	1	1
Експерт 2	мала	1	1	0	0	0
	середня	0	0	1	0	0
	велика	0	0	1	1	1
Експерт 3	мала	1	1	0	0	0
	середня	0	0	1	0	0
	велика	0	0	0	1	1

Таблиця 5 – Результати обробки суджень експертів

терми	1-2 кВт	3-4 кВт	5-6 кВт	7-8 кВт	9-10 кВт
Мала ($ZY1$)	3 ----- 1	3 ----- 1	0 ----- 0	0 ----- 0	0 ----- 0
Середня ($ZY2$)	0 ----- 0	0 ----- 0	3 ----- 1	3 ----- 1	3 ----- 1
Велика ($ZY3$)	0 ----- 0	0 ----- 0	2 ----- 0,5	3 ----- 1	3 ----- 1

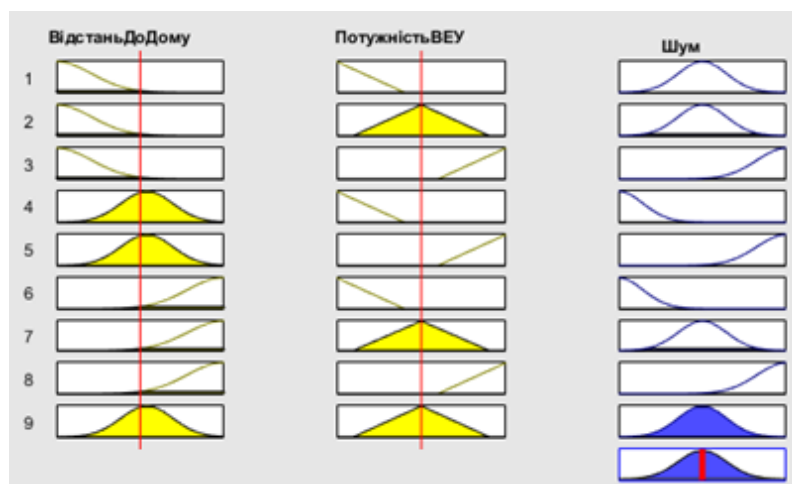


Рис. 3 – Функції приналежності нечітких множин для критерію «Шум»

Аналогічним чином будують функції приналежності на основі експертної інформації для всіх інших критеріїв.

Обговорення результатів. Згідно представленої методики був проведений тестовий розрахунок, який проводиться для п'яти альтернатив. Було проведено їх ранжування згідно визначеної за методикою в параграфі 6 функції приналежності якісних критеріїв та визначеної в параграфі 7 ваги критеріїв.

Після оптимізаційного сценарію I рівня для подальшого вивчення за соціально-економічними показниками були обрані альтернативи під номером 1, 4, 5 (табл. 1), а за енергетично ефективними показниками були обрані конфігурації 3, 4, 5 (рис 4а). На другому етапі поміж альтернатив 1, 3, 4, і 5 проводиться ранжування з точки зору енергетично-ефективного сценарію за показником DPSP.

Згідно отриманих результатів альтернатива під номером 5 – є оптимальним рішенням (рис. 4б).

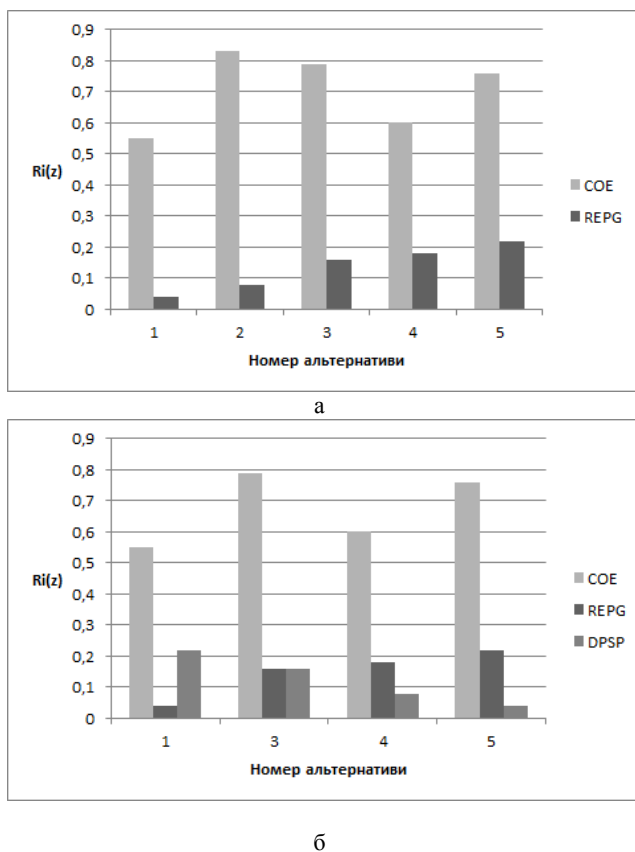


Рис. 4 – Результат ранжування альтернатив: а – Результати I рівня; б – Результати II рівня

Висновки. У роботі сформована постановка задачі структурної оптимізації ГЕСВДЕ і запропоновано підхід для визначення оптимальної конфігурації системи в умовах невизначеності в процесі багатокритеріального аналізу альтернативних варіантів побудови енергетичних мереж.

Даний підхід дозволяє проранжувати альтернативи згідно трьох оптимізаційних сценаріїв в нечітких умовах за схемою Беллмана-Заде. При умові неявної переваги альтернативи пропонується оцінка альтернатив за максимумним критерієм.

Наукові результати, одержані в результаті проведеного дослідження, полягають у наступному:

- Запропоновано та науково обґрунтовано модель прямої агрегації усіх критеріїв, яка дозволяє привести до «нечіткості» як кількісні, так і якісні показники.

Зведення до нечіткості кількісних показників відбувається за алгоритмом нормалізації, в процесі всі значення звелися до одного діапазону.

Реалізація нечіткого логічного висновку щодо визначення значень якісних показників здійснюється за алгоритмом Мамдані з використанням методу обробки експертної інформації.

Список літератури:

1. Шендрік, В. В. Актуальность моделирования распределенных энергосистем эффективного использования возобновляемых источников энергии [Текст] / В. В. Шендрік, С. М. Ващенко, О. В. Шульма, К. А. Омеляненко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 5/8 (65). – С. 4–8. Режим доступа: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/18118/15866>
2. Shulyma, O. The Architecture of an Information System for the Management of Hybrid Energy Grids [Text] / O. Shulyma, P. Davidsson, V. Shendryk, A. Marchenko // Annals of Computer Science and Information Systems. – 2015. – № 6. – P. 281–288. doi: [10.15439/2015f402](https://doi.org/10.15439/2015f402)
3. Beccali, M. Decision making in energy planning: the ELECTRE multicriteria analysis approach compared to a FUZZY-SETS methodology [Text] / M. Beccali, M. Cellura, D. Ardenete // Energy Conversion and Management. – 1998. – № 39 (16–18). – P. 1869–1881. doi: [10.1016/s0196-8904\(98\)00053-3](https://doi.org/10.1016/s0196-8904(98)00053-3)
4. Figueira, J. Electre methods [Text] / Figueira, J., Mousseau, V., Roy, B. // Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys. – 2005. – P. 133–153.
5. Halouani, N. (2009). PROMETHEE-MD-2T method for project selection [Text] / Halouani, N., Chabchoub, H., Martel, J. // European Journal of Operational Research. – 2009. – № 195 (3). – 841–849. doi: [10.1016/j.ejor.2007.11.016](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.11.016)
6. Opricovic, S. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS [Text] / S. Opricovic, G. H. Tzeng // European journal of operational research. – 2004. – № 156 (2). – P. 445–455. doi: [10.1016/s0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(03)00020-1)
7. Беллман, Р. Принятие решений в расплывчатых условиях [Текст] / Р. Беллман, Л. Заде. – Москва: Мир, 1976. – 215 с.
8. Штовба, С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>. – 2001.
9. Чернов, В. Г. Основы теории нечетких множеств. Решение задач многокритериального выбора альтернатив [Текст] / В. Г. Чернов. – Владимирский государственный университет, 2005. – 100 с.
10. Рыков, А. С. Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации [Текст] / А. С. Рыков. – Москва: МИСиС, 2009. – 608 с.
11. Кравець, П. Системи прийняття рішень з нечіткою логікою [Текст] / П. Кравець, Р. Куркало // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2009. – № 650. – С. 115–123.

Bibliography (transliterated):

1. Shendrik, V. V., Vashhenko, S. M., Shulima, O. V., Omeljanenko, K. A. (2013). Relevance of modeling distributed energy systems for efficient use of renewable energy sources. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(8(65)), 4–8. Available at: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/18118/15866>
2. Shulyma, O., Davidsson, P., Shendryk, V., Marchenko, A. (2015). The Architecture of an Information System for the Management of Hybrid Energy Grids. Position Papers of the 2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, 6, 281–288. doi: [10.15439/2015f402](https://doi.org/10.15439/2015f402)
3. Beccali, M., Cellura, M., Ardenete, D. (1998). Decision making in energy planning: the ELECTRE multicriteria analysis approach compared to a FUZZY-SETS methodology. Energy Conversion and Management, 39 (16–18), 1869–1881. doi: [10.1016/s0196-8904\(98\)00053-3](https://doi.org/10.1016/s0196-8904(98)00053-3)

4. Figueira, J., Mousseau, V., Roy, B. (2005). ELECTRE methods. Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys, 133–153.
5. Halouani, N., Chabchoub, H., Martel, J. M. (2009). PROMETHEE-MD-2T method for project selection. European Journal of Operational Research, 195(3), 841–849. doi: [10.1016/j.ejor.2007.11.016](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.11.016)
6. Opricovic, S., Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. European Journal of Operational Research, 156 (2), 445–455. doi: [10.1016/s0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(03)00020-1)
7. Bellman, R., Zade, L. (1976). Prinjatje reshenij v raspilychatyh uslovijah. Moscow: Mir, 215.
8. Shtovba, S. D. (2001). Vvedenie v teoriju nechetkih mnozhestv i nechetkiju logiku. Available at: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>
9. Chernov, V. G. (2005). Osnovy teorii nechetkih mnozhestv. Reshenie zadach mnogokriterial'nogo vybora al'ternativ. Vladimirskij gosudarstvennyj universitet, 100.
10. Rykov, A. S. (2009). Sistemnyj analiz: modeli i metody prinjatija reshenij i poiskovoj optimizacii. Moscow: MISIS, 608.
11. Kravec, P., Ky'rkalo, R. (2009). Sy'stemy' pry'jnyattya rishen' z nechitkoyu logikoyu. Visnyk nacional'nogo universy'tetu "L'viv's'ka politexnika". Komp'yuterni nauky' ta informacijni tehnologiyi, 650, 115–123.

Надійшла (received) 07.06.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Формалізація задачі прийняття рішень для вибору оптимальної структури гібридної енергетичної системи/ О. В. Шулима, В. В. Шендрик, П. Давідсон// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.62–69. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Формализация задачи принятия решений для выбора оптимальной структуры гибридной энергетической системы/ О. В. Шулима, В. В. Шендрик, П. Давидсон // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.62–69. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

The formalization of decision-making problem to select the optimal structure of a hybrid energy system/ O. Shulyma, V. Shendryk, P. Davidsson//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221). – P.62–69. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шулима Ольга Василівна – Сумський державний університет, асистент кафедри комп'ютерних наук; вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, Україна, 40007; тел.: 095-17-48-606; e-mail: o.shulyma@gmail.com.

Шулима Ольга Васильевна – Сумский государственный университет, ассистент кафедры компьютерных наук; ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, Украина, 40007; e-mail: o.shulyma@gmail.com.

Shulyma Olha – Sumy State University, assistant at computer science department; 2, Rymskogo-Korsakova st., 40007 Sumy, Ukraine; e-mail: o.shulyma@gmail.com.

Шендрик Віра Вікторівна – Сумський державний університет, асистент кафедри комп'ютерних наук; вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, Україна, 40007; e-mail: vira.shendryk@gmail.com.

Шендрик Вера Викторовна – Сумский государственный университет, доцент кафедры компьютерных наук; ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, Украина, 40007; e-mail: vira.shendryk@gmail.com.

Shendryk Vira – Sumy State University, Associate Professor at computer science department; 2, Rymskogo-Korsakova st., 40007 Sumy, Ukraine; e-mail: vira.shendryk@gmail.com.

Давідсон Пол – Університет м. Мальме, професор кафедри комп'ютерних наук і медіа технологій, м. Мальме, Швеція, 205 06; e-mail: pauldavidsson@mah.se.

Давидсон Пол – Университет г. Мальме, профессор кафедры компьютерных наук и медиа технологий, г. Мальме, Швеция, 20506; e-mail: pauldavidsson@mah.se.

Davidsson Paul – Malmö högskola, Professor at Department of Computer Science and Media Technology, Malmö, Sweden, 20506; e-mail: pauldavidsson@mah.se.

УДК 519.878

М. І. ЮСЬКІВ, Г. Г. ЦЕГЕЛИК

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ ПОСЛІДОВНОГО ПЕРЕГЛЯДУ СТОРІНОК НА WEB-САЙТІ ДЛЯ РІЗНИХ ЗАКОНІВ РОЗПОДІЛУ ЙМОВІРНОСТЕЙ ЗВЕРТАННЯ ДО СТОРІНОК

Так як Інтернет – це набір сайтів та сторінок, все більш актуальним постає питання пошуку інформації на сторінках сайтів на основі заданих критеріїв. Розглянуто метод послідовного перегляду сторінок Web-сайту. Знайдено математичне сподівання загального часу, необхідного для пошуку сторінки, для різних законів розподілу ймовірності звертання до сторінок. Визначено ефективність методу для різних законів розподілу ймовірності звертання до сторінки.

Ключові слова: моделювання доступу, послідовно організовані сторінки, закони розподілу ймовірностей, REST-сервіси, розпаралелювання пошуку.

Так как Интернет – это набор сайтов и страниц, все более актуальным становится вопрос поиска информации на страницах сайтов на основе заданных критериев. Рассмотрен метод последовательного просмотра Web-сайта. Найдено математическое ожидание общего времени, необходимого для поиска страницы, для различных законов распределения вероятности обращения к страницам. Определена эффективность метода для различных законов распределения вероятности обращения к странице.

Ключевые слова: моделирование доступа, последовательно организованы страницы, законы распределения вероятностей, REST-сервисы, распараллеливания поиска.

The object of this study is to review the organization and pages for given probabilities turning the pages. For performance criterion search page taken the expected total time required to find the page you want the user. One of the problem areas of the study is the behavior of the algorithm for different distribution laws. Therefore, further steps in the research was the model output for different laws of distribution and analysis of the results with existing data for these laws probability distribution page.

For a given study introduced the concept of mathematical expectation of the time required to search for Web-page on the site and made it as a performance criterion. Input parameters are in such Searching for viewing pages and reading pages that are constant parameters. Also, the input parameter is the number of pages on the site and this option is variable.

The starting dependence parameter is the expectation of the time required to search for pages on the site by changing the number of pages for different laws probability distribution pages.

As a result of working formulas for the expectation of the time required to find information on a page based on parameters that are taken into account in a consistent finding information on the page. With the efficiency criterion adopted by the expectation of the time required to search for pages on the Web-site method consistent browsing. Expressions for the expectation that depend on different laws probability distribution pages. The comparative analysis of the effectiveness of the method, different laws probability distribution pages. Depending calculated mathematical expectation of the time required to search for pages on the site, on changes in the law probability distribution pages for a given number of pages.

Keywords: modeling access consistently organized pages, the laws of probability distribution, REST-services, paralleling the search.

Вступ. Мережа Інтернет є великим інформаційним ресурсом, через який кожен день проходять та обробляються великі об'єми інформації. Основними складовими цього ресурсу є сервери та Web-сайти. Кожен сайт відповідно складається з набору сторінок. Сторінки сайту – атомарні одиниці, які між собою пов'язані логічними зв'язками [1, 2]. Одним із найбільш актуальних питань роботи з мережею Інтернет є пошук та вибірка інформації на основі заданих критеріїв. На сьогоднішній день існує достатньо велика кількість розроблених алгоритмів пошуку інформації у мережі Інтернет [3]. Значно менша кількість алгоритмів, призначених для пошуку інформації на сайті чи безпосередньо на його сторінках. Існують такі готові продукти, як Elastic Search (США), який являє собою REST-сервіс та який використовує хмарну інфраструктуру, та реалізовує інвертовані індекси зі скінченними перетворювачами для реалізації повнотекстового пошуку на сторінці. Проте, кількість таких продуктів є надзвичайно мала, як і кількість алгоритмів, розроблених для реалізації таких завдань, тому дослідження в цьому напрямку актуальні.

Об'єкт дослідження та його технологічний аудит. Об'єктом даного дослідження є організація та перегляд сторінок сайту при заданих ймовірностях звертання до сторінок.

За критерій ефективності пошуку сторінки приймається математичне сподівання загального часу, необхідного для пошуку потрібної сторінки користувачем. Вважатимемо, що пошук інформації на сайті

відбувається методом послідовного перегляду сторінок. Серед законів розподілу ймовірностей звертання до сторінок розглянемо рівномірний, бінарний й узагальнений, частковим випадком якого є так зване правило «80-20» та закон Зіпфа.

Припустимо, що інформація, що міститься на Web-сайті, розміщена на N сторінках. Нехай:

p_i – ймовірність звертання до i -ї сторінки; a – час читання однієї сторінки; t – час перегляду однієї сторінки; a, t – сталі; E – математичне сподівання загального часу, необхідного для пошуку Web-сторінки на сайті.

Тоді E виразиться формулою:

$$E = \sum_{i=1}^N (a + t) i p_i = (a + t) \sum_{i=1}^N i p_i.$$

Одним з найбільш проблемних місць даного дослідження є поведінка алгоритму при різних законах розподілу. Тому подальшими кроками у дослідженні було виведення даної моделі для різних законів розподілу та аналіз отриманих результатів при існуючих даних для цих законів розподілу ймовірності звертання до сторінки. Також при дослідженні враховувалися параметри, які безпосередньо стосуються роботи алгоритму. Такі питання як вплив часу відклику серверної частини та ризику, пов'язані з роботою хмарних сервісів в моделі, не враховуються.

© М. І. Юськів, Г. Г. Цегелик. 2016

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є виведення математичної моделі для нового методу пошуку інформації на сайті, а також перевірка ефективності цього методу. Це дає можливість підвищити швидкість пошуку інформації на сайті, а також покращити наступні показники при пошуці інформації:

- зниження вартості та ресурсозатратності пошуку інформації за рахунок покращення швидкодії алгоритмів пошуку;

- зниження кількості електронних ресурсів задіяних при обробці та пошуку інформації на сайті;

- можливість використовувати розподілені хмарні сервіси для обробки інформації.

Для реалізації поставленої мети, необхідно виконати наступні задачі:

1. Вивести формулу для математичного сподівання загального часу, необхідного для пошуку інформації на сторінці, на основі параметрів, які враховуються при послідовному пошуку інформації на сторінці.

2. Розрахувати значення залежності математичного сподівання загального часу, необхідного для пошуку сторінки на сайті, від зміни закону розподілу ймовірностей звертання до сторінок за заданих параметрів N , a та t .

Дослідження існуючих рішень проблеми. Серед найпоширеніших методів оптимізації пошуку інформації на сайті, які використовуються у світовій практиці та згадуються у науковій періодиці вирізняють наступні види:

- пошук інформації з використанням теорії графів, що знайшло своє відображення у пошуку, реалізованому в мережі Facebook та згадується у джерелі [1];

- розбиття сайту та сторінок на атомарні одиниці, що знаходять відображення у джерелах [2–5];

- використання експертних систем для повнотекстового пошуку з використанням доменів та попередніх результатів пошуку користувачем інформації на сайті [6–8];

- оптимізація пошукових запитів [3, 9];

- кешування найпопулярніших запитів.

Зокрема, коли заходить розмова про пошуковий алгоритм, який використовує теорію графів і реалізований в мережі Facebook варто згадати про його особливості [10]. А саме те, що використовується механізм рангування, який залежно від того, хто виконує пошук, створює набір рангів. Після чого добавляє його до потенційного запиту та проганяє цей запит через набір рангів на критичному шляху. Цей же ж алгоритм використовує підходи для розбиття сторінок на атомарні одиниці, що призводить до розбиття запиту на менші унікальні частини. Проте, не використовується механізм кешування найпопулярніших запитів, оскільки це призводить до збільшення кількості запам'ятовуваних ресурсів та додаткового навантаження на запити.

Також доволі популярним методом на виробництві є використання сторонніх хмарних розподілених систем, які використовуються для повно текстового пошуку. Одним з таких прикладів є продукт Elastic search.

Таким чином, можна припустити, що не існує єдиного підходу для підвищення швидкодії пошуку інформації на сторінках Web-сайту. Проте, можна зробити висновок, що з використанням кількох підходів можна добитися хороших результатів. Це поєднання покращення швидкодії алгоритмів, використання розподілених хмарних систем, оптимізація пошукових запитів та при потребі їх кешування на сьогоднішній день становлять основу підходів, які спільно використовуються для підвищення швидкодії пошуку інформації на сторінках Web-сайту.

Методи досліджень. Для заданих досліджень було введено поняття математичного сподівання загального часу, необхідного для пошуку Web-сторінки на сайті та прийнято його як критерій ефективності.

Вхідними параметрами у такому пошуці є час перегляду сторінки та час читання сторінки, які є сталими параметрами. Також вхідним параметром є кількість сторінок на сайті і цей параметр є змінним.

Вихідним параметром є залежність математичного сподівання загального часу, необхідного для пошуку сторінки на сайті від зміни кількості сторінок для різних законів розподілу ймовірностей звертання до сторінок.

Проміжним етапом дослідження є виведення значень математичного сподівання загального часу, необхідного для пошуку сторінки на сайті для різних законів розподілу ймовірностей звертання до сторінок.

Результати досліджень. Знайдемо явний вираз для E як для рівномірного закону розподілу ймовірностей [1, 2] звертання до сторінок, так і для «бінарного», закону Зіпфа та узагальненого закону розподілу [1, 4].

1. У випадку рівномірного закону розподілу ймовірностей звертання до сторінок:

$$E = (a + t) \frac{1}{2} (N + 1).$$

2. Якщо ймовірності звертання до сторінок задовольняють «бінарний» закон розподілу, то:

$$E = (a + t) \left(\sum_{i=1}^{N-1} \frac{i}{2^i} + \frac{N}{2^{N-1}} \right) = (a + t) \left(\sum_{i=1}^N \frac{i}{2^i} + \frac{N}{2^N} \right).$$

Якщо позначити:

$$E_m = \sum_{i=1}^m \frac{i}{2^i} + \frac{m}{2^m},$$

то:

$$\begin{aligned} E_{m+1} &= \sum_{i=1}^{m+1} \frac{i}{2^i} + \frac{m+1}{2^{m+1}} = \sum_{i=1}^m \frac{i}{2^i} + \frac{m+1}{2^m} = \\ &= \sum_{i=1}^m \frac{i}{2^i} + \frac{m}{2^m} + \frac{1}{2^m} = E_m + \frac{1}{2^m}. \end{aligned}$$

Отже:

$$E_{m+1} = E_m + \frac{1}{2^m}, m = 3, 4, \dots$$

Тоді:

$$E_3 = E_2 + \frac{1}{2^2},$$

$$E_4 = E_3 + \frac{1}{2^3} = E_2 + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2^3},$$

$$E_N = E_{N-1} + \frac{1}{2^{N-1}} = E_2 + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2^3} + \dots + \frac{1}{2^{N-1}}.$$

Оскільки:

$$E_2 = 1 + \frac{1}{2},$$

то:

$$E_N = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \dots + \frac{1}{2^{N-1}} = 2 - \frac{2}{2^N}.$$

Тому:

$$E = (a+t) \left(2 - \frac{2}{2^N} \right).$$

3. Якщо ймовірності звертання до сторінок розподілені за законом Зіпфа, то:

$$E = (a+t) \sum_{i=1}^N \frac{i}{iH_N} = (a+t) \frac{N}{H_N}.$$

Оскільки:

$$H_N = \ln N + C + \gamma_N,$$

де $C = 0,577\dots$ – ейлерова стала, γ_N – деяка нескінченно мала величина, то:

$$E = (a+t) \frac{N}{\ln N + C + \gamma_N}.$$

Нехтуючи величиною γ_N , з достатньо високою точністю можемо прийняти:

$$E = (a+t) \frac{N}{\ln N + C}.$$

4. Нехай розподіл ймовірностей звертання до сторінок задовольняє узагальнений закон розподілу, тоді:

$$E = (a+t) \sum_{i=1}^N \frac{i}{i^c H_n^{(c)}} = (a+t) \frac{1}{H_n^{(c)}} \sum_{i=1}^N \frac{1}{i^{c-1}} = (a+t) \frac{H_n^{(c-1)}}{H_n^{(c)}}.$$

Використовуючи апроксимації [2]:

$$H_n^{(c)} = \frac{1}{1-c} n^{1-c} - C^{(c)} + \gamma_n^{(c)},$$

$$H_n^{(c-1)} = \frac{1}{2-c} n^{2-c} + \alpha^{(c)}(n),$$

де $C^{(c)}$ – певні сталі; $\gamma_n^{(c)}$ – деякі нескінченно малі величини; $\alpha^{(c)}(n)$ – повільно зростаюча функція, одержимо:

$$E = (a+t) \frac{\frac{1}{2-c} n^{2-c} + \alpha^{(c)}(n)}{\frac{1}{1-c} n^{1-c} - C^{(c)} + \gamma_n^{(c)}}.$$

Нехтуючи нескінченно малою величиною $\gamma_n^{(c)}$, з достатньо високою точністю можемо прийняти:

$$E = (a+t) \frac{\frac{1}{2-c} n^{2-c} + \alpha^{(c)}(n)}{\frac{1}{1-c} n^{1-c} - C^{(c)}}.$$

Залежність математичного сподівання загального часу, необхідного для пошуку сторінки на сайті від зміни закону розподілу ймовірностей звертання до сторінок для $N = 10^6$ та $a + t = 1$ зображено на рис. 1.

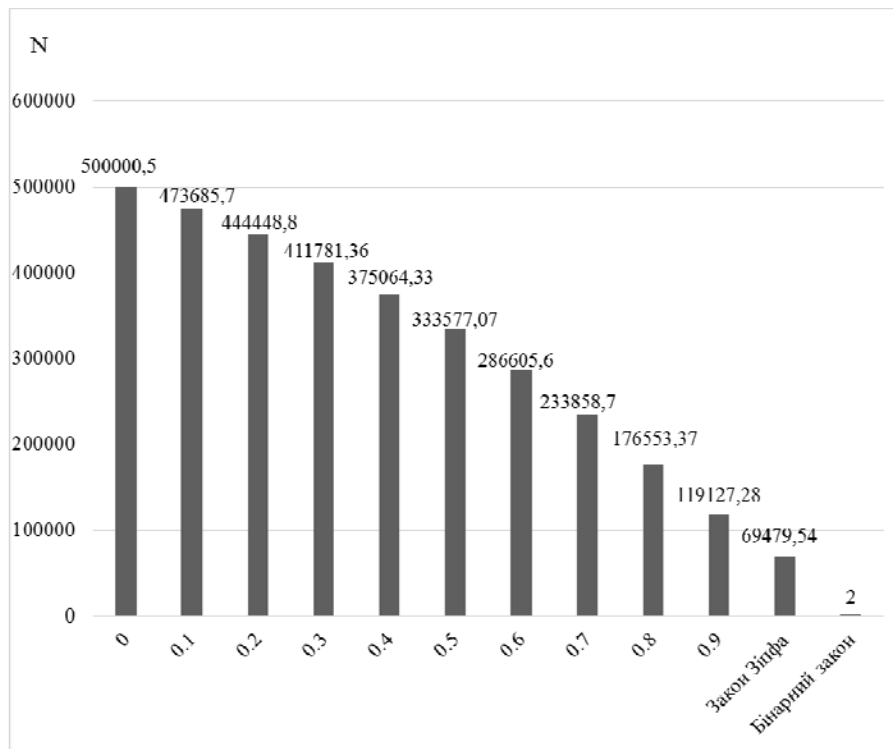


Рис. 1 – Залежність математичного сподівання загального часу, необхідного для пошуку сторінки на сайті, від зміни закону розподілу ймовірностей звертання до сторінок для $N = 10^6$ та $a + t = 1$

Аналіз отриманих результатів (рис. 1) показує, що найефективніше метод працює у випадку, якщо сторінки розподілені за бінарним законом розподілу ймовірностей або за законом Зіпфа. Видно, що при кількості сторінок $N = 10^6$ залежність математичного сподівання загального часу пошуку сторінки на сайті від кількості сторінок зменшується.

SWOT-аналіз результатів дослідження.

Strength. До сильних сторін даного дослідження належить те, що без введення додаткових доробок введений метод можна застосувати на виробництві. Для цього найкращим підходом буде розробка REST-сервіса, як частини Web-додатку з мікросервісної архітектурою. Завданням цього сервісу є організація пошуку інформації на сайті. Перевагою такого підходу є можливість окремого тестування функціоналу пошуку, що в свою чергу не буде впливати на

функціонал основної частини Web-сайту та її тестування. Іншою перевагою саме такого підходу буде можливість використовувати можливості розпаралелювання роботи та збільшення пропускної та обчислювальної здатності через використання хмарних платформ, таких як Microsoft Azure (США), які дають багато можливостей для хостингу, тестування, діагностики та побудови метрик для REST-сервісів.

Використання результатів отриманого дослідження дає можливість на основі математичної моделі розрахувати математичне сподівання для методу послідовного читання та перегляду сторінок для різних законів розподілу ймовірностей звертання до сторінки. На основі вхідних даних можна побачити, наскільки метод ефективний та розробити подальші кроки для удосконалення алгоритмів пошуку інформації на Web-сайті.

Weaknesses. Слабі сторони даного дослідження полягають у тому, що при побудові математичної моделі враховано лише параметри, які безпосередньо стосуються роботи алгоритму. Проте, у випадку розробки реального Web-додатку, з'являються ризики пов'язані з проблемою розпаралелювання алгоритму та продуктивного використання обчислювальних ресурсів. Також є ризики пов'язані з роботою хмарних платформ та не враховані у моделі випадки, коли час відклику серверної частини, яка відповідає за пошук збільшується або серверна частина не відповідає.

Відповідно, при розробці та конфігурації реального продукту усі ці параметри також необхідно враховувати. Іншими словами, незважаючи на розраховані в математичній моделі значення залежності математичного сподівання загального часу, необхідного для пошуку сторінки на сайті, від зміни закону розподілу ймовірностей звертання до сторінок. Необхідно також враховувати роль факторів, які стосуються системи, і на якій розвернутий додаток з таким методом пошуку інформації на сайті.

Opportunities. На сьогоднішній день програмне забезпечення, яке використовується для пошуку інформації на сайті, є достатньо поширене у сучасних програмних продуктах [9, 10]. Відповідно, різні компанії займаються розробкою такого програмного забезпечення або купують вже готове рішення. Ця обставина свідчить про те, що результати даного дослідження можуть зіграти важливу роль для покращення алгоритмів пошуку інформації на Web-сайті. Також варто сказати, що при розробці комерційного програмного забезпечення варто використовувати підхід до розробки як REST-сервіс. Відповідно, це дасть можливість легшої інтеграції з будь-яким програмним продуктом, оскільки пошуковий сервіс буде працювати як окрема компонента. Це дасть можливість покращити швидкість пошуку та алгоритму пошуку без впливу на основний функціонал додатку, в який інтегрується REST-сервіс.

Threats. Існують певні загрози з інтеграцією результатів дослідження. Основною загрозою є наявність на ринку вже готових пошукових продуктів, що може викликати певну конкуренцію даного рішення з вже існуючими продуктами. Іншою проблемою є необхідність враховувати роль факторів, які стосуються системи, на якій розвернутий додаток.

Висновки

1. Виведено формулу для математичного сподівання загального часу, необхідного для пошуку інформації на сторінці, на основі параметрів, які враховуються при послідовному пошуку інформації на сторінці. За критерій ефективності прийнято математичне сподівання загального часу, необхідного для пошуку сторінки на Web-сайті методом послідовного перегляду сторінок.

2. Здійснено порівняльний аналіз математичного сподівання загального часу, необхідного для пошуку сторінки на сайті для різних законів розподілу ймовірностей звертання до сторінок. Аналіз отриманих результатів, які зображені на рис. 1, що найефективніше метод працює у випадку, якщо сторінки розподілені за бінарним законом розподілу ймовірностей або за законом Зіпфа. Показано, що при кількості сторінок $N = 10^6$ залежність математичного сподівання загального часу пошуку сторінки на сайті від кількості сторінок зменшується.

Список літератури:

1. *Кнут, Д.* Искусство программирования для ЭВМ: Сортировка и поиск [Текст] / Д. Кнут. – Москва: Вильямс, 2000. – 822 с.
2. *Цегелик, Г. Г.* Организация и поиск информации данных [Текст] / Г. Г. Цегелик. – Львов: Свит, 1990. – 186 с.
3. Intro to Facebook Search [Electronic resource]. – Available at: <https://www.facebook.com/notes/facebook-engineering/intro-to-facebook-search/365915113919/>
4. *Юськів, М. І.* Моделювання та ефективність доступу до послідовно організованих сторінок Web-сайту для різних законів розподілу ймовірностей звертання до сторінок [Текст] / М. І. Юськів, Г. Г. Цегелик. – Полтава: ПУЕТ, 2016. – 362 с.
5. *Baeza-Yates, R.* Relating Web Structure and User Search Behavior [Text] / R. Baeza-Yates, C. Castilio // In 10th World Wide Web Conference. – 2001. – № 20. – P. 1–2.
6. *Jansen, B. J.* Real life information retrieval: A study of user queries on the Web [Text] / B. J. Jansen, A. Spink, J. Bateman, T. Saracevic // ACM SIGIR Forum. – 1998. – № 32 (1). – P. 5–17. doi: [10.1145/281250.281253](https://doi.org/10.1145/281250.281253)
7. *Hu, W. C.* An Overview of World Wide Web Search Technologies [Text] / W. C. Hu, Y. Chen Y, M. Schmalz, G. Ritter // Proceedings of the fifth world multi conference on system, cybernetics and informatics. – 2000. – P. 356–361.
8. *Kobayashi, M.* Informational Retrieval on the Web [Text] / M. Kobayashi, K. Takeda. – IBM Japan, 2000. – 47 p.
9. *Marchionini, G.* Information Seeking in Full-Text End-User-Oriented Search Systems [Text] / G. Marchionini, S. Dwiggins, A. Katz, X. Lin // The Roles of Domain and Search Expertise. – 1993. – № 15. – P. 35–36
10. *Pollock, A.* What's wrong with Internet Searching [Electronic resource] / A. Pollock, A. Hockley // D-Lib Magazine. – 1997. – Available at: <http://www.dlib.org/dlib/march97/bt/03pollock.html>

Bibliography (transliterated):

1. Knut, D. (2000). *Iskusstvo programmirovaniya dlja JeVM: Sortirovka i poisk*. Moscow: Vil'jams, 822.
2. Cegelik, G. G. (1990). *Organizacija i poisk informacii dannyh*. Lviv: Svit, 186.
3. Intro to Facebook Search. Available at: <https://www.facebook.com/notes/facebook-engineering/intro-to-facebook-search/365915113919/>
4. Yus'kiv, M. I., Cegely'k, G. G. (2016). *Modelyuvannya ta efekty'vnist' dostupu do poslidovno organizovany'x storinok Web-sajtu dlya rizny'x zakoniv rozpodilu jmovimostej zvertannya do storinok*. Poltava: PUET, 362.
5. Baeza-Yates, R., Castilio, C. (2001). *Relating Web Structure and User Search Behavior*. In 10th World Wide Web Conference, 20, 1–2.
6. Jansen, B. J., Spink, A., Bateman, J., Saracevic, T. (1998). *Real life information retrieval: a study of user queries on the Web*. ACM SIGIR Forum, 32 (1), 5–17. doi: [10.1145/281250.281253](https://doi.org/10.1145/281250.281253)
7. Hu, W. C., Chen, Y., Schmalz, Y. M., Ritter, G. (2000). *An Overview of World Wide Web Search Technologies*. Proceed-

- ings of the fifth world multi conference on system, cybernetics and informatics, 356–361.
8. Kobayashi, M., Takeda, K. (2000). Informational Retrieval on the Web. IBM Japan, 47.
9. Marchionini, G., Dwiggins, S., Katz, A., Lin, X. (1993). Information Seeking in Full-Text End-User-Oriented Search Systems. The Roles of Domain and Search Expertise, 15, 35–36.
10. Pollock, A., Hockley, A. (1997). What's wrong with Internet Searching. D-Lib Magazine. Available at: <http://www.dlib.org/dlib/march97/bt/03pollock.html>

Надійшла (received) 07.12.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделювання та дослідження ефективності методу послідовного перегляду сторінок на web-сайті для різних законів розподілу ймовірностей звертання до сторінок/ М. І. Юськів, Г. Г. Цегелик// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.70–74. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Моделирование и исследование эффективности метода последовательного просмотра страниц на web-сайте для различных законов распределения вероятностей обращение к страницам/ М. И. Юськів, Г. Г. Цегелик// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.70–74. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Modelling and investigation of efficiency of consecutive revision method for browsing of pages on a web-site for different distribution laws of probability of accessing pages/ M. Yuskiv, H. Tsehelyk//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.70–74. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Юськів Маркіян Ігорович – аспірант, Львівський національний університет імені Івана Франка, кафедра математичного моделювання соціально-економічних процесів; вул. Університетська, 1, м. Львів, Україна, 79000; e-mail: kafmmsep@lnu.edu.ua

Цегелик Григорій Григорович – доктор фізико-математичних наук, Львівський національний університет імені Івана Франка, професор кафедри математичного моделювання соціально-економічних процесів; вул. Університетська, 1, м. Львів, Україна, 79000; e-mail: kafmmsep@lnu.edu.ua

Юськів Маркіян Ігорович – аспірант, Львовский национальный университет имени Ивана Франко, кафедра математического моделирования социально-экономических процессов; ул. Университетская, 1, г. Львов, Украина, 79000; e-mail: kafmmsep@lnu.edu.ua

Цегелик Григорій Григорьевич – Доктор физико-математических наук, Львовский национальный университет имени Ивана Франко, профессор кафедры математического моделирования социально-экономических процессов; ул. Университетская, 1, г. Львов, Украина, 79000; e-mail: kafmmsep@lnu.edu.ua

Yuskiv Markiiian – graduate student, Lviv National Ivan Franko University, Department of Mathematical Modeling of Social and Economics Processes; Universytetska str., 1, Lviv, Ukraine, 79000; e-mail: kafmmsep@lnu.edu.ua

Tsehelyk Hryhorii – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Lviv National Ivan Franko University, Professor Department of Mathematical Modeling of Social and Economics Processes; Universytetska str., 1, Lviv, Ukraine, 79000; e-mail: kafmmsep@lnu.edu.ua

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ВИРОБНИЦТВА

УДК 621.923.01

Є. А. ВАСИЛЬЄВ, С. В. ПОПОВ, А. В. ВАСИЛЬЄВ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЛИБОКОГО СВЕРДЛІННЯ СПІРАЛЬНИМИ СВЕРДЛАМИ ПРИ ОБРОБЦІ ДЕТАЛЕЙ З МАТЕРІАЛУ СТАЛЬ 40

У статті представлені результати теоретичних й експериментальних досліджень процесу глибокого свердління спіральним свердлом. Отримана математична модель залежності осевого зусилля від глибини різання, діаметру свердла, подачі і швидкості різання. Наведені рекомендації для підвищення продуктивності процесу свердління.

Ключові слова: глибоке свердління, механізм подач, стійкість, жорсткість, ефективність, математичне моделювання.

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса глубокого сверления спиральным сверлом. Получена математическая модель зависимости осевого усилия от глубины резания, диаметра сверла, подачи и скорости резания. Приведены рекомендации для повышения производительности процесса сверления.

Ключевые слова: глубокое сверление, механизм подач, стойкость, жесткость, эффективность, математическое моделирование.

This paper deals with the obtainment of process mathematical model of deep-hole twist drilling. In this article we have aimed to describe the processes that occur during deep-hole drilling depending on the depth of cut, drill diameter, feed and cutting velocity. There have been provided recommendations to improve the performance of the drilling process. Deep-hole drilling process is a time-consuming working operation, especially in machining viscous materials, and in the system "machining station – device – tool – component part" in deep-hole drilling process the tool – the twistdrill – works under the worst and the heaviest conditions. Accordingly, the enhancement of tool life will lead to increase in productivity of the cutting process, to decrease of energy requirement and the number of the utilizable tools. The knowledge of the process mathematical model of deep-hole twist drilling gives an insight into better understanding of the influence quantity of some or another value on the overall effectiveness of the process and allows to elaborate recommendations for ranging.

Keywords: deep-hole drilling, feed gearing, withstandability, toughness, efficiency, mathematic simulation.

Вступ. В даний час спостерігається тенденція, коли багато операцій, які здійснюються на розточувальних верстатах, переводять на більш дешеві і простіші вертикально-свердлильні верстати.

Свердлення глибоких отворів є трудомісткою технологічною операцією, особливо при обробці в'язких матеріалів [1]. В системі верстат – пристрій – інструмент – деталь (ВПД) при глибокому свердлінні [3] в найбільш важких умовах працює інструмент – спіральне свердло. Замкнений об'єм обробки, різноманітні функції, виконання яких повинні забезпечувати конструкція інструменту, форсовані режими різання змушують працювати корпус свердла, його ріжучі і напрямні елементи із значними напруженнями. Ці обставини роблять незаперечними переваги переводу механічної обробки отворів на вертикально-свердлильні верстати в умовах машинобудівного виробництва при обробці складнопрофільних поверхонь.

Аналіз останніх досліджень і виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Технологія глибокого свердління спіральними свердлами докорінно відрізняється від свердління кільцевими та гарматними свердлами. Основними відмінностями є кінематичні й динамічні особливості токарних, свердлильних верстатів і модулів, можливість керування вихідними параметрами процесу за рахунок використання в складі технологічної системи опорних елементів з різними характеристиками і т. ін. Таким чином, використання відомих теорій свердління гарматними свердлами, щодо процесу глибокого свердління спіральними свердлами, практично не можливе. Намагання розглянути це питання щодо сталевих заготовок робилися в [4].

Формулювання цілей статті. У зв'язку з вищевикладеним метою роботи є підвищення економічної ефективності свердління глибоких отворів за рахунок збільшення продуктивності процесу різання, підвищення стійкості інструменту, надійності процесу свердління, зменшення енерговитрат та кількості використовуваного інструменту. При вирішенні поставленого завдання необхідно провести теоретичні й експериментальні дослідження, оцінити точність і достовірність одержуваних результатів. **Об'єктом дослідження** є обладнання для виконання глибокого свердління. **Предметом дослідження** є фізика явищ, які виникають при взаємодії свердла з заготовкою, а також вплив параметрів і режимів роботи обладнання на показник шорсткості оброблюваної поверхні.

Виклад основного матеріалу процесу дослідження глибокого свердління спіральними свердлами. Для практичної реалізації глибокого свердління спіральним свердлом нам необхідно здійснити технологічне забезпечення, а саме: отримати залежності і дані для розрахунків і вибору типу пристрою для вимірювання осевого зусилля у випадку, коли $P_{o\max} \leq [P_{m.n.}]$, де

$P_{o\max}$ – максимальне осеве зусилля при свердлінні, Н; $[P_{m.n.}]$ – допустиме, регламентоване паспортом верстата зусилля механізму подач, Н.

Конструктивних параметрів пружного елемента пристрою, наприклад, пружини, із забезпеченням умови: $P_{np} \geq P_o$, P_{np} – зусилля, що створюється пружиною при її деформації (стиску) в процесі різання, Н.

© Є. А. Васильєв, С. В. Попов, А. В. Васильєв. 2016

Аналіз значень осьових зусиль P_o , визначених за різними діючими нормативами та довідниками [5, 6, 7, 9, 10] при постійних значеннях глибини різання – t , діаметру свердла $D=30$ мм, подачі – $s=0,06$ мм/об., швидкості різання – $V=16$ м/с наведені на рис. 1.

Аналіз наведених даних свідчить про суттєву різницю визначення осьового зусилля при глибокому свердлінні спіральними свердлами, для нашого випадку в межах від 250 до 340 кН, і, відповідно, різні режими різання при свердлінні. З метою отримання достовірних значень P_o при свердлінні глибоких отворів нами запропонована методика, яка базується на використанні елементів теорії ймовірностей.

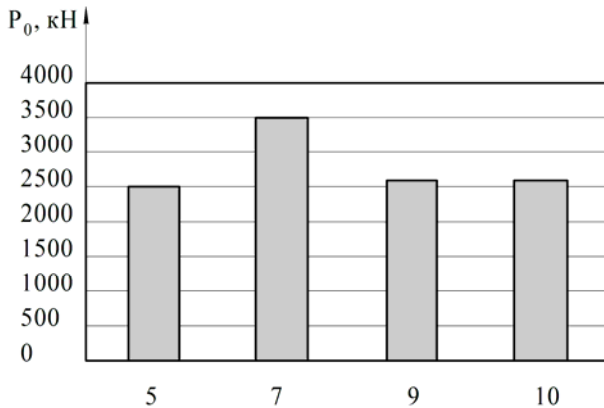


Рис. 1 – Гістограма значень осьового зусилля P_o (кН) при свердлінні отвору в матеріалі сталь 40 при $d=\text{const}$, $s=\text{const}$, $V=\text{const}$ за різними [5, 7, 9, 10] літературними джерелами

Дослідження процесу глибокого свердління зразків з сталі 40 планується проводити на вертикально-свердлильному верстаті мод. 2Н135. Схема установки показана на рис. 2. Свердлильний верстат складається зі шпинделя, в якому кріпиться свердло. Заготовка 1, що свердлиється, закріплюється на столі верстата.

Як цільова функція оцінки можливостей елементів технологічної системи доцільно прийняти продуктивність процесу глибокого свердління Q [9]:

$$Q = \frac{V \cdot S \cdot d \cdot T}{2 \cdot (T + t_{zm})} \quad (1)$$

де V , S , d – величини швидкості, подачі і діаметру свердлення, відповідно, м/с; мм/об; мм; T – стійкість, хв; t_{zm} – час зміни, хв.

Для досягнення найвищої продуктивності процесу свердлення необхідно вести обробку з максимально допустимою величиною подачі S . У той же час максимальна допустима подача свердлення обмежується міцністю і подовжньою стійкістю свердла [8] і контролюється вимірюванням осьового зусилля.

Подача, припустима міцністю робочої частини свердла, може бути визначена за формулою:

$$S = y_m \sqrt{\frac{0,02 \cdot d^{3-x_m} \cdot \sigma_s}{1,73 \cdot C_m \cdot HB}} \quad (2)$$

де d – діаметр інструменту, мм; σ_s – допустима напруга для матеріалу інструменту, МПа; C_m , y_m , x_m – постійні коефіцієнти, які залежать від механічних властивостей матеріалу, який оброблюють, і матеріалу ріжучої частини свердла; HB – твердість матеріалу, що оброблюють, за Брінелем.

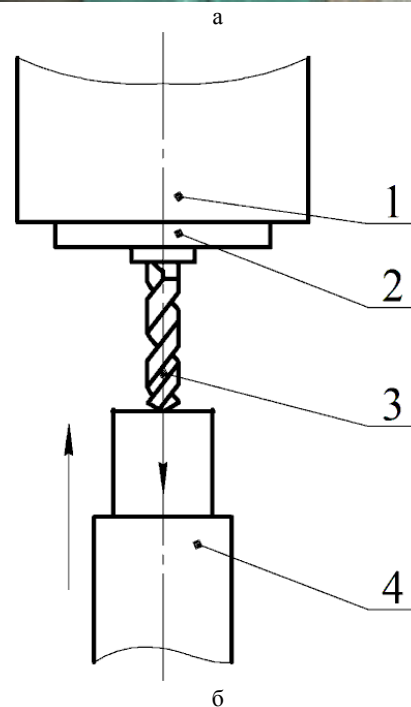


Рис. 2 – Дослідна установка: а – загальний вид; б – конструктивна схема; 1 – верстат; 2 – шпиндель; 3 – свердло; 4 – заготовка

Із збільшенням глибини свердління спіральним свердлом подача S , крім цього, також обмежується повздовжньою стійкістю стебла інструменту. Оскільки осьова сила різання при свердлінні P не повинна перевищувати критичну силу $P_{кр}$, що визначається за формулою [7]:

$$P_{кр} = \frac{E \cdot \pi^3 \cdot I}{(\mu \cdot l)^2}, \quad (3)$$

де $P_{кр}$ – критична сила, Н; E – модуль пружності, Па; l – довжина стебла свердла, мм; I – момент інерції поперечного перетину інструменту, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; μ – коефіцієнт приведенної довжини.

Для збереження подовжньої стійкості стебла інструмента у міру збільшення глибини обробки необхідно зменшувати осьову складову сили різання шляхом зниження подачі. Проте, зменшення подачі приводить до збільшення питомої сили різання, що, у свою чергу, якісно впливає на процес різання. Обробка глибоких отворів на малих подачах є малопродуктивною, а на граничних подачах – веде до зниження якості обробки отворів. Наявність наведених обмежень по міцності, стійкості інструменту і мінімальному значенню допустимої подачі свердлення визначає область можливого вибору допустимих параметрів технологічної системи. Існуюча теорія і практика глибокого свердлення дає деякі рекомендації економічної доцільності тих або інших способів глибокого свердлення, які показані на рис. 3. Зрозуміло, що ці рекомендації певною мірою є умовними, а їх межі розпливчаті і у кожному конкретному випадку обробки глибоких отворів можуть бути переглянутими [10].

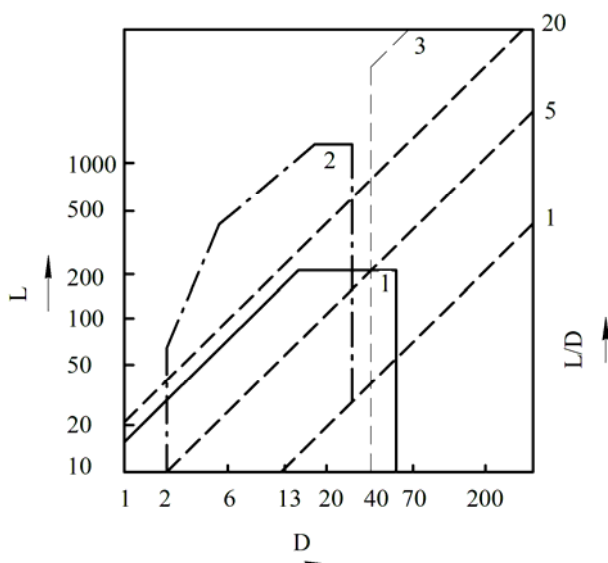


Рис. 3 – Номограма для визначення економічної ефективності способів глибокого свердлення залежно від глибини свердлення L та діаметра свердлення D : 1 – область можливої обробки спіральними свердлами; 2 – розсвердлювання 3 – область обробки гарматними свердлами

Теоретичні дослідження при обробці сталі 40 дозволяють використати наведені дані для вибору рекомендованих параметрів інструменту для глибокого свердління. З наведених на рисунку 3 графіків можна зробити висновок, що економічно доцільно виконувати операції глибокого свердління спіральними свердлами у відносно широких межах – до $200D$.

Проте можливості підвищення жорсткості інструменту за рахунок зміни форми перерізу стеблини свердла на даний час досить повно вивчені і практично вичерпані. Тому, вказуючи на складність істотного підвищення жорсткості свердла за рахунок оптимізації його поперечного перерізу основна увага спрямована на раціональну експлуатацію свердел.

Експериментальні дослідження визначення номінальних значень осьових зусиль при свердлінні сталі 40 здійснювали шляхом забезпечення міцності стебла свердла за умови збереження інструментом повздовжньої стійкості різними розмірами свердла при фіксованому значенні подачі. Одержані значення осьового зусилля P_o нанесені на графік рис. 4. З'єднання точок здійснено шляхом апроксимації.

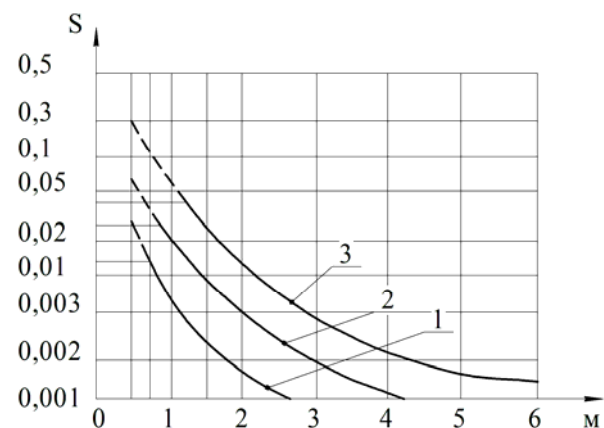


Рис. 4 – Допустимі подачі S при обробці сталі 40 за умови міцності стебла свердла і збереження інструментом подовжньої стійкості при одержаному зусиллі; діаметр свердла: 1 – 5 мм; 2 – 7,5 мм; 3 – 10 мм

Аналіз наведених на рис. 4 графічних залежностей свідчить, що робоча область в системі координат «подача – осьове зусилля» визначається двома показниками: мінімальною для даного діаметру свердла величиною подачі, що визначається стійким характером стружкоутворення і мінімальною продуктивністю; і максимально допустимою величиною подачі відповідно з міцністю поперечного перерізу інструменту і подовжньої стійкості стебла свердла.

Нами доведена можливість використання рекомендацій [9], які впевнено забезпечують використання рекомендованих режимів різання при досягненні економічної доцільності. Узагальнення результатів експериментальних досліджень створили основу для аналізу ефективності процесу свердління зі змінним вильотом інструмента.

Відомо [10], що величина стійкості інструмента зі збільшенням глибини свердління нелінійно залежить від довжини вильоту:

$$\left(\frac{T}{T_0}\right)^m = \left(\frac{l_0}{l}\right)^n, \quad (4)$$

де l – робоча довжина вильоту, мм; l_0 – вихідна розрахункова довжина вильоту, мм; n , m – показники, які враховують вплив вильоту на стійкість інструменту.

Залежно від способу виготовлення свердла, а також матеріалу, який оброблюють, показники степенів n і m за результатами досліджень [2, 9] приймають в межах від 0,2 до 0,3.

Проаналізувавши процес глибокого свердлення отворів свердлом із змінним вильотом, необхідно відзначити, що величина вильоту буде однаковою тільки на граничній глибині обробки. Протягом усього процесу обробки при роботі зі змінним вильотом інструмента ця величина завжди буде меншою. Таким чином, за всіма рівними умовами відношення стійкості інструмента при обробці зі змінним вильотом може бути визначене за формулою:

$$\frac{T}{T_0} = \frac{k - k^m}{k - 1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{n}{m}}, \quad (5)$$

де k – відношення вильоту наприкінці обробки до вихідного вильоту.

Відповідно до залежностей будуюмо графіки стійкості інструмента при свердлінні зі змінним вильотом від відношення вильотів наприкінці і початку обробки (рис. 5). Показник степені m , що враховує вплив вильоту на стійкість, при цьому прийнятий рівним 0,25.

Наведені графічні залежності показують, що зі збільшенням відношення вильотів наприкінці і на початку обробки, стійкість інструмента зростає. З погіршенням оброблюваності матеріалу (збільшення показника n) ефект зростання стійкості збільшується. Ці висновки співпадають з експериментальними дослідженнями, проведеними в роботі на звичайних свердлах постійного перерізу по всій довжині інструмента, які показали, що крутильні ковчання, які знижують стійкість свердлів, є пропорційними кубу довжини вильоту свердла. При цьому шляхом зменшення довжини вильоту свердла можна збільшити величину подачі в три – сім разів при одночасному збільшенні стійкості інструмента від трьох до семи разів.

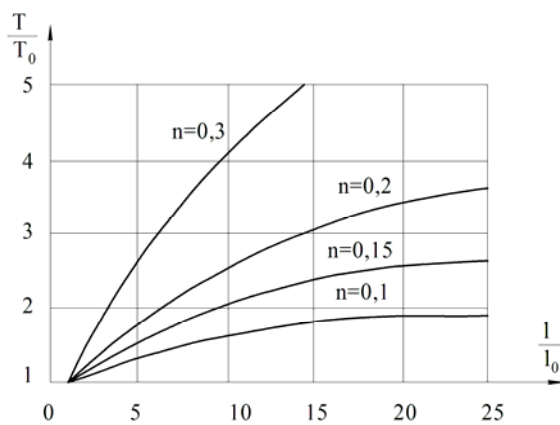


Рис. 5 – Стійкість інструмента при свердлінні зі змінним вильотом

Висновки

Аналіз отриманих теоретичних і експериментальних даних показує, що значення глибини сверд-

ління поверхні в основному залежить від глибини різання, діаметру свердла, подачі і швидкості різання, також уточнені параметри режимів різання при глибокому свердлінні спіральними свердлами сталі 40.

Для підвищення продуктивності процесу свердління необхідно вести обробку з максимально допустимою величиною подачі. У той же час максимальна допустима подача свердління обмежується міцністю і подовжньою стійкістю інструменту.

Список літератури:

1. Dreus, A. Investigation of heating of the drilling bits and definition of the energy efficient drilling modes [Text] / A. Dreus, A. Kozhevnikov, K. Lysenko, A. Sudakov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 3/7 (81). – P. 41–46. doi: [10.15587/1729-4061.2016.71995](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71995)
2. Ertunc, H. A decision fusion algorithm for tool wear condition monitoring in drilling [Text] / H. Ertunc, K. Loparo // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2001. – № 41 (9). – P. 1347 – 1362. doi: [10.1016/s0890-6955\(00\)00111-5](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(00)00111-5)
3. Li, H. Research on deep drilling [Text] / H. Li // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – № 101–102. – P. 1101–1104.
4. Васильєв, А. В. Підвищення ефективності глибокого свердління сталевих заготовок [Текст] / А. В. Васильєв, С. В. Попов, І. В. Тимошенко // Галузеве машинобудування, будівництво. – 2014. – № 2 (41). – С. 206–212.
5. Пестунов, В. М. Решение проблем глибокого сверлення в металлообработке [Текст] / В. М. Пестунов, В. В. Свяцкий, Л. П. Свьяцкая // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. – 2006. – № 49. – С. 173–178.
6. Пестунов, В. М. Оптимізація процесу обробки глибоких отворів [Текст] / В. М. Пестунов, В. В. Свяцкий, С. В. Придворова // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2012. – № 25. – С. 200–209.
7. Косиловой, А. Г. Справочник технолога-машиностроителя [Текст] / А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – Москва: Машиностроение, 1986. – 656 с.
8. Тимочко, Г. Конструкторсько-технологічне забезпечення підвищення економічної ефективності свердління наскрізних отворів [Електронний ресурс] / Г. Тимочко. – Режим доступу: <http://nadoest.com/konstruktorseko-tehnologichne-zabezpechennya-pidvishennya-ekon>.
9. Устройство для сверления отверстий малого диаметра. Патент СССР 975238, МКП В23 В47 [Текст] / Кузьмин Н. И., Кривый П. Д., Сопрончук В. Н. – № 3326065/25-08; заявл. 07.08.84; опубл. 23.11.82, бюл. №43.
10. Устройство для сверления сквозных отверстий. Патент СССР 1491624, МКП В23 В47 [Текст] / Нагорняк С. Г., Кузьмин Н. И., Кривый П. Д. – № 4279167/31-08; заявл. 07.07.87; опубл. 07.07.89, бюл. № 25.

Bibliography (transliterated):

1. Dreus, A., Kozhevnikov, A., Lysenko, K., Sudakov, A. (2016). Investigation of heating of the drilling bits and definition of the energy efficient drilling modes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(7(81)), 41–46. doi: [10.15587/1729-4061.2016.71995](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71995)
2. Ertunc, H., Loparo, K. (2001). A decision fusion algorithm for tool wear condition monitoring in drilling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 41(9), 1347–1362. doi: [10.1016/s0890-6955\(00\)00111-5](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(00)00111-5)
3. Li, H. (2012). Research on deep drilling. Applied Mechanics and Materials, 101–102, 1101–1104.
4. Vasylyev, A. V., Popov, S. V., Tymoshenko, I. V. (2014). Pidvyshchennya efektyvnosti glybokogo sverdlinnya staleyv'x zagotovok. Galuzeve mashynobuduvannya, budivnyctvo, 2 (41), 206–212.
5. Pestunov, V. M., Svjackij, V. V., Svjackaja, L. P. (2006). Reshenie problem glubokogo sverlenija v metalloobrabotke. Vestnik NTUU «KPI». Mashinostroenie, 49, 173–178.
6. Pestunov, V. M., Svyaczkyj, V. V., Prydvorova, S. V. (2012). Optymizacija procesu obrobky glybokyx otvoriv. Tekhnika v silskogospodars'komu vyrobnyctvi, galuzeve mashynobuduvannya, avtomatyzacija, 25, 200–209.

7. Kosilovoj, A. G., Meshherjakova, R. K. (1986). Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja. Moscow: Mashinostroenie, 656.
8. Тумочко, Г. Конструкторско-технологичне забезпечення пидвй'shennya ekonomichnoyi efekty'vnosti sverdlinnya naskrizny'x otvoriv Available at: <http://nadoest.com/konstruktorseko-tehnologichne-zabezpechennya-pidvishennya-ekon>.
9. Kuz'min, N. I., Krivyj, P. D., Sopronchuk, V. N. (1982). Ustrojstvo dlja sverlenija otverstij malogo diametra. Patent SSSR 975238, MKP V23 V47. № 3326065/25-08; declared 07.08.84; published 23.11.82, №43.
10. Nagornjak, S. G., Kuz'min, N. I., Krivyj, P. D. (1989). Ustrojstvo dlja sverlenija skvoznih otverstij. Patent SSSR 1491624, MKP V23 V47. № 4279167/31-08; declared 07.07.87; published 07.07.89, № 25.

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Підвищення ефективності глибокого свердління спіральними свердлами при обробці деталей з матеріалу сталь 40/ Є. А. Васильєв, С. В. Попов, А. В. Васильєв// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.75–79. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Повышение эффективности глубокого сверления спиральным сверлом при обработке деталей из материала сталь 40/ Е. А. Васильев, С. В. Попов, А. В. Васильев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.75–79. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Efficiency upgrading of twist bit deep-hole drilling in machining of steel-40 parts/ E. Vasyliiev, S. Popov, A. Vasyliiev //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.75–79. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Васильєв Є. А. – кандидат технічних наук, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, доцент кафедри будівельних машин і обладнання; пр-т. Першотравневий, 24, м. Полтава, Україна, 36011.

Попов С. В. – кандидат технічних наук, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, доцент кафедри технології машинобудування; пр-т. Першотравневий, 24, м. Полтава, Україна, 36011; e-mail: psv@pntu.edu.ua

Васильєв А. В. – кандидат технічних наук, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, доцент кафедри технології машинобудування; пр-т. Першотравневий, 24, м. Полтава, Україна, 36011.

Васильєв Е. А. – Кандидат технических наук, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка доцент кафедры строительных машин и оборудования; пр-т. Первомайский, 24, г. Полтава, Украина, 36011.

Попов С. В. – Кандидат технических наук, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка доцент кафедры технологии машиностроения; пр-т. Первомайский, 24, г. Полтава, Украина, 36011; e-mail: psv@pntu.edu.ua

Васильєв А. В. – Кандидат технических наук, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка доцент кафедры технологии машиностроения; пр-т. Первомайский, 24, г. Полтава, Украина, 36011.

Vasyliiev E. – PhD, Associate Professor, Department of Construction Machinery and Equipment, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Pershotravneviy ave., 24, Poltava, Ukraine, 36011.

Popov S. – PhD, Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Pershotravneviy ave., 24, Poltava, Ukraine, 36011; e-mail: psv@pntu.edu.ua

Vasyliiev A. – PhD, Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Pershotravneviy ave., 24, Poltava, Ukraine, 36011.

УДК 623.44

О. І. БІЛЕНКО, К. В. ПЕРШИНА

ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ «ЛЮДИНА–МАШИНА» НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОНАННЯ ВОГНЕВИХ ЗАВДАНЬ ПРАЦІВНИКАМИ СИЛ БЕЗПЕКИ

У статті обґрунтовано необхідність врахування впливу технічних характеристик зброї на функціональні характеристики стрільця під час визначення показників ефективності виконання вогневого завдання. Визначено перелік технічних характеристик зброї і функціональних характеристик стрільця, які мають сумісний та суттєвий вплив на результати виконання вогневих завдань, а також структура зв'язків між ними. Сформульовані завдання, розв'язання яких дозволить забезпечити задану ефективність стрільби шляхом формування вимог до технічних характеристик зброї з урахуванням функціональних характеристик стрільця.

Ключові слова: стрілецька зброя, ефективність стрільби, технічні характеристики зброї, функціональні характеристики стрільця.

В статье обоснована необходимость учета влияния технических характеристик оружия на функциональные характеристики стрелка при определении показателей эффективности выполнения огневой задачи. Определен перечень технических характеристик оружия и функциональных характеристик стрелка, которые имеют совместное и существенное влияние на результаты выполнения огневых задач, а также структура связей между ними. Сформулированы задачи, решение которых позволит обеспечить заданную эффективность стрельбы путем формирования требований к техническим характеристикам оружия с учетом функциональных характеристик стрелка.

Ключевые слова: стрелковое оружие, эффективность стрельбы, технические характеристики оружия, функциональные характеристики стрелка.

When creating and modernization sample of small arms to meet the requirements for its combat characteristics relevant standard specifications define or change. The resulting specifications weapon on the functional characteristics of the shooter, including the accuracy of coordination, static and dynamic amplitude tremor, visual acuity, reaction rate, binaural hearing ability may be negatively affected. In forming requirements to the technical characteristics of weapons effects of these characteristics on the shooter is not always taken into account. The adoption of samples of small arms with irrational characteristics of this opinion indirectly confirms.

The list of the technical characteristics of weapon and functional characteristics of shooter which have compatible and significant impact on the results of the shooting is defined. In article the structure of relations between them is defined also. Formulated problem whose solution will provide the desired efficiency of shooting by forming requirements to the technical characteristics of weapons considering the functional characteristics of the shooter.

Keywords: small arms, the effectiveness of shooting, functional characteristics of shooter.

Вступ. Незважаючи на стрімкий розвиток нових видів озброєння та військової техніки, що спостерігається останнім часом, значна роль стрілецької зброї у розв'язанні збройних конфліктів зберігається. Так, наприклад, за даними [1] у 2003 році до дев'яноста відсотків загиблих у військових діях були уражені саме стрілецькою зброєю. Для сил безпеки стрілецька зброя є основним засобом впливу на противника (правопорушника), отже дослідження питань, що пов'язані з ефективністю її застосування, для цих сил є актуальними.

Природним є прагнення до максимальної ефективності застосування зброї, тобто до виконання вогневого завдання (ВЗ) з максимальною ймовірністю при мінімальних витратах часу та боєприпасів. Ефективність виконання вогневого завдання прийнято оцінювати за допомогою наступних показників [2]:

- ймовірність ураження цілі W ;
- середній очікуваний час на виконання вогневого завдання T , с;
- середня очікувана витрата боєприпасів на виконання вогневого завдання N , од.

Враховуючи специфіку завдань сил безпеки та умов їх виконання більш важливими є два перших з наведених показників, які характеризують надійність та оперативність виконання завдання [3].

В галузі технічних наук значна увага приділяється дослідженню впливу окремих технічних характеристик зброї на ефективність стрільби. На основі зазначених залежностей проводяться заходи щодо вдосконалення зразків стрілецької зброї. Так, наприклад, для підвищення точності стрільби підвищується технічна купчастість зразків зброї, для підвищення точності наведення зброї на ціль збільшується кратність оптичних прицілів, для підвищення бойової скорострільності збільшується ємність магазинів тощо. При

цьому змінюються інші характеристики зброї: маса, лінійні розміри окремих елементів та габаритні розміри, положення центру мас та моменти різноманітних сил, світлосила оптичних прицілів тощо.

Зазначені характеристики можуть впливати не тільки на функціонування зразка зброї, а і на стрільця, який цією зброєю управляє. Так, збільшення маси зброї підвищує втому стрільця під час подолання піших дистанцій або перешкод, віддалення центру мас від точки упора (затильника приклада або задньої поверхні рукоятки пістолета) сприяє підвищенню напруження м'язів рук, великі ходи та зусилля елементів спуску, які підвищують безпечність поводження зі зброєю, спричиняють зайві рухи та тремтіння під час здійснення пострілу, зниження світлосили оптичного прицілу веде до погіршення видимості цілі тощо. Під видимістю цілі будемо розуміти здатність стрільця розрізняти обриси цілі та її елементи з урахуванням гостроти його зору, роздільної здатності та світлосили оптичного прицілу, а також оптичних характеристик атмосфери.

При формуванні вимог до технічних характеристик зброї не завжди враховують вплив цих характеристик на стрільця, що непрямо підтверджується прийняттям на озброєння зразків стрілецької зброї з нерациональними характеристиками. Розглянемо, наприклад, масові характеристики таких зразків зброї.

Маса 9 мм пістолета-кулемета Форт-224, який перебуває на озброєнні НГУ, складає 3,8 кг, що в 1,7 разів перевищує середню масу (2,28 кг) пістолетів-кулеметів з аналогічними бойовими властивостями та у 2,4 рази перевищує масу найлегшого з пістолетів-кулеметів, що перебуває на озброєнні сил безпеки (Steir TMP – 1,6 кг).

© О. І. Біленко, К. В. Першина. 2016

Маса снайперської гвинтівки Форт-301 складає 7,4 кг, що в 1,6 рази більше, ніж маса снайперської гвинтівки Драгунова СВД (4,5 кг), яка є близькою до Форт-301 за бойовими властивостями.

Кратність оптичного прицілу Zeiss hansoldt ZF 6-24×56, що перебуває на озброєнні НГУ та використовується з гвинтівкою Форт-301, складає 6...24×. Це забагато для прицільної відстані Форт-301 (1000 м). Для такої прицільної відстані достатньо прицілу 1П21, що має кратність 3...9×. При цьому маса Zeiss hansoldt становить 1,17 кг, що в 1,5 разів перевищує масу 1П21. Крім того, мінімальна кратність Zeiss hansoldt ZF 6-24×56 складає 6×, що забагато при стрільбі на короткі відстані (для сил безпеки середня відстань складає 70 м та рідко перевищує 200 м [4]) через суттєве звуження кута поля зору (3,5° для Zeiss hansoldt проти 6° для 1П21).

Таким чином, технічні характеристики зброї впливають на функціональні характеристики стрільця (характеристики стрільця, що впливають на результати виконання вогневого завдання), що, у свою чергу, може відбиватися на результатах стрільби. Отже, ефективність застосування стрілецької зброї доцільно розглядати на рівні системи «людина–машина» (у якій людина виконує роль оператора, що управляє машиною – зброєю) з урахуванням важливих зв'язків між технічною і біологічною складовими.

Мета статті – обґрунтування необхідності врахування впливу технічних характеристик зброї на функціональні характеристики стрільця під час визначення показників ефективності виконання вогневого завдання.

Визначення впливу характеристик системи «людина–машина» на ефективність виконання вогневих завдань працівниками сил безпеки. При застосуванні вогнепальної зброї ймовірність ураження цілі залежить від ймовірності влучення в неї поражаючого елемента (ПЕ) [2]:

$$W = 1 - \left(1 - \frac{P}{K}\right)^n, \quad (1)$$

де P – ймовірність влучення в цілі ПЕ; n – кількість пострілів, од.; K – необхідна кількість влучень у цілі для виведення її з ладу, од.

У переважній більшості випадків застосування стрілецької зброї силами безпеки достатньо одного влучення в цілі ПЕ для забезпечення ураження або придушення цілі, тому вираз (1) спрощується та приймає вид:

$$W = 1 - (1 - P)^n. \quad (2)$$

З (1) та (2) очевидно, що ймовірність ураження цілі прямо пропорційна ймовірності влучення в неї ПЕ, яка дорівнює [2]:

$$P = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \int_{-\frac{Y}{2}}^{\frac{Y}{2}} e^{-\frac{(y-\bar{y})^2}{2\sigma_y^2}} dy \right] \times \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \int_{-\frac{Z}{2}}^{\frac{Z}{2}} e^{-\frac{(z-\bar{z})^2}{2\sigma_z^2}} dz \right], \quad (3)$$

де σ_y – середньоквадратичне відхилення (СКВ) координат точок влучення від осі розсіювання по висоті, м; σ_z – СКВ координат точок влучення від осі розсіювання по бічному напрямку, м; \bar{y} – математичне очікування координат влучення куль по висоті, м; \bar{z} – математичне очікування координат влучення куль по бічному напрямку, м; Y – висота цілі, м; Z – ширина цілі, м.

З (3) слідує, що зростанню P сприяє зниження σ_y і σ_z , що відповідає підвищенню купчастості стрільби та наближення \bar{y} і \bar{z} до 0, що відповідає підвищенню влучності стрільби.

На практиці наближення \bar{y} і \bar{z} до 0 здійснюється в межах процедури приведення зброї до нормального бою, а значення σ_y та σ_z залежать від низки чинників, на яких слід зосередити увагу.

Одним з таких чинників є технічна купчастість стрільби σ_T , що обумовлена властивостями зразка зброї. Для сучасних зразків стрілецької зброї, що перебуває на озброєнні сил безпеки, технічна купчастість при веденні одиночного вогню з відстані 100 м складає $\sigma_T = 0,002...0,005$ м для снайперських гвинтівок та $\sigma_T = 0,02...0,03$ м для інших зразків стрілецької зброї [5].

Іншим чинником, що впливає на купчастість стрільби, є помилка наведення зброї на цілі σ_H , який є залежним як від характеристик прицільних пристосувань, так і від кондицій стрільця, а саме гостроти його зору та координації рухів. Значення σ_H коливаються в широких межах та суттєво впливають на результати стрільби. Так при стрільбі лежачи з руки значення σ_H сягає 0,013 м, з коліна – 0,025 м та на ходу з коротких зупинок – 0,07 м [6].

Суттєво на купчастість стрільби впливають процеси узгодження активності м'язів тіла, що спрямовані на успішне виконання рухової задачі, тобто ступень координації рухів.

Наступним чинником зниження купчастості стрільби є тремор м'язів, який поділяється на статичний (під час наведення зброї на цілі) та динамічний (під час здійснення спуску).

Внаслідок недосконалості координації рухів стрільця та тремору його м'язів положення зброї у просторі відхиляється від бажаного, що спричиняє відхилення точок влучення куль у площину цілі від контрольної точки.

Складові, що обумовлені координацією рухів, статичним та динамічним треморами позначимо відповідно σ_K , σ_{TPC} та σ_{TRD} .

Сумарне значення СКВ, що обумовлене технічною купчастістю зброї, помилкою наведення на цілі, координацією рухів та тремором м'язів можна розрахувати за формулою (4):

$$\sigma = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_H^2 + \sigma_K^2 + \sigma_{TPC}^2 + \sigma_{TRD}^2}. \quad (4)$$

Якщо технічну купчастість зброї вважати сталою величиною, яка не залежить від стану стрільця, то купчастість стрільби є функцією величин σ_H , σ_K , σ_{TPC} та σ_{TRD} .

На зазначені величини впливає стан людини, який у певній мірі залежить від технічних характеристик зброї.

Так, через втому працівника сил безпеки, що виникла внаслідок прискореного подолання дистанції або перешкод, погіршується координація та точність рухів [7, 8]. Це призводить до підвищення значення σ_k . Також втома негативно відбивається на гостроті зору [7, 9], що тягне за собою збільшення σ_H . Рівень втоми також підвищує амплітуду статичного та динамічного тремору [10, 11]. Внаслідок цього зростає σ_{TRC} та σ_{TRD} .

Відомо, що на точність координації рухів та амплітуду тремору впливає напруження м'язів [12, 13], яке збільшується з масою зброї та зусиллям спуску.

Слід зазначити, що при виконанні вогневих завдань силами безпеки важливою є оперативність, яка зокрема залежить від швидкості реакції стрільця. На цю швидкість негативно впливають рівень втоми та нервово-психічний стан стрільця [14, 15].

Суттєвим негативним чинником є шум пострілу, який впливає на органи слуху, зору та нервово-психічний стан стрільця. Внаслідок цього знижується точність та швидкість рухів, гострота зору, швидкість реакції, бінауральна здатність слуху, уважність, критичність оцінювання обстановки [15–17].

Аналіз завдань сил безпеки та специфіки їх ви-

конання, а також оцінювання впливу окремих чинників на результати виконання вогневих завдань дозволить виявити найбільш суттєві з них. Так, для будь-якої зброї важливими є її маса, енергія віддачі та характеристики шуму пострілу. Для зброї, що утримується однією рукою, використовується без упора, та такої, що має швидко змінювати напрямок стрільби слід додати зусилля спуску і довжину його ходу, а також положення центру мас. Для зброї, що обладнана оптичними прицілами важливими є кратність та світлосила оптичного прицілу. Серед функціональних характеристик стрільця слід виділити точність координації рухів, амплітуду статичного та динамічного треморів, гостроту зору, швидкість реакцій та бінауральну здатність слуху.

Більш докладно зв'язки між характеристиками зброї і стрільця, що суттєво впливають на результати виконання вогневих завдань, та показниками ефективності стрільби наведено на рис. 1.

Для визначення впливу характеристик зброї на ефективність стрільби з урахуванням впливу людини треба мати залежності функціональних характеристик стрільця від технічних характеристик зброї. У відкритих джерелах наводяться деякі залежності, що зв'язують функціональні характеристики людини з рівнем негативного впливу на неї.

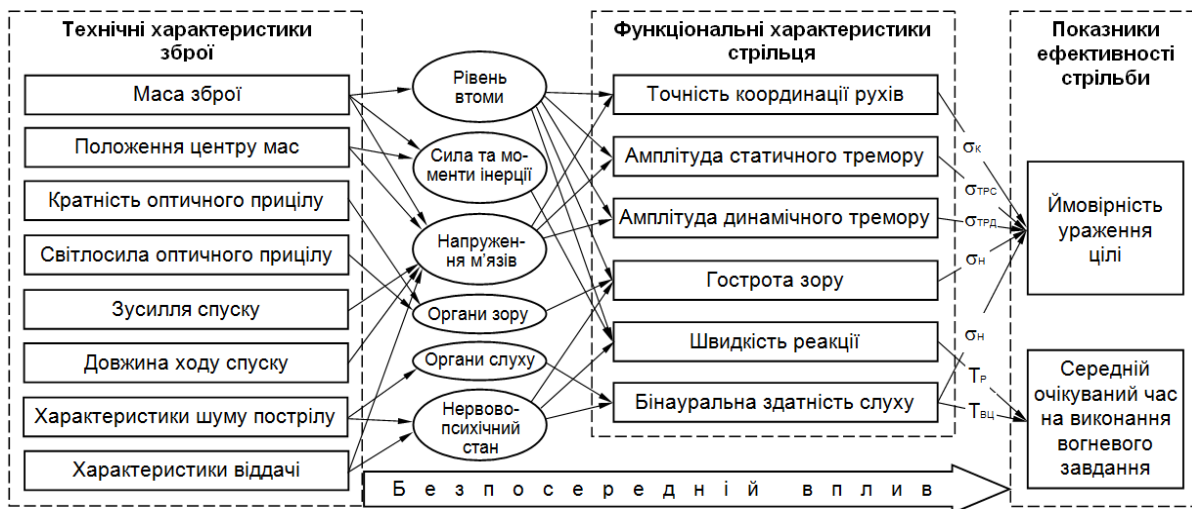


Рис. 1 – Зв'язок технічних характеристик зброї, функціональних характеристик стрільця та показників ефективності стрільби

Так, наприклад, в монографії С. В. Голомазова [18] досліджено точність рухових дій людини та наведено залежності точності рухів від їх довжини та швидкості, а також рівня втоми людини. В дисертації [13] проведено дослідження параметрів вертикальної стійкості та тремору людини та отримано залежності цих параметрів від впливу статичних фізичних навантажень та фотостимуляції зорового аналізатора. Робота [12] присвячена питанням точності рухів, оперативності виконання рухових завдань та швидкості реакції, а також впливу різних чинників на ці характеристики.

Але зазначені залежності здебільшого є емпіричними та отримані для певних груп людей, які за своїм складом та характеристиками можуть суттєво відрізнятися від працівників сил безпеки, що виконують во-

гневні завдання. Отже, зазначені залежності потребують перевірки та, можливо, уточнення.

Отримання залежностей функціональних характеристик стрільця від технічних характеристик зброї (або від інших чинників з урахуванням цих характеристик) дозволить прогнозувати вплив технічних характеристик зброї на показники ефективності стрільби з урахуванням впливу людини. Це відкриває можливість підвищення ефективності виконання вогневих завдань за рахунок визначення раціонального сполучення технічних характеристик зброї та функціональних характеристик стрільця.

Таким чином, забезпечення заданої ефективності стрільби можливе шляхом розв'язання наступних завдань:

отримати низку залежностей функціональних характеристик стрільця від технічних характеристик зброї;

уточнити моделі ймовірності ураження цілі та оперативності виконання вогневого завдання шляхом урахування взаємного впливу технічних характеристик зброї та функціональних характеристик стрільця на результати стрільби;

розробити методичний апарат формування вимог до технічних характеристик зброї з урахуванням функціональних характеристик стрільця.

Висновки

1. Ефективність застосування стрілецької зброї доцільно розглядати на рівні системи «людина-машина» з урахуванням важливих зв'язків між технічною і біологічною складовими

2. Визначено перелік технічних характеристик зброї і функціональних характеристик стрільця, які мають сумісний та суттєвий вплив на результати виконання вогневих завдань, а також структура зв'язків між ними.

3. Сформульовані завдання, розв'язання яких дозволить забезпечити задану ефективність стрільби шляхом формування вимог до технічних характеристик зброї з урахуванням функціональних характеристик стрільця.

Список літератури:

1. Макнаб, К. Оружие уничтожения XXI века. Регулярные войска, полиция и террористы [Текст] / К. Макнаб, Х. Кутер. – М.: Эксмо, 2009. – 464 с.
2. Червоный, А. А. Вероятностные методы оценки эффективности вооружения [Текст] / О. А. Червоный, В. А. Шварц, А. П. Козловцев и др. – М.: Воениздат, 1979. – 95 с.
3. Біленко, О. І. Тактико-технічні характеристики стрілецької зброї для сил охорони правопорядку, які підлягають регламентації [Текст] / О. І. Біленко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 2/10 (62). – С. 28–32. – Режим доступу: [www/URL: http://journals.uran.ua/eejet/article/view/12749](http://journals.uran.ua/eejet/article/view/12749)
4. Ардашев, А. Н. Снайперская война [Текст] / А. Н. Ардашев. – Москва: Эксмо, 2010. – 416 с.
5. Шесть самых знаменитых снайперских винтовок в мире (по состоянию на 14.02.2017 г.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://interpolit.ru/blog/shest-samykh-znamenitikh-snaiperskikh-vintovok-v-mire/2014-03-25-828>. – 14.02.2017. – Название с экрана.
6. Губин, С. Г. Эффективность стрельбы из вооружения боевых машин и стрелкового оружия [Текст] / С. Г. Губин. – Новосибирск: СГГА, 2012. – 158 с.
7. Иткис, М. А. Специальная подготовка стрелка-спортсмена [Текст] / М. А. Иткис. – М.: ДОСААФ, 1982. – 130 с.
8. Немцев, О. Б. Точность движений при взаимодействии с силами различной природы [Текст] / О. Б. Немцев // Теория и практика физической культуры. – 2004. – № 7. – С. 56–58.
9. Тамбовский, А. Н. Об одном важном компоненте высокоточной стрельбы биатлониста [Текст]: сб. тез. докл. II Всерос. науч.-практ. конф., г. Омск, 29–30 апреля 2012 г. / А. Н. Тамбовский // Современная система спортивной подготовки в биатлоне. – Омск: СибГУФК, 2012. – С. 204.
10. Солоницин, Р. А. Результаты исследования возможности повышения точности стрельбы развитием специальных двигательных способностей стрелка [Текст] / Р. А. Солоницин // Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта. – 2011. – № 3 (20). – С. 114–120.
11. Дворкин, А. Д. Стрельба из пневматических винтовок [Текст] / А. Д. Дворкин. – М.: ДОСААФ СССР, 1986. – С. 55–63.
12. Немцев, О. Б. Точность при взаимодействии с силами различной природы [Текст] / О. Б. Немцев // Теория и практика

13. физической культуры. – 2004. – № 7. – С. 56–58.
14. Ефимова, Ю. С. Влияние статических физических нагрузок и фотостимуляции на параметры вертикальной устойчивости и тремора полиатлонистов [Текст]: автореф. дисс. ... канд. биол. наук: 03.01.02 / Ю. С. Ефимова; Сургутский гос. ун-т Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. – Сургут, 2012. – 23 с.
15. Маклаков, А. Г. Общая психология [Текст] / А. Г. Маклаков. – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.
16. Функциональные состояния человека [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: https://www.kazedu.kz/referat/141348/1](https://www.kazedu.kz/referat/141348/1). – 15.12.2016. – Название с экрана.
17. Мишагин, В. Н. Организация и методика проведения учебно-тренировочных занятий по биатлону [Текст] / В. Н. Мишагин, И. Ю. Водолагина. – Саратов: Саратовский педагогический институт, 2007. – 40 с.
18. Голомазов, С. В. Кинезиология точностных действий человека [Текст]: монография / С. В. Голомазов. – М.: СпортАкадем-Пресс, 2003. – 228 с.

Bibliography (transliterated):

1. Maknab, K., Kuter, H. (2009). *Oruzhie unichtozheniia XXI veka. Regularnye voiska, politsiia i terroristy*. Moscow: Eksmo, 464.
2. Chervonyi, A. A., Shvarts, V. A., Kozlovtssev, A. P. et al. (1979). *Veroiatnostnye metody otsenki effektivnosti vooruzheniia*. Moscow: Voenizdat, 95.
3. Bilenko, A. (2013). Characteristics of small arms for low enforcement forces subject to regulation. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, 2(10(62)), 28–32. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/12749>
4. Ardashev, A. N. (2010). *Snaiperskaia voina*. Moscow: Eksmo, 416.
5. *Shest' samykh znamenitkh snaiperskikh vintovok v mire (po sostoianiiu na 14.02.2017 r.)*. Available at: <http://interpolit.ru/blog/shest-samykh-znamenitkh-snaiperskikh-vintovok-v-mire/2014-03-25-828>. Last accessed: 14.02.2017.
6. Gubin, S. G. (2012). *Effektivnost' strel'by iz vooruzheniia boevykh mashin i strelkovogo oruzhiia*. Novosibirsk: SGGA, 158.
7. Itkis, M. A. (1982). *Spetsial'naia podgotovka strelka-sportsmena*. Moscow: DOSAAF, 130.
8. Nemtsev, O. B. (2004). *Tochnost' dvizhenii pri vzaimodeistvii s silami razlichnoi prirody. Teoriia i praktika fizicheskoi kul'tury*, 7, 56–58.
9. Tambovskii, A. N. (2012). *Ob odnom vazhnom komponente vysokotochnoi strel'by biatlonista. Sbornik tezisov dokladov II Vseros. nauk.-prakt. konf. "Sovremennaia sistema sportivnoi podgotovki v biatlone"*, g. Omsk, 29–30 apreliia 2012 g. Omsk: SibGUFG, 204.
10. Solonitsyn, R. A. (2011). *Rezultaty issledovaniia vozmozhnosti povysheniia tochnosti strel'by razvitiem spetsial'nykh dvigatel'nykh sposobnostei strelka. Pedagogiko-psihologicheskie i mediko-biologicheskie problemy fizicheskoi kul'tury i sporta*, 3 (20), 114–120.
11. Dvorkin, A. D. (1986). *Strel'ba iz pnevmaticheskikh vintovok*. Moscow: DOSAAF SSSR, 55–63.
12. Nemtsev, O. B. (2004). *Tochnost' pri vzaimodeistvii s silami razlichnoi prirody. Teoriia i praktika fizicheskoi kul'tury*, 7, 56–58.
13. Efimova, Yu. S. (2012). *Vliianie staticheskikh fizicheskikh nagruzok i fotostimulatsii na parametry vertikal'noi ustoichivosti i tremora poliatlonistov*. Surgut, 23.
14. Maklakov, A. G. (2001). *Obshchaia psihologiia*. St. Petersburg: Piter, 592.
15. *Funktional'nye sostoianiia cheloveka*. Available at: <https://www.kazedu.kz/referat/141348/1>. Last accessed: 15.12.2016.
16. Maklakov, A. G. (2001). *Obshchaia psihologiia*. St. Petersburg: Piter, 592.
17. Mishagin, V. N., Vodolagina, I. Yu. (2007). *Organizatsiia i metodika provedeniia uchebno-trenirovochnykh zaniatii po biatlonu*. Saratov: Saratovskii pedagogicheskii institut, 40.
18. Golomazov, S. V. (2003). *Kineziologiia tochnostnykh deistvii cheloveka*. Moscow: SportAkadem-Press, 228.

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вплив характеристик системи «людина–машина» на ефективність виконання вогневих завдань працівниками сил безпеки/ О. І. Біленко, К. В. Першина// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.80–84. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-5459.

Влияние характеристик системы «человек-машина» на эффективность выполнения огневых задач работниками сил безопасности/ О. И. Биленко, К. В. Першина// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.80–84. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-5459.

Impact characteristics of the system "man-machine" on the effectiveness of the fire safety task force staff/ A. Bilenko, K. Pershyna//Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Khar'kov: NTU "KhPI", 2016. – No 49 (1221).– P.80–84. – Bibliogr.: 18. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Біленко Олександр Іванович – кандидат технічних наук, доцент, Національна академія Національної гвардії України, майдан Захисників України, 3, м. Харків, Україна, 61001, e-mail: bai69@ukr.net.

Першина Катерина Володимирівна – юрисконсульт юридичної служби, Національна академія Національної гвардії України, майдан Захисників України, 3, м. Харків, Україна, 61001, e-mail: 1111-ekaterina@ukr.net.

Біленко Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент, Национальная академия Национальной гвардии Украины; пл. Защитников Украины, 3, г. Харьков, Украина, 61001.

Першина Екатерина Владимировна – юрисконсульт юридической службы, Национальная академия Национальной гвардии Украины; пл. Защитников Украины, 3, г. Харьков, Украина, 61001.

Bilenko Alexander – PhD, Associate Professor, National Guard, National Academy of Ukraine; Zahisnikiv Ukraine sq., 3, Kharkiv, Ukraine, 61001.

Pershina Ekaterina – counsel of Legal Services, National Guard, National Academy of Ukraine; Zahisnikiv Ukraine sq., 3, Kharkiv, Ukraine, 61001.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

УДК 574.502.7

*В. В. ВАМБОЛЬ, А. С. РАШКЕВИЧ, Н. В. РАШКЕВИЧ***АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ЗОНЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА**

Проведен анализ возможности организации дистанционного экологического мониторинга атмосферного воздуха в районах возникновения чрезвычайных ситуаций. Определены требования, имеющие важнейшее значение для проведения мониторинга в зоне чрезвычайных ситуаций техногенного характера, а именно, быстрейшее получение данных контроля и возможность отбора представительной пробы. Установлено, что дистанционный лазерный мониторинг наиболее полно удовлетворяет необходимым требованиям и позволяет решить при помощи одного комплекта аппаратуры двудейную задачу – оперативного мониторинга газовых примесей и аэрозолей в условиях ЧС.

Ключевые слова: атмосферный воздух, экологический мониторинг, чрезвычайная ситуация, дистанционное зондирование, лазер.

Проведено аналіз можливості організації дистанційного екологічного моніторингу атмосферного повітря в районах виникнення надзвичайних ситуацій. Визначено вимоги, що мають найважливіше значення для проведення моніторингу в зоні надзвичайних ситуацій техногенного характеру, а саме, швидкодія отримання даних контролю й можливість відбору представницької проби. Встановлено, що дистанційний лазерний моніторинг найбільш повно задовольняє необхідним вимогам і дозволяє вирішити за допомогою одного комплекту апаратури двосдине завдання – оперативного моніторингу газових домішок й аерозолів в умовах НС.

Ключові слова: атмосферне повітря, екологічний моніторинг, надзвичайна ситуація, дистанційне зондування, лазер.

The analysis of possibility of organization of ecological RMON of atmospheric air is conducted in the districts of origin of emergencies. Requirements having a major value for realization of monitoring in the zone of emergencies of technogenic character are certain, namely, fast-acting of receipt of control data and possibility of selection of representative test. In the zone of origin of emergency sampling can be produced only on a border by indignant and unindignant areas of atmosphere. Besides sampling to behave a traditional method to the noncommunicative volume round some point in space, that does not provide reliable information about current status of atmospheric air. Deciding this problem is possible the controlled from distance noncontact methods. It is set that laser RMON most full satisfies to the necessary requirements, because during realization of measuring a concentration усредняется along the route of sounding, and after the choice of a few directions the representatively "of test" increases repeatedly. Similarly the laser monitoring allows to decide one in two task through one complete set of apparatus – operative monitoring of gas admixtures and aerosols in the conditions of emergency.

Keywords: the atmosphere, environmental monitoring, emergency, remote sensing, laser.

Введение. Рассматривая чрезвычайные ситуации техногенного характера, вызванные производственной деятельностью человека следует сказать, что они, как правило, приводят к загрязнению окружающей среды. Статистика и информационные ресурсы позволяют утверждать, что большинство техногенных аварий сопровождаются процессами горения [1–4]. Для Украины наиболее характерными являются взрывы на складах боеприпасов, пожары на полигонах захоронения отходов, нефтехранилищах, складах ГСМ, аварии на химических предприятиях, на железнодорожных магистралях и т. п. В силу того, что такие чрезвычайные ситуации происходят на территориях, ограниченных размерами, в ограниченные промежутки времени, они характеризуются высокоинтенсивным энерговыделением и высокой интенсивностью образования молекулярных соединений, опасных в экологическом отношении. Высокотемпературные газы, обладающие огромной подъемной силой, при своем движении вызывают эффект засасывания воздушных масс из невозмущенных областей атмосферы и подготавливают условия для физико-химического взаимодействия сложных реагирующих систем. Следует учитывать и тот факт, что процесс горения, характеризуется поступлением в атмосферу в больших количествах сажи, моно- и диоксида углерода, и токсичных химических веществ, а также соединений, которые при взаимодействии с парами воды образуют кислоты. Именно эти факторы в своей совокупности обуславливают сильное отклонение экологических параметров околоземной среды от фоновых естественных значений.

Описанные выше процессы определяют снижение уровня экологической безопасности в районе возникновения и распространения чрезвычайной ситуации техногенного характера. Постоянно меняющаяся концентрация вредных веществ в окружающей среде, и прежде всего, в атмосферном воздухе, вызывает необходимость в разработке оперативных средств экологического мониторинга в очаге и зоне ЧС. В этом случае большой интерес представляют такие средства и системы, которые позволяют дистанционно, а также оперативно получать необходимую информацию.

Выше изложенными соображениями и определяется актуальность данного исследования, а именно: анализ возможности проведения дистанционного экологического мониторинга атмосферного воздуха в районах возникновения чрезвычайных ситуаций. Базируясь на данных мониторинга, возможна качественная и количественная оценка экологического состояния исследуемого района и прогнозирование возможных экологических последствий.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. В экологическом мониторинге выбор метода измерений и выбор средств измерений между собой неразрывно связаны. Для обеспечения достоверных результатов контроля данные измерений с применением средств измерения недостаточной точности или с использованием недостаточно совершенной методики измерений малоценны, т. к. неизбежно приводят к неправильным выводам и оценке экологической ситуации.

© В. В. Вамболь, А. С. Рашкевич, Н. В. Рашкевич. 2016

Качество экологического мониторинга атмосферного воздуха определяется требованиями к полноте данных, достоверности результатов, оперативности (быстродействия), т. е. степенью совершенства системы метрологического обеспечения мониторинга. Его эффективность зависит от значительного числа факторов.

Идентификация загрязнителей, содержащихся в атмосферном воздухе, является достаточно трудной задачей для аналитической химии из-за наличия сотни токсичных соединений различных классов. Это объясняется тем, что концентрации токсичных веществ, попадающих из различных источников в атмосферу, находятся на уровне следовых количеств или микропримесей [5]. Кроме того, лабораторные исследования – это достаточно длительный процесс [6]. Для выявления микропримесей в атмосферном воздухе, в частности полициклических соединений, в работе [7] предложено использовать цифровую обработку хроматографических сигналов с применением фильтра Бесселя. Однако, в условиях техногенных катастроф отбор проб является достаточно проблематичной задачей. При отборе проб для анализа степени загрязнения воздуха существенное влияние оказывает место расположения приборов, например высота, и возможность доступа к нему исследуемого потока свободного воздуха [8].

Так же необходимым является правильный выбор методов и средств регистрации данных, что влияет на качество самих данных и их дальнейший анализ [9].

К требованиям, имеющим важнейшее значение при мониторинге в зоне чрезвычайных ситуаций техногенного характера, следует отнести быстродействие получения данных контроля и отбор представительной пробы. К тому же в зоне возникновения чрезвычайной ситуации атмосферный воздух характеризуется наличием загрязнений в виде несвойственных ему молекул газов и аэрозолей. А, следовательно, традиционными средствами исследования состава атмосферного воздуха в зоне техногенной катастрофы не может быть выполнено ни одно из поставленных выше требований.

В связи с этим на первое место выходят дистанционные методы зондирования загрязнений воздуха. Для дистанционного зондирования возможно применение датчиков или других регистрирующих приборов, установленных на некотором расстоянии от места исследования. Результатом являются снимки, которые требуют дальнейшей обработки и расшифровки специальными математическими методами по определенным методикам. При этом отмечается высокая надежность такого исследования окружающей среды в случае использования космических снимков Landsat TM [10]. Однако такие снимки дорогостоящие и не решают поставленную задачу оперативно.

Особого внимания заслуживают лазерные методы, как методы дистанционного зондирования атмосферного воздуха [11].

С этих позиций следует рассмотреть реальные возможности применения традиционных и лазерных методов для проведения экологического мониторинга атмосферного воздуха в зоне чрезвычайной ситуации.

Цель и задачи исследования. Основная цель данной работы заключается в исследовании особенностей и реальной возможности применения лазерных методов

для проведения экологического мониторинга атмосферного воздуха в зоне чрезвычайной ситуации (ЧС).

Для достижения данной цели решены следующие задачи:

– анализ особенностей и возможности проведения оперативного и качественного экологического мониторинга атмосферного воздуха в зоне ЧС традиционными методами контроля;

– анализ реальной применимости лазерных методов в условиях ЧС для качественной и количественной оценки состояния атмосферного воздуха.

Материалы и методы анализа особенностей экологического мониторинга атмосферного воздуха в зоне возникновения ЧС. Традиционный мониторинг атмосферы, построенный на основе многозвенной технологической цепочки, включает отбор проб, их предварительную подготовку и химический анализ с использованием индивидуальных методик и реактивов на каждое вещество. Даже если не брать во внимание систематические погрешности, обусловленным несовершенством каждого из звеньев многозвенной цепи, следует указать на то обстоятельство, что в зоне техногенных катастроф мониторинг на основе проботбора полностью теряет смысл по своему назначению из-за невозможности отобрать представительную пробу.

В действительности в зоне возникновения чрезвычайной ситуации отбор проб может быть произведен лишь на границе возмущенной и невозмущенной областей атмосферы.

К тому же отбор проб традиционным методом относится к локализованному объему вокруг некоторой точки в пространстве с координатами $(x_0, y_0, z_0) \dots (x_n, y_n, z_n)$ содержание загрязняющих веществ опасных в экологическом отношении существенно отличается от их содержания в контрольной точке (x_0, y_0, z_0) .

Решить эту проблему можно лишь дистанционными бесконтактными методами на основе использования лазерной техники, когда концентрация усредняется вдоль трассы зондирования, а после выбора нескольких направлений представительность «пробы» многократно возрастает.

Основы лазерного мониторинга окружающей среды заложены в работах Э. Д. Хинкли, Р. Межериса, В. Е. Зуева, В. В. Зуева [11]. Их обобщение проведено в работах П. Л. Мейера, М. В. Сигриста, Б. И. Васильева, У. М. Маннуна.

Суть методики кратко состоит в следующем.

Загрязненная атмосфера содержит не присущие ей газы (двуокись серы – SO_2 , окислы азота – NO и NO_2 , углеводороды – HC и другие), продукты их реакции типа кислот и окислителей, а также твердые пылинки с размерами от 10^{-8} до 10^{-3} м (аэрозоли).

Молекулы газов – загрязнителей и аэрозолей поглощают и рассеивают лазерное излучение. На этом базируются методы лазерного мониторинга загрязнений в атмосфере.

Лазерный монитор (он же лидар) состоит из трех основных частей:

– передающее устройство (лазер, оптическая система);

– приемное устройство (телескоп, фильтры, поляризационный элемент, фотодетектор);

– управляющее устройство (блок контроля параметров оптического генератора, блок обработки, система регистрации и отображения).

Эффект учета лазерным лучом состава и концентраций загрязняющих веществ по большому множеству точек на нескольких трассах обеспечивает выполнение требований мониторинга в отношении достоверности результатов полноты данных.

Точность определения концентрации исследуемого газа зависит от разных параметров:

– погрешность регистрации лидарных сигналов (в реальных лидарных системах она не превышает 10 %);

– погрешность определения сечения поглощения газа, которое находится либо экспериментально, либо с помощью атласов спектральных данных HITRAN или GEISA;

– оптимально выбранные пары длин волн внутри линии поглощения (λ_{ON}) и вне ее (λ_{OFF}), для которых желательны большое дифференциальное сечение поглощения, маленький спектральный интервал $\Delta\lambda = \lambda_{ON} - \lambda_{OFF}$ и наличие малого числа мешающих газов;

– погрешность определения профиля аэрозольного рассеяния;

– характеристики детектора (прежде всего его чувствительность).

В настоящее время применяются лидары дифференциального поглощения с новыми алгоритмами, где используется не одна, а несколько пар длин волн. Такой подход сильно уменьшает негативное влияние аэрозоля на точность измерения концентрации методом дифференциального поглощения, особенно в нижней тропосфере.

Метод дифференциального поглощения основан на поглощении световой энергии молекулами исследуемого газа при совпадении частоты излучения лазера с частотой электронного или колебательно-вращательного перехода данных молекул. Для технической реализации этого метода необходимо осуществлять зондирование на двух частотах, одна из которых точно совпадает с резонансной частотой исследуемых молекул, а вторая – несколько от нее отличается (обычно разница длин волн составляет около 15 нм), что необходимо для учета влияния на результаты измерения аэрозольного и молекулярного рассеяния и поглощения посторонними веществами.

Метод оказывается эффективным в том случае, когда применяется режим временного накопления и определяется средняя концентрация исследуемого газа вдоль стационарной трассы, на одном конце которой располагается зондирующий лидар, а на другом – приемное устройство. Если приемник и излучатель располагаются рядом, то на другом конце трассы помещается отражатель.

На практике зондирование атмосферы с использованием метода дифференциального поглощения реализуется двумя способами: лидарным и трассовым [12]. В первом случае в качестве распределенного отражателя применяется атмосферный аэрозоль. В этом режиме возможно дистанционное измерение профилей газовых примесей с пространственным разрешением ΔR , определяемым в основном длительностью

лазерного импульса τ : $\Delta R = c \times R / 2$. Во втором – регистрируется отраженный или диффузионно отраженный от различных топографических объектов сигнал. При этом возможно определение с высокой чувствительностью усредненных по длине трассы зондирования концентраций газовых примесей по отдельным направлениям, соответствующему азимуту топомишеней.

Далее следует указать на то, что выполнение требований мониторинга в отношении быстродействия измерений (требуется 15...60 с на определение одного вещества) при использовании лазерных методов, позволяет получить данные о концентрациях большого количества ингредиентов (до 80 шт.) в короткие сроки. Таким образом, выполнение данного требования работает на выполнение другого требования к полноте данных.

Еще одна важная особенность лазерного мониторинга в зоне экологических катастроф становится понятной из следующих данных.

Динамический диапазон измеряемых концентраций при осуществлении экологического мониторинга традиционными средствами охватывает величины в пределах значений от 0,8 ПДК до 10 ПДК в соответствии установленными требованиями. В тоже время фактическая величина концентраций в зоне возникновения чрезвычайных ситуаций нередко достигает значений от $10 \cdot 10^5$ до $15 \cdot 10^5$ ПДК, что на несколько порядков выше максимальных концентраций доступных определению традиционными средствами.

Чувствительность лазерных методов при определении содержания загрязняющих веществ также существенно выше, чем у традиционных методов, и составляет от единицы до десятков ppb, т. е. от единицы до десятков загрязняющих веществ на миллиард молекул атмосферного воздуха приходится несколько молекул загрязняющих веществ. Используя разработанный макет лазерного монитора, авторы в исследовании [13] установили, что погрешность измерений концентраций газовых примесей составляла 1...10 %. При этом они считают, что существуют пути уменьшения этой погрешности.

Обсуждение результатов исследования особенностей и реальной возможности применения лазерных методов для проведения экологического мониторинга атмосферного воздуха в условиях ЧС. Использование традиционных методов оценки загрязнений атмосферного воздуха в зонах чрезвычайной ситуации приводит к дополнительному риску для персонала МЧС, задержке в принятии решений по ликвидации последствий в зоне чрезвычайной ситуации, принятию неверных решений и т. п.

Для лазерной техники нет принципиальной разницы при определении малых и высоких концентраций загрязняющих веществ, что обеспечивается за счет методического единства в процессе измерений концентраций, которые определяются избирательностью взаимодействия лазерного излучения с молекулами загрязняющих веществ, приходящего на определенной частоте, зависящей от типа (химической формулы) молекулы. Важно, что лазерный мониторинг принципиально позволяет решить двуединую задачу –

практически одновременную и оперативную диагностику загрязнений зоны чрезвычайной ситуации, как газами, так и аэрозолями.

Выводы. В результате проведенного исследования установлено:

1. Традиционные методы оценки загрязнений атмосферного воздуха в зонах чрезвычайной ситуации имеют ряд существенных недостатков. К ним относятся: значительная задержка при анализе проб воздуха, низкая чувствительность и высокая погрешность приборов, ограниченность применения существующих приборов и др.

2. Использование традиционных методов оценки загрязнений атмосферного воздуха в зонах чрезвычайной ситуации приводит к дополнительному риску для персонала, задействованного в ликвидации последствий в зоне чрезвычайной ситуации, возможности принятия неверных решений и т. п.

3. Дистанционный лазерный мониторинг позволяет решить при помощи одного комплекта аппаратуры двуединую задачу – оперативного мониторинга газовых примесей и аэрозолей в условиях ЧС.

Список литературы:

1. Foss-Smith, P. Understanding landfill fires [Electronic resource] / P. Foss-Smith. – Available at: <https://waste-management-world.com/a/understanding-landfill-fires>. – 01.08.2010.
2. Что происходит в Сватово: Онлайн-трансляция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://112.ua/glavnye-novosti/chto-proishodit-v-svatovo-onlayn-translyaciya-268554.html>. – 2.11.2015.
3. Крупный пожар произошел на свалке бытовых отходов в Хмельницком [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rian.com.ua/incidents/20160808/1014386129.html>. – 8.08.2016.
4. Крупный пожар на складе горюче-смазочных материалов в Бишкеке локализован [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itv.ru/news/2016-11-05/313408-kрупnyy-pozhar-na-sklade-goryuche-smazochnyh-materialov-v-bishkeke-lokalizovan> – 5.11.2016.
5. Особенности и методы анализа воздуха [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.anastasia-myskina.ru/ekologiya/metodyanaliza/55/4772-osobennosti-i-metody-analiza-vozduxa.htm>
6. Kumar, A. Air Quality [Text] / A. Kumar. – Sciyo, 2010. – 390 p. doi:10.5772/259
7. Дмитрик, В. П. Екологічний моніторинг мікродомішок поліциклічних сполук у повітряному середовищі за відсутності еталонів [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.01 / В. П. Дмитрик. – НТУУ КПІ. – Київ, 2006. – 42 с.
8. Guidelines for Ambient Air Quality Monitoring [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cpcb.nic.in/newitems/7.pdf>. – 9.06.2015.
9. Доронина, Ю. В. Повышение эффективности систем экологического мониторинга [Текст] / Ю. В. Доронина, В. О. Рябовая // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 4/6 (58). – С. 41–44. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/5592/5032>
10. Lim, H. S. Air Pollution Determination Using Remote Sensing Technique [Electronic resource] / H. S. Lim, M. Z. MatJafri, K. Abdullah, C. J. Wong // Advances in Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – doi: 10.5772/8319
11. Зуев, В. В. Лидарное зондирование газовых составляющих атмосферы методом дифференциального поглощения [Текст] / В. В. Зуев // Спектроскопические методы зондирования атмосферы. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 57–75.
12. Черногор, Л. Ф. Возможности применения лазерных исследований атмосферы зоны чрезвычайной ситуации [Текст] / Л. Ф. Черногор, А. С. Рашкевич // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 5/9 (53). – С. 10–14. Режим доступа: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/1282/1183>
13. Черногор, Л. Ф. Результаты трассового лазерного мониторинга загрязняющих газовых примесей в атмосфере [Текст] / Л. Ф. Черногор, А. С. Рашкевич // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 4/9 (52). – С. 57–62. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/1483/1381>

Bibliography (transliterated):

1. Foss-Smith, P. (01.08.2010). Understanding landfill fires. Available at: <https://waste-management-world.com/a/understanding-landfill-fires>.
2. Chto proiskhodit v Svatovo: Onlain-translyatsiya. (2.11.2015). Available at: <http://112.ua/glavnye-novosti/chto-proishodit-v-svatovo-onlayn-translyaciya-268554.html>.
3. Krupnyj pozhar proizoshel na svalke bytovykh othodov v Hmel'nicom (8.08.2016). Available at: <http://rian.com.ua/incidents/20160808/1014386129.html>.
4. Krupnyj pozhar na sklade gorjuche-smazochnyh materialov v Bishkeke lokalizovan (5.11.2016). Available at: <http://www.itv.ru/news/2016-11-05/313408-kрупnyy-pozhar-na-sklade-goryuche-smazochnyh-materialov-v-bishkeke-lokalizovan>
5. Osobennosti i metody analiza vozduha. Available at: <http://www.anastasia-myskina.ru/ekologiya/metodyanaliza/55/4772-osobennosti-i-metody-analiza-vozduxa.htm>
6. Kumar, A. (2010). Air Quality. Sciyo, 390. doi:10.5772/259
7. Dmytrykov, V. P. (2006). Ekolohichnyy monitoryng mikrodomishok politsyklіchnykh spoluk u povitryanomu seredovyshchi za vidсутnosti etaloniv. NTUU KPI, Kiev, 42.
8. Guidelines for Ambient Air Quality Monitoring. Available at: <http://www.cpcb.nic.in/newitems/7.pdf>.
9. Doronyna, Ju. V., Rjabovaja, V. O. (2012). Increase of efficiency systems of ecological monitoring. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(6(58)), 41–44. Available at: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/5592/5032>
10. Lim, H. S., MatJafri, M. Z., Abdullah, K., Wong, C. J. (2009). Air Pollution Determination Using Remote Sensing Technique. Advances in Geoscience and Remote Sensing. doi: 10.5772/8319
11. Zuev, V. V. (1985). Lidarnoe zondirovanie gazovykh sostavljajushih atmosfery metodom differencial'nogo pogloshhenija. Spektroskopicheskie metody zondirovanija atmosfery, Novosibirsk: Nauka, 57–75.
12. Chernogor, L. F., Rashkevich, A. S. (2011). Application of laser beams studies of the atmosphere of emergency. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(9(53)), 10–14. Available at: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/1282/1183>
13. Chernogor, L. F., Rashkevich, A. S. (2011). The results of enroute monitoring of the laser gas pollutant pollutants in the atmosphere. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(9(52)), 57–62. Available at: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/1483/1381>

Надійшла (received) 18. 11. 2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз особливостей екологічного моніторингу атмосферного повітря в зоні надзвичайних ситуацій техногенного характеру/ В. В. Вамболь, О. С. Рашкевич, Н. В. Рашкевич// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.85–89. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.

Анализ особенностей экологического мониторинга атмосферного воздуха в зоне чрезвычайных ситуаций техногенного характера/ В. В. Вамболь, А. С. Рашкевич, Н. В. Рашкевич// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.85–89. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-5459.

An analysis of features of the ecological monitoring of atmospheric air is in the zone of emergencies of technogenic character/ V. Vamol, A. Rashkevich, N. Rashkevich//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.85-89. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Вамболь Віола Владиславівна – доктор технічних наук, Національний університет цивільного захисту України, професор кафедри охорони праці та техногенно-екологічної безпеки; вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023; e-mail: violavambol@nuczu.edu.ua

Вамболь Виола Владиславівна – доктор технічних наук, Национальный университет гражданской защиты Украины, профессор кафедры охраны труда и техногенно-экологической безопасности; ул. Чернышевского, 94, м. Харьков, Украина, 61023; e-mail: violavambol@nuczu.edu.ua

Vambol Viola – Doctor of Technical Sciences, National University of Civil Protection of Ukraine, professor of Department of Labour Protection and Technogenic and Ecological Safety; Chernichevska str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023; e-mail: violavambol@nuczu.edu.ua

Рашкевич Олександр Сергійович – спеціаліст, 8-а державна пожежно-рятувальна частина м. Харкова, фахівець; пр-т Московський, 279, м. Харків, Україна, 61089; e-mail: rminav@nuczu.edu.ua

Рашкевич Александр Сергеевич – специалист, 8-я государственная пожарно-спасательная часть г. Харькова, специалист; пр-т Московский, 279, г. Харьков, Украина, 61089; e-mail: rminav@nuczu.edu.ua

Rashkevich Oleksandr – specialist, 8th State Fire and Rescue part of Kharkov, specialist; Moscow Ave., 279, Kharkiv, Ukraine, 61089; e-mail: rminav@nuczu.edu.ua

Рашкевич Ніна Владиславівна – Національний університет цивільного захисту України, завідувача лабораторією кафедри охорони праці та техногенно-екологічної безпеки; вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023; 1; e-mail: rminav@nuczu.edu.ua

Рашкевич Ніна Владиславівна – Национальный университет гражданской защиты Украины, заведующая лабораторией кафедры охраны труда и техногенно-экологической безопасности; ул. Чернышевского, 94, м. Харьков, Украина, 61023; e-mail: rminav@nuczu.edu.ua

Rashkevich Nina – National University of Civil Protection of Ukraine, Head of the laboratory of Department of Labour Protection and Technogenic and Ecological Safety; Chernichevska str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023; e-mail: rminav@nuczu.edu.ua

УДК 543.1; 535.016

Д. Г. РАДОВ, В. П. МАСЛОВ, Г. В. ДОРОЖИНСЬКИЙ

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДОДАТКОВОГО ОЧИЩЕННЯ ПИТНОЇ ВОДИ МЕТОДОМ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСУ

Вперше досліджено процес очищення вимороженої водопровідної води методом на основі поверхневого плазмонного резонансу. Оцінено ефективність кількаразового заморожування та введено коефіцієнт виморожуваності – критерій, що визначає сприятливість води певного типу до очищення від домішок заморожуванням. Запропоновано параметри для оцінки ефективності очищення води. Результати досліджень можуть бути використані для вдосконалення існуючих та створення нових методик контролю процесу очищення водопровідної води.

Ключові слова: водопровідна вода, очищення води, виморожування, поверхневий плазмонний резонанс.

Впервые исследован процесс очистки вимороженого водопроводной воды методом на основе поверхностного плазмонного резонанса. Оценена эффективность неоднократного замораживания и введено коэффициент виморожуваності – критерий, определяющий благоприятность воды типа к очистке от примесей замораживанием. Предложены параметры для оценки эффективности очистки воды. Результаты исследований могут быть использованы для совершенствования существующих и создания новых методик контроля процесса очистки водопроводной воды.

Ключевые слова: водопроводная вода, очистка воды, замораживание, поверхностный плазмонного резонанса.

For the first time the control for water purification process by developed method based on the phenomenon of surface plasmon resonance (SPR) was performed. It is shown that the development of alternative control method of purification of water based on the phenomenon of SPR is advanced direction which allows rapid analysis and can be less expensive than existing methods, has high sensitivity to low concentrations of analytes and high accuracy. For the first time a was study the effectiveness of cleaning water samples by rapid method using specialized equipment "Aqua-polaritons". Was proposed to apply the following parameters for water purification efficiency:

- the value of the number of cycles freezing – k;
- saturation point clickthrough water - KEO_k;
- the maximum derivative KEO - maxKEO;
- ratio of freezing – KV.

The research results can be used to improve existing and create new methods of process quality control of water purification.

Keywords: tap water, water purification, freezing, surface plasmon resonance.

© Д. Г. Радов, В. П. Маслов, Г. В. Дорожинський. 2016.

Вступ. Чисті джерела води мають життєво важливе значення для здоров'я населення, промисловості та сільського господарства. Понад мільярд людей у даний час користуються мізерними водними ресурсами і за прогнозами Всесвітньої Організації Здоров'я до 2025 року понад 3,5 млрд. людей може зіткнутися з проблемою нестачі води, що пов'язано зі збільшення забруднення навколишнього середовища і з деградацією прісноводних і прибережних водних екосистем. В більшості надзвичайних ситуацій забезпечення питною водою є невідкладним пріоритетом, і ефективним заходом реагування може стати очищення води [1].

Провідні тенденції розвитку аналітичних методів контролю очищення води потребують впровадження нових фізичних методів вимірювання, котрі ґрунтуються на останніх досягненнях в області науки та техніки. Основними вимогами до них є підвищення точності і чутливості вимірювання, зменшення часу вимірювання, зменшення об'ємів проб досліджуваних речовин.

Перспективним напрямом ефективного очищення води є розробка альтернативного методу контролю процесу очищення, який дозволить проводити експрес аналіз очищеної води і буде менш коштовним за існуючі методи, матиме високу точність вимірювання і високу чутливість до малих концентрацій шкідливих домішок у воді.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Основні задачі очищення питної води: інактивація бактерій та вірусів, очищення від твердих часток, що перебувають у вигляді колоїду, зменшення іонів важких металів та солей кальцію та магнію (переважно сульфати та карбонати), які визначають жорсткість води. Знезараження води здійснюється переважно термічною обробкою (кип'ятіння води за температур понад 85 °C протягом 5–30 хвилин кип'ятіння) [2] та УФ-обробкою. Від твердих частинок очищують воду ультра мембранними фільтрами, а від іонів важких металів – іонообмінними смолами та глинами [3]. Жорсткість водопровідної води зменшують дистиляцією. Якість дистильованої води за фізико-хімічними показниками має відповідати вимогам [4]. Альтернативним методом очистки води від іонів металів та нерозчинних солей є метод виморожування. Основними перевагами цього методу у порівнянні з дистиляцією є зменшений об'єм витрат водних ресурсів та електроенергії. До недоліків слід віднести неможливість очистки води від іонів солей, що добре дисоціюють. Тому метод виморожування дає меншу ступінь очистки води, ніж метод дистиляції. При цьому метод виморожування є перспективним для опріснення морської води, оскільки є більш енергоефективним і екологічним у порівнянні з існуючими дистиляційними методами опріснення.

Для оцінки якості води використовують чотири основні групи показників: фізичні, гідробіологічні, бактеріологічні, хімічні. До хімічних показників відносять встановлення активної реакції води, окислюваності, азотовмісних речовин, розчинених у воді газів, жорсткості та лужності, а також хлоридів, сульфатів, заліза, марганцю та інших елементів. До основних фізичних показників якості води відносять: температуру, запах, прозорість, водневий показник (рН). Бактеріологічні показни-

ки характеризують забрудненість води патогенними мікроорганізмами [5].

Аналіз публікацій показав, що основними методами контролю очищення води є: фотометричний, хроматографічний, спектральний, радіометричний, рентгеноспектральний, люмінесцентний та електрохімічні методи [6]. До електрохімічних методів аналізу належать: потенціометрія, вольтамперометрія, кондуктометрія та електрокоагуляція [7].

Основними недоліками існуючих методів визначення ступеню очищення води є потреба у пробі підготовки, велика вага та висока вартість аналітичного обладнання. Загальна витрата часу на контроль якості дистильованої води, наприклад, за всіма 14 показниками, згідно ГОСТ 670972, становить 11 годин робочого часу. Альтернативою може бути метод на основі явища поверхневого плазмонного резонансу (ППР), котрий дозволяє проводити експрес аналіз (тривалість виміру менше 10 сек.) та може бути менш коштовним за існуючі методи. Діагностуючі пристрої, що працюють на основі явища ППР, мають високу чутливість до малих концентрацій (0.01–2 мкг/кг) рідких і газоподібних речовин [8, 9] і характеризуються високою точністю вимірювань [10].

В роботі [11] застосовували метод на основі явища ППР для дослідження релаксаційних процесів показника заломлення (ПЗ) у воді різної природи після її збурення. Авторами було встановлено, що час релаксації залежить від природи води, але в роботі не досліджувався вплив на цей параметр процесу очищення води.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення можливості контролю процесу очищення водопровідної води виморожуванням за допомогою методу ППР.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

1. Виконати контроль зміни ПЗ водопровідної води методом ППР при її додатковому очищенні багаточисельним виморожуванням.
2. Провести чисельний аналіз залежності зміни ПЗ водопровідної води від кількості циклів виморожування при її очистці.
3. За результатами чисельного аналізу визначити параметри для оцінки ефективності додаткового очищення водопровідної води виморожуванням.

Матеріали та методи дослідження процесу додаткового очищення питної води методом поверхневого плазмонного резонансу. Досліджувані матеріали:

1. Вода водопровідна (Дніпровська водопровідна станція, м. Київ);
2. Вода дистильована (провідність 3 ± 2 мкСм/см при 20 °C).

Методичною основою виконання комплексних досліджень є: чисельний аналіз залежностей різниці ПЗ зразків води дистильованої та водопровідної від кількості циклів її виморожування, значення ПЗ вимірювали приладом «Аква-Поляритон».

Малогабаритний спеціалізований рефрактометр «Аква-Поляритон» заснований на явищі ППР [12]. Явище ППР – це порушення повного внутрішнього відбиття (ПВВ) монохроматичного р-поляризованого світла на межі двох середовищ з різними ПЗ: скляної призми та досліджуваної речовини (аналіту) між

якими розташована тонка (10...100 нм) металева плівка. Обертаючи призму, змінюють кут падіння світла на її робочу грань з металевою плівкою і одночасно вимірюють характеристику відбиття – залежність нормованої інтенсивності відбитого світла (коефіцієнта відбиття R) від кута його падіння (рис. 1).

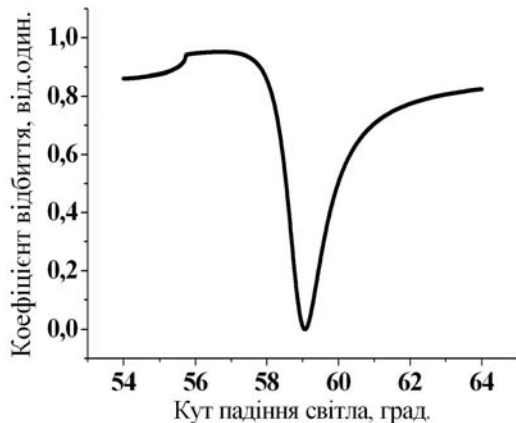


Рис. 1 – Залежність нормованої інтенсивності відбитого світла (коефіцієнта відбиття) від кута його падіння

Вимірний зсув кутового положення мінімуму характеристики відбиття визначає абсолютне значення та відносну зміну ПЗ аналіту.

Об'єктом дослідження є процес очищення води методом виморожування.

Предметом дослідження є закономірності показника заломлення водопровідної води від кількості циклів її виморожування.

Методика дослідження:

Багатоциклічне виморожування виконували наступним чином. Водопровідну воду розливали у 20 пластикових пробірок, об'ємом по 15 мл кожна. Потім пробірки з водою витримували у морозильній камері холодильника при температурі $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 2 годин. Тривалість витримки була визначена емпірично для того, щоб замерзло лише $40\pm 10\%$ від усього об'єму води у пробірках. Після чого зливали не заморожену воду у окрему ємність, а заморожену воду доводили до стану рідкої фази і повторювали цикл. Таким чином було отримано 4 зразки по 25 мл вимороженої води і 4 зразки води, що не замерзла, у зв'язку з вмістом більшої кількості домішок у ній та, як наслідок, меншою температурою кристалізації.

Досліджувані зразки об'ємом по 2 мл по чергово прокачували через двоканальну вимірювальну кювету спеціалізованого рефрактометра перистальтичним насосом. Через один канал прокачували лише дистильовану воду (для порівняння), а через другий канал – по чергово дистильовану воду і водопровідну: зразки вимороженої води та води, котра не замерзла. Для зменшення похибки вимірювання ПЗ викликані зміною тиску у вимірювальній кюветі прокачували аналіти зі швидкістю 20 мкл/хв., а для мінімізації температурної похибки рефрактометр і ємності зі зразками води розміщували в термобоксі при температурі робочої камери $+20\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результати дослідження процесу додаткового очищення питної води методом поверхневого плазмонного резонансу. В результаті проведених досліджень було встановлено, що процес вимороження водопровідної води призводить до зменшення різниці між показниками заломлення водопровідної води та дистильованої води (табл. 1).

Таблиця 1 – Виміряні показники заломлення зразків води

№ п.п.	Цикл вимороження	Різниця у показниках заломлення еталону та вимороженої води $dN_n \cdot 10^{-6}$	Різниця у показниках заломлення еталону та вода, що не замерзла $dN_n \cdot 10^{-6}$
1	без виморож.	-	145 ± 5
2	1	108 ± 5	178 ± 5
3	2	94 ± 5	137 ± 5
4	3	84 ± 5	108 ± 5
5	4	80 ± 5	88 ± 5

В табл. 1 наведено виміряні значення різниці у показниках заломлення дистильованої води і водопровідної води до та після кожного циклу вимороження. Для 4-го циклу виморожування різниця у показниках заломлення еталону та вимороженої води ($8 \cdot 10^{-6}$) наближається до величини роздільної здатності спеціалізованого рефрактометра ($5 \cdot 10^{-6}$) та похибки вимірювання показника заломлення.

Відносна похибка при цьому становить 7 %. Експериментальні залежності відносної зміни ПЗ водопровідної води від кількості циклів її заморожування: для вимороженої води та води, що не замерзла (рис. 2).

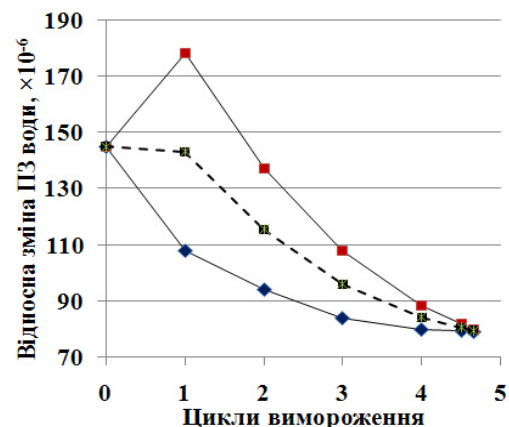


Рис. 2 – Залежність відносної зміни ПЗ водопровідної води від кількості циклів її заморожування: для вимороженої води (сині ромби), не замерзлої води (червоні квадрати) та еквідистантних точок (чорні квадрати)

Залежність відносної зміни ПЗ для вимороженої води від кількості циклів вимороження має спадаючий експоненційний характер і добре апроксимується функцією (1) з коефіцієнтом узгодження $R^2=0,99831$.

$$y_1(x) = y_{01} + A_1 \cdot \exp(-x/B_1), \quad (1)$$

де $y_{01}=76,96 \pm 2,11$; $A_1=67,79 \pm 2,4$; $B_1=1,35 \pm 0,13$.

Для визначення параметрів ефективності процесу очищення води було запропоновано наступне:

а) проаналізувати зміну еквідистантної точки на графіку залежності відносної зміни ПЗ води від кількості циклів виморожування;

б) проаналізувати зміну різниці між змінами ПЗ для незамерзлої та вимороженої води, котра визначається як $\Delta N_{нв_i} = dN_{н_i} + dN_{в_i}$.

Еквідистантна точка є серединою відрізка, який сполучає значення ПЗ вимороженої і незамерзлої води для певного циклу вимороження (рис.2). Значення ПЗ в еквідистантній точці можна визначити за простим виразом: $N_{екv_i} = (dN_{н_i} + dN_{в_i}) \cdot 0,5$ та ввести коефіцієнт виморожуваності, котрий визначатиме сприйнятливості води до очищення виморожуванням (2).

$$KB = (N_{екv_1} / dN_{н_0}) \quad (2)$$

де, KB – коефіцієнт вимороження; $N_{екv_1}$ – значення ПЗ еквідистантної точки після 1-го вимороження; $dN_{н_0}$ – різниця у ПЗ водопровідної та дистильованої води.

Чисельний аналіз показав, що залежність $\Delta N_{нв}$ від кількості циклів виморожування має експоненційний характер (рис. 3, б) та апроксимується з високим коефіцієнтом узгодження ($R^2 = 0,99976$) функцією (3).

$$y_2(x) = y_{02} + A_2 \cdot \exp(-x/B_2), \quad (3)$$

де $y_{02} = -36,512 \pm 9,06$; $A_2 = 142,22 \pm 6,7$; $B_2 = 3,48 \pm 0,44$.

Було розраховано значення кількості циклів виморожування для $\Delta N_{нв_k} = 0$, а саме $k = 4,729$. Це означає, що після п'яти циклів вимороження подальші цикли виморожування недоцільні як не ефективні.

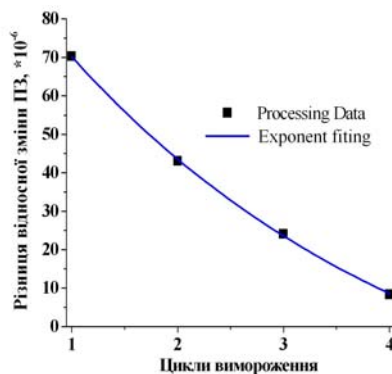


Рис. 3 – Результати чисельного аналізу залежності від кількості циклів заморожування різниці відносної зміни ПЗ води незамерзлої та вимороженої.

За визначеними $\Delta N_{нв_i}$ для $i > 4$ було розраховано значення $dN_{н_i}$ через величини $dN_{в_i}$, отримані з функції (3), що дозволило добувати залежність відносної зміни ПЗ води від циклів виморожування (рис. 2).

Обговорення результатів дослідження процесу додаткового очищення питної води методом поверхневого плазмонного резонансу. Критерії визначення головного параметру ефективності очищення наступні:

а) характерний параметр визначає ефективність очищення води методом виморожування, тобто наскільки цей метод є ефективним для певного типу вихідної води. Тип води при цьому визначається характером та кількістю домішок.

б) параметр має бути безрозмірною величиною – коефіцієнтом та мати область допустимих значень від 0 до 1.

Виходячи з вище наведених критеріїв було запропоновано формулу (4) для визначення коефіцієнту ефективності очищення (КЕО) води.

$$КЕО_i = 1 - (N_{екv_i} / dN_{н_0}) \quad (4)$$

де, $N_{екv_i}$ – значення ПЗ в еквідистантній точці для i-го циклу виморожування;

$dN_{н_0}$ – різниця у показниках заломлення водопровідної та дистильованої вода.

Для побудови залежності КЕО від кількості циклів вимороження (рис. 4) необхідно визначити «точку насичення», тобто значення $КЕО_k$ для якого $\Delta N_{нв_k} = 0$, що визначатиме кінець очищення.

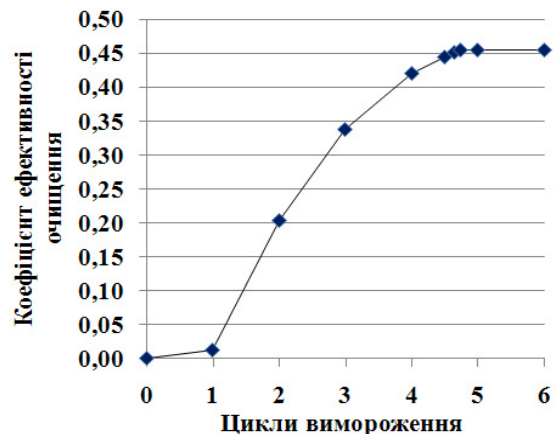


Рис. 4 – Розраховані залежності коефіцієнту ефективності очищення води від кількості циклів її заморожування

Для раніше визначеного значення $k = 4,729$ за функції (1) та (3) розраховуємо $N_{екv_k}$. За допомогою формули (4) було розраховано $КЕО_k = 0,455$. Для циклів вимороження $i > k$ значення $КЕО_i$ залишаються незмінним. Аналіз першої похідної залежності КЕО показав, що найбільший ефект від виморожування маємо на 2-му циклі (рис. 5).

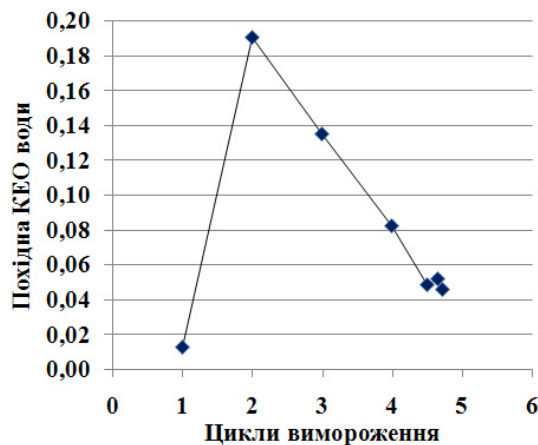


Рис. 5 – Розраховані залежності похідного коефіцієнту ефективності очищення по циклам виморожування

При цьому значення КЕО становить майже половину ($КЕО_i = 0,2$) від максимального значення $КЕО_k = 0,455$. Варто звернути увагу на значення максимуму похідної КЕО ($maxКЕО$), яке визначатиме швидкість перерозподілу домішок у воді при виморожуванні, що також визначає ефективність.

Таким чином для оцінки ефективності очищення води можна запропонувати наступні параметри, а саме:

- значення кількості циклів виморожування – k ;
- максимум коефіцієнту ефективності очищення води – $КЕО_k$;
- максимум похідної КЕО – $maxКЕО$;
- коефіцієнт виморожуваності – $КВ$.

Для досліджуваного зразку водопровідної води (Дніпровська водопровідна станція, м. Київ) маємо наступні значення параметрів ефективності очищення (табл. 2).

Таблиця 2 – Загальні параметри ефективності очищення води

Параметр	k	$КЕО_k$	$maxКЕО$	$КВ$
Значення	4,7290	0,4551	0,1903	0,9873

Отже, для очищення даного зразку водопровідної води від домішок найбільш оптимально проводити 2–4 циклів виморожування.

Висновки

1. Розробка методу контролю процесу очищення води на основі явища ППР є актуальним напрямком, який дозволяє проводити експрес аналіз і може бути менш коштовним за існуючі методи, має високу чутливість до малих концентрацій аналітів і високу точність вимірювань.

2. Вперше проведено дослідження ефективності очищення виморожуванням зразків водопровідної води експрес методом з використанням спеціалізованого обладнання «Аква-Поляритон» та методики виконання експерименту. Запропоновано застосовувати наступні параметри ефективності очищення води:

- значення кількості циклів виморожування – k ;
- точка насичення коефіцієнту ефективності очищення води – $КЕО_k$;
- максимум похідної КЕО – $maxКЕО$;
- коефіцієнт виморожуваності – $КВ$.

Список літератури:

- Water safety and quality [Electronic resource]. – Available at: http://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/en/
- Guidelines for drinking-water quality, fourth edition [Electronic resource]. – Available at: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf
- Клименко, Т. В. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов [Электронный ресурс] / Т. В. Клименко // Современные научные исследования и инновации. – 2013. – № 11. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2013/11/28484>
- ГОСТ 6709-72. Вода дистиллированная. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/508/>
- Показники якості води [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.novaecologia.org/voecos-1403-1.html>
- Луговской, А. Ф. Оценка методов обеззараживания воды [Текст] / А. Ф. Луговской, А. В. Мовчанюк, И. А. Гришко // Вестник НТУУ "КПИ". – 2007. – № 52. – С. 103–112.
- Pan, C. Dynamics of Chromium (VI) Removal from Drinking Water by Iron Electrocoagulation [Text] / C. Pan, L. D. Troyer, J. G. Catalano, D. E. Giammar // Environmental Science & Technology. – 2016. – № 50 (24). – P. 13502–13510. doi: [10.1021/acs.est.6b03637](https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03637)
- Shalabney, A. Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors [Text] / A. Shalabney, I. Abdulhalim // Laser & Photonics Reviews. – 2011. – № 5 (4). – P. 571–606. doi: [10.1002/lpor.201000009](https://doi.org/10.1002/lpor.201000009)
- Дорожинский, Г. В. Обнаружение паров метанола методом поверхностного плазмонного резонанса [Текст] / Г. В. Дорожинский, М. В. Лобанов, В. П. Маслов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 4/5 (76). – С. 4–7. doi: [10.15587/1729-4061.2015.47079](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47079)
- Дорожинський, Г. В. Сенсорні прилади на основі поверхневого плазмонного резонансу [Текст] / Г. В. Дорожинський, В. П. Маслов, Ю. В. Ушенін. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 264 с.
- Маслюк, Л. Н. Использование спектрометра плазмонного резонанса для исследования процесса структурирования воды [Текст] / Л. Н. Маслюк, А. В. Самойлов, Ю. В. Ушенин, Р. В. Христосенко // Актуальные проблемы транспортной медицины. – 2008. – № 4 (14). – С. 90–95.
- Войтович, И. Д. Сенсоры на основе плазмонного резонанса: принципы, технологии, применения [Текст] / И. Д. Войтович, В. М. Корсунский. – Киев: Сталь, 2011. – 534 с.

Bibliography (transliterated):

- Water safety and quality. Available at: http://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/en/
- Guidelines for drinking-water quality, fourth edition. Available at: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf
- Klimenko, T. V. (2013). Ochistka stochnyh vod ot ionov tzhazhelyh metallov. Sovremennyye nauchnye issledovaniya i innovacii, 11. Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2013/11/28484>
- GOST 6709-72. Voda distillirovannaja. Tehnicheskie uslovija. Available at: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/508/>
- Pokazny'ky' yakosti vody. Available at: <http://www.novaecologia.org/voecos-1403-1.html>
- Luhovskoj, A. F., Movchanjuk, A. B., Grishko, I. A. (2007). Ocenka metodov obezrazazhyvaniya vody. Vestnik NTUU " KPI ", 52, 103–112.
- Pan, C., Troyer, L. D., Catalano, J. G., Giammar, D. E. (2016). Dynamics of Chromium(VI) Removal from Drinking Water by Iron Electrocoagulation. Environmental Science & Technology, 50 (24), 13502–13510. doi: [10.1021/acs.est.6b03637](https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03637)
- Shalabney, A., Abdulhalim, I. (2011). Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors. Laser & Photonics Reviews, 5 (4), 571–606. doi: [10.1002/lpor.201000009](https://doi.org/10.1002/lpor.201000009)
- Dorozhinskij, G. V., Lobanov, M. V., Maslov, V. P. (2015). Detection of methanol vapor by surface plasmon resonance method. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(5(76)), 4. doi: [10.15587/1729-4061.2015.47079](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47079)
- Dorozinsky, G. V., Maslov, V. P., Ushenin, Yu. V. (2016). Sensorni prylady na osnovi poverxneвого plazmonного rezonansu. Kyiv: NTUU «KPI», 264.
- Masljuk, L. N., Samojlov, A. V., Ushenin, Ju. V., Hristosenko, R. V. (2008). Ispolzovanie spektrometra plazmonного rezonansu

12. dlya issledovaniya processa strukturirovaniya vody. Aktual'nye problemy transportnoj mediciny, 4 (14), 90–95.
12. Vojtovyich, I. D., Korsunskij, V. M. (2011). Sensory na osnove

plazmonnogo rezonansa: principy, tehnologii, pryimeneniya. Kyiv: Stal, 534.

Надійшла (received) 10.12.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження процесу додаткового очищення питної води методом поверхневого плазмонного резонансу / Д. Г. Радов, В. П. Маслов, Г. В. Дорожинский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.89–94. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Исследование процесса дополнительной очистки питьевой воды методом поверхностного плазмонного резонанса/ Д. Г. Радов, В. П. Маслов, Г. В. Дорожинский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.89–94. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Investigation of further purification of drinking water by surface plasmon resonance/ D. Radov, V. Maslov, G. Dorozinsky //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.89–94. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Радов Денис Георгійович – працівник ДК «Укроборонпром»; вул. Дегтярівська, 36, м. Київ, Україна, 04119; e-mail: Denis.Radov@ukroboronprom.com.

Маслов Володимир Петрович – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу фізико-технологічних основ сенсорного матеріалознавства, Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарєва НАН України; пр. Науки, 41, м. Київ, Україна, 03028; e-mail: vpmaslov@ukr.net.

Дорожинський Гліб Вячеславович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу фізико-технологічних основ сенсорного матеріалознавства, Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарєва НАН України; пр. Науки, 41, м. Київ, Україна, 03028; e-mail: gvdorozinsky@ukr.net.

Радов Денис Георгиевич – работник ГК «Укроборонпром»; ул. Дегтярёвская, 36, г. Киев, Украина, 04119; e-mail: Denis.Radov@ukroboronprom.com.

Маслов Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом физико-технологических основ сенсорного материаловедения, Институт физики полупроводников имени В. Е. Лашкарёва НАН; пр. Науки, 41, г. Киев, Украина, 03028; e-mail: vpmaslov@ukr.net.

Дорожинский Глеб Вячеславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела физико-технологических основ сенсорного материаловедения, Институт физики полупроводников имени В. Е. Лашкарёва НАН; пр. Науки, 41, г. Киев, Украина, 03028; e-mail: gvdorozinsky@ukr.net.

Radov Denys – eng. SC “Ukroboronprom”; 36 Dehtiarivska str., Kyiv, Ukraine, 04119; e-mail: Denis.Radov@ukroboronprom.com.

Maslov Volodymyr – Dr.Sc., Prof., head of department of physical and technological bases of sensory materials, V. Ye. Lashkaryov Institute of semiconductor physics NAS of Ukraine; 41 pr. Nauky, Kyiv, Ukraine, 03028; e-mail: vpmaslov@ukr.net.

Dorozinsky Glib – PhD, senior researcher of department of physical and technological bases of sensory materials, V. Ye. Lashkaryov Institute of semiconductor physics NAS of Ukraine; 41 pr. Nauky, Kyiv, Ukraine, 03028; e-mail: gvdorozinsky@ukr.net.

УДК 338.314.017

О. В. ЄГОРОВА

ВПЛИВ ПЕРЕРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ЯКІСТЬ ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА РЕГІОНУ

Важливим компонентом геосистем, що формуються в умовах урбанізації, є ґрунти, що забезпечують їх продуктивність і біорізноманіття.

В результаті розвитку господарської діяльності людини відбувається забруднення, зміна складу ґрунту і навіть його знищення. Морфологічний та хімічний склад побутових та промислових відходів суттєво впливають на забруднення ґрунту в місцях їх збору і утилізації. Ступінь і характер впливу відходів переробної промисловості на якість ґрунтового покриву вивчалися в районі розташування полів фільтрації ВАТ «Смілянський цукровий завод». Встановлено підвищення кислотності ґрунту та зміна його складу. Результати свідчать про необхідність модернізації цього полігону та проведення регенераційних робіт з метою відновлення екологічної безпеки в регіоні.

Ключові слова: поля фільтрації, вплив, ґрунт, відходи, екологічна безпека.

Важным компонентом геосистем, формирующихся в условиях урбанизации, является почва, которая обеспечивает их производительность и биоразнообразие. В результате развития хозяйственной деятельности человека происходит загрязнение, изменение состава почвы и даже уничтожения. Морфологический и химический состав бытовых и промышленных отходов существенно влияют на загрязнение почвы в местах их сбора и утилизации. Степень и характер влияния отходов перерабатывающей промышленности на качество почвенного покрова изучались в районе расположения полей фильтрации ОАО «Смелянский сахарный завод». Установлено повышение кислотности почвы и изменение ее состава. Результаты свидетельствуют о необходимости модернизации этого полигона и проведения регенерационных работ с целью восстановления экологической безопасности в регионе.

Ключевые слова: поля фильтрации, влияние, почва, отходы, экологическая безопасность.

An important component of geosystems is the soil. In urban conditions, it provides their productivity and biodiversity. As a result of the development of human activities pollutes and changing composition of the soil. Morphological and chemical composition of household and industrial waste a significant effect on soil pollution. The extent and nature of the impact of processing industry wastes on soil quality have been studied in the area of the location of the filtration fields of "Smela sugar mill" public corporation are considered. Increase of acidity of the soil and the change in its composition. The results indicate the need for modernization of the site and of the regeneration work in order to restore the ecological security in the region. For the first time we have conducted comprehensive studies of soil pollution level near the filtering fields. An analysis of studies suggests industrial transformation of the chemical composition. Technological solutions to improve the ecological status of soil cover. Using the developed measures in practice will reduce the anthropogenic impact on the environment and to ensure a better environment in the region.

Keywords: filtration fields, impact, soil, waste, environmental safety.

Вступ. Сучасна екологічна ситуація в Україні знаходиться в кризовому стані. Щороку в господарський обіг в Україні залучається понад 1 млрд. т природних речовин. За існуючих обсягів первинного ресурсоспоживання і високої концентрації промисловості, для більшості галузей якої є характерними багатотоннажні технологічні процеси, утворюється величезна кількість залишкових продуктів як виробництва – технологічних відходів, так і споживання – побутових відходів. Накопичення подібних продуктів у місцях їх утворення і наступного зберігання спричиняє значні екологічні ризики для довкілля, особливо для таких його складових як атмосферне повітря, поверхневі і підземні природні води, ґрунти, рослинний покрив тощо.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. В наукових працях розглядаються різні аспекти впливу підприємств харчової промисловості на якість природного середовища [1–5]. Роботи вчених досліджують і характеризують різні напрями забезпечення охорони природи від впливу підприємств, проте в роботах здебільше досліджуються загально-теоретичні аспекти цієї проблеми [6–8]. Нажаль, дослідження суто теоретичних питань не здатне вирішити проблем негативного впливу на природне середовище. Отже, з метою виявлення порушень та попередження негативного впливу підприємства на довкілля та ресурсну базу доцільно встановити основні види впливу підприємств харчової промисловості на якість природного середовища [9, 10].

Серйозну небезпеку для навколишнього середовища в районах розташування заводів по виробництву лимонної кислоти представляють поля фільтрації, оскільки саме туди складається основна частина відходів виробництва, негативно впливаючи на еко-

логічну безпеку регіонів [11]. Окрім забруднення повітряного середовища, поля фільтрації призводять до підвищення мінералізації та забруднення як підземних вод так і відкритих водойм. На поля фільтрації відводять основні відходи виробництва – фільтраційні осадки та міцеліальна біомаса, проблема утилізації яких є найпоширенішою.

Особливо, це питання важливе для ґрунтів, оскільки, вони є головним накопичувачем природних та техногенних надходжень хімічних елементів та сполук з атмосфери, гідросфери та безпосереднього навантаження на педосферу. Вміст хімічних елементів в техногенно-трансформованому ґрунті призводить до комплексної зміни його біогеохімічних та екологічних параметрів. Незважаючи на те, що ґрунт володіє властивістю до біологічного самоочищення, тобто здатен розщеплювати і мінералізувати відходи, внаслідок фізичного, хімічного, механічного перевантаження цей механізм порушується, що призводить до деградації ґрунту. Найгірше ґрунти справляються з токсичними хімічними елементами, важкими металами, які накопичуються поблизу промислових джерел викидів. Потрапивши в ґрунтові води, ці елементи досить швидко розповсюджуються по площі всього ґрунтового покриву. В свою чергу деякі мікроорганізми ґрунтів можуть перетворювати солі важких металів, які потрапили в ґрунт, в інші форми – розчинні або нерозчинні, і тим самим впливати на порушення трофічних зв'язків, іноді до повного усунення з ґрунту безхребетних. Також викиди в атмосферу активно осаджуються на поверхні ґрунту і внаслідок цього на поверхні та у верхній зоні ґрунтів (до глибини 0,1–0,3 м) формуються високі концентрації металів та радіонуклідів, які негативно впливають на довкілля і безпеку життєдіяльності людей.

© О. В. Єгорова. 2016

На даний час оцінка поточної екологічної ситуації та екологічного стану довкілля здійснюється за екологічними показниками стану і структури геоеко-систем, можливості їх до самовідновлення, характеристики природного і антропогенного впливу техногенних об'єктів на природні геоекосистеми, які необхідно порівняти з нормативними. Ця процедура виконується згідно міжнародних і державних стандартів серії ISO 14000 на рівні державних установ, підприємств, галузі і території.

Дослідження впливу на довкілля відходів, що накопичуються на полях фільтрації було проведено на прикладі ВАТ «Смілянський цукровий завод».

Ціль та задачі дослідження. Метою досліджень була оцінка існуючих рівнів забруднення ґрунтового покриву в районі полів фільтрації ППО ВАТ «Смілянський цукровий комбінат». Для реалізації поставленої мети передбачалось оцінити ступінь забрудненості ґрунтів за кислотно-основними та буферним властивостям.

ППО ВАТ «Смілянський цукровий комбінат» розташований в південно-західній частині міста Сміли, на лівому березі річки Сріблянка за 1 км від місця її впадіння в річку Тясмин. Територія обмежена з південно-західної сторони територією Смілянського молокозаводу, з північно-східної сторони територією Смілянського машинобудівного заводу, з усіх інших сторін житлова забудова. Промислова частина складається з цукрового заводу та заводу виробництва лимонної кислоти. Основною сировиною для виробництва лимонної кислоти є відходи цукрового виробництва, котрі придатні для переробки протягом двох–трьох місяців.

Район заводу виробництва лимонної кислоти характеризується насипним ґрунтом, який підстиляється мулистими-піщаними відкладами та мулистими пісками, нижче залягають мілкі піски. Ґрунтові води пов'язані з річкою Сріблянка. В паводок ґрунти промислового майданчику повністю зневоднені. Основна частина твердих відходів складається на полях фільтрації площею 78,34 гектар.

Поблизу цукрового заводу, за даними центру Облдержзодючоті, в ґрунтах у зоні функціонування заводу склався негативний баланс поживних речовин, поширилась дегуміфікація, значно збільшилися площі середньо- та сильнокислих ґрунтів, особливо в західній частині розташування заводу. Велике занепокоєння викликає інтенсивне закислення ґрунтів поблизу полів фільтрації, що в ряді випадків формує проблеми для аборигенних компонентів всієї екосистеми. Основними деградаційними процесами є вітрова та водна ерозія, підкислення та засолення ґрунтів. Найбільше проявів техногенного забруднення спостерігається в районах складування відходів (дефекатів) та в районах транспортування та розміщення буртів буряків цукрових.

З метою оцінки рівня забруднення ґрунтового покриву в рамках роботи виконаний аналіз відібраних у районі виробництва проб ґрунтів. Пробні майданчи-

ки ґрунтового-геохімічної зйомки були закладені з урахуванням напрямів поверхневого стоку від джерел впливу на ґрунтовий покрив по лініях зниження в рельєфі до руслах р. Сріблянка.

Відбір проб ґрунтів був проведений згідно ГОСТ 17.4.4.02-84 «Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа».

На пробних майданчиках розміром 25 м² методом конверта відбиралися точкові проби з глибини 0–0,3 м. Шляхом змішування точкових проб, відібраних на одній площадці, складалася об'єднана проба загальною масою не менше 1 кг. Всього було відібрано 5 проб ґрунтів (рис. 1). Для кожної відібраної проби ґрунтів визначались наступні показники: валовий вміст нітратів, вміст гумусу, кислотність (обмінна та гідролітична) та буферна здатність ґрунту.

Результати дослідження зразків наведені в табл. 3, 4. Криві для визначення кислотно-основної буферності ґрунту досліджуваних зразків представлені на рис. 2–5. Оцінка ґрунтів за ступенем кислотності проводилась відповідно до табл. 1. Оцінку кислотно-основної буферності досліджуваних зразків ґрунту проводили відповідно до табл. 2. При оцінці рівня забруднення ґрунтів використовувалася наступна шкала оцінки, прийнята на основі аналізу опублікованого досвіду у цій галузі (ГОСТ 17.4.3.06-86):

1) незабруднені – вміст хімічних речовин не перевищує природний фон;

2) слабкозабруднені – вміст хімічних речовин перевищує природний фон (коефіцієнт концентрації відносно фону ($K_{\text{фон}} \leq 2$), не перевищує ГДК;

3) середньозабруднені – вміст хімічних речовин перевищує природний фон ($K_{\text{фон}} > 2$), перевищує ГДК до 2-х разів;

4) сильнозабруднені – вміст хімічних речовин не перевищує ГДК більш, ніж в 2 рази.

Таблиця 1 – Оцінка ґрунтів за ступенем кислотності

Величина pH (KCl)	Ступень кислотності
Менше 4,0	Дуже сильно кислі
4,1-4,5	Сильно кислі
4,6-5,0	Середньо кислі
5,1-5,5	Слабко кислі
5,6-6,0	Близькі до нейтральної
6,1-7,0	Нейтральні

Таблиця 2 – Шкала оцінки кислотно-основної буферності ґрунту

Група ґрунтів	Показник буферності	Ступінь буферної здатності (ВБЗ), % в інтервалах	
		кислотному	лужному
I	Дуже низька	<7,7	–
II	Сильно низька	7,6–20	<10
III	Низька	2,1–40	11–30
IV	Середня	41–60	31–50
V	Висока	61–80	51–70
VI	Дуже висока	>81	>71



Рис. 1 – Схема відбору проб ґрунтів: Грунт 1 – 49°13'25.8"N 31°51'35.7"E; Грунт 2 – 49°13'20.9"N 31°51'43.2"E; Грунт 3 – 49°13'17.2"N 31°51'18.1"E; Грунт 4 – 49°13'13.0"N 31°51'35.5"E; Грунт 5 – 49°14'06.6"N 31°50'56.7"E.

Таблиця 3 – Результати визначення кислотно-основних властивостей ґрунтів

Ділянка	pH вод.	pH КСІ	Гідролітична кислотність, ммоль в 100г ґрунту	Обмінна кислотність ммоль в 100г ґрунту	Визначення суми поглинутих основ ммоль в 100г ґрунту	Вміст гумусу, %
Грунт 1 (0,2 км)	6,05	6,35	0,83	2,49	29,6	1,5
Грунт 2 (0,3 км)	6,30	5,85	1,43	2,47	18,3	1,6
Грунт 3 (0,5 км)	6,35	5,05	0,75	2,52	15,1	1,2
Грунт 4 (0,5 км)	6,70	5,15	0,60	2,49	17,9	1,3
Грунт 5 (фоновий, 1,5 км)	7,05	6,85	0,39	3,15	23,5	1,5

Таблиця 4 – Буферні властивості ґрунтів

Ділянка	Буферна здатність, %		Показник буферності		VB _к +VB _л	Кр
	VB _л	VB _к	лужному	кислому		
Грунт 1	53,4	51,5	Висока	Середня	104,9	1,0
Грунт 2	45,3	57,6	Середня	Середня	102,9	1,3
Грунт 3	50,1	52,5	Середня	Середня	102,6	1,0
Грунт 4	61,7	40,0	Висока	Низька	101,3	0,64
Грунт 5	30,6	71,7	Середня	Висока	102,3	2,34

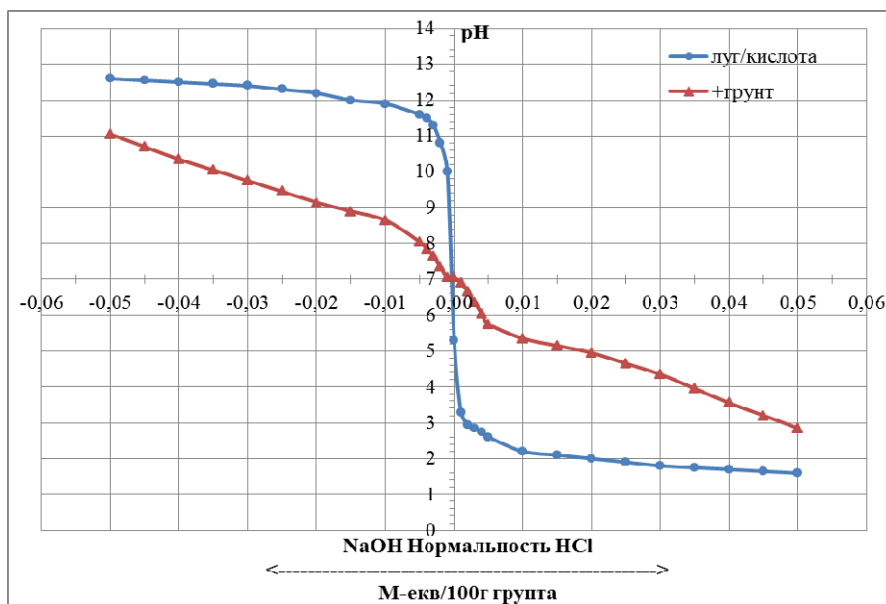


Рис. 1 – Криві для визначення кислотно-основної буферності проби «Грунт 1»

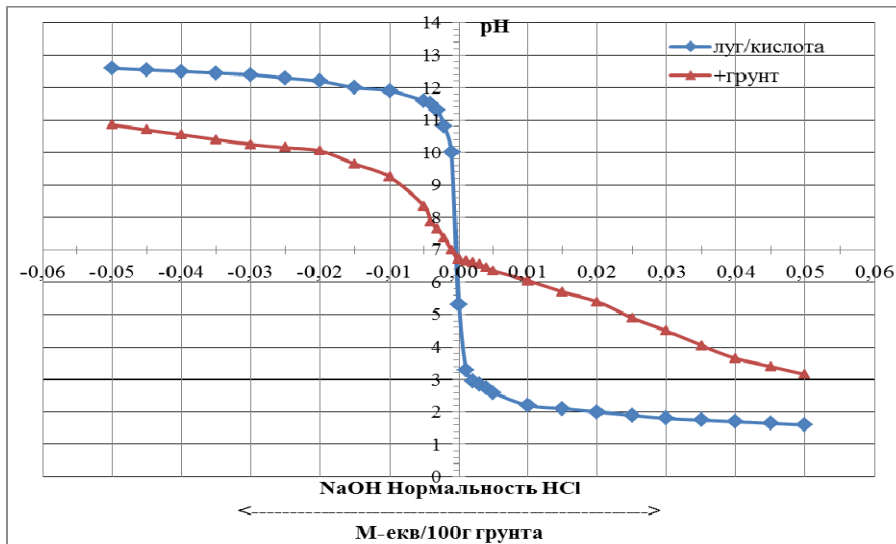


Рис. 2 – Криві для визначення кислотно-основної буферності проби «Грунт 2»

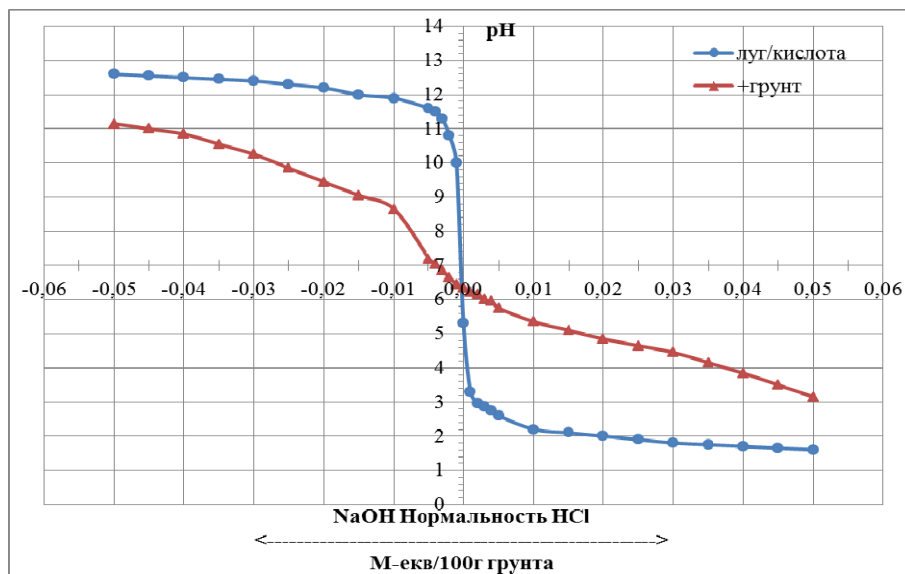


Рис. 3 – Криві для визначення кислотно-основної буферності проби «грунт 3»

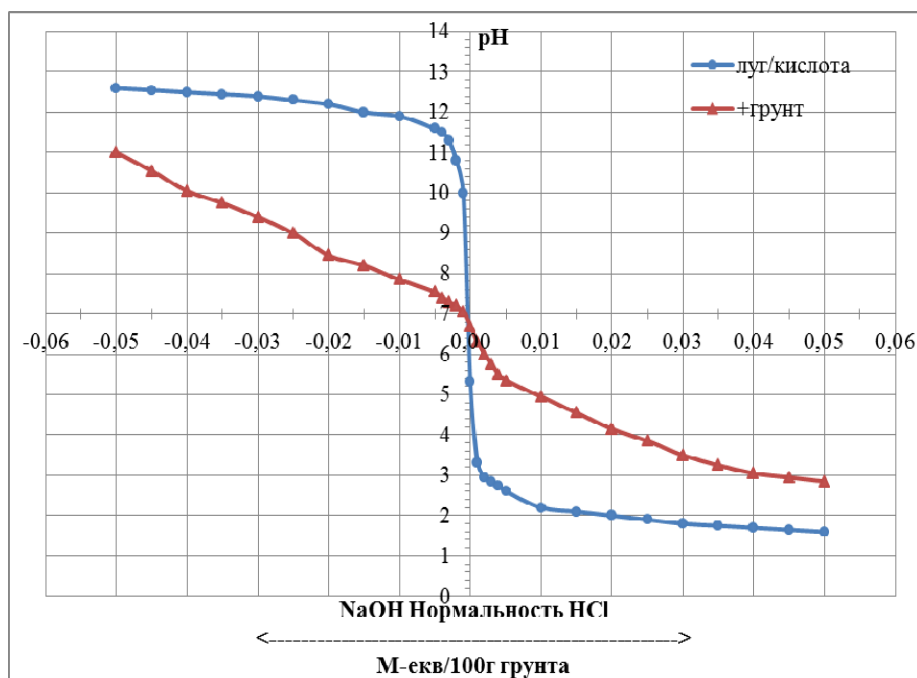


Рис. 4 – Криві для визначення кислотно-основної буферності проби «грунт 4»

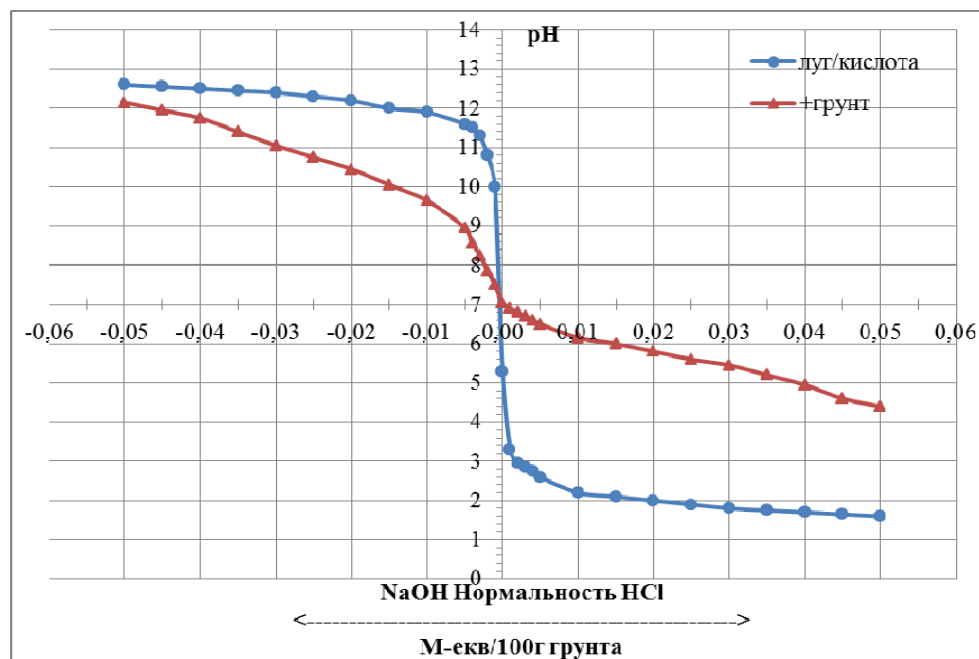


Рис. 5 – Криві для визначення кислотно-основної буферності проби «Грунт 5»

Результати визначення кислотно-основних властивостей ґрунтів засвідчують зміни складу ґрунту. Показник рН води, у верхніх горизонтах досліджуваних ґрунтів в межах 6,05–7,05. Значення ж рН сольової витяжки верхніх горизонтів досліджуваних ґрунтів коливалися у межах 5,05–6,85. Згідно з таблицею 1 ґрунти на ділянках 3, 4 – слабо кислі, на ділянці 2 – близькі до нейтральних, на ділянках 1, 5 – нейтральні.

Ґрунти насичені основами, ступінь насиченості в середньому варіює в середньому 90–95 %.

Буферна здатність ґрунту на ділянці 4 щодо дії кислих агентів найнижча і становить 39,6 %, в лужному середовищі – висока (61,7 %). Найкращі буферні властивості як за кислотою, так і за лугом виявляє ґрунт на модельних ділянках 1 і 5. Сума ступенів буферності кислотного і лужного інтервалів на досліджених ділянках ($VB_{3к} + VB_{3л}$) = 101,3–104,9 %, а індекс буферної врівноваженості K_p варіює в межах 0,64–2,34 (табл. 4).

Ґрунти полів фільтрації служать потужним своєрідним фільтром, який поглинає і частково знешкоджує токсичні викиди.

В умовах урбанізації ґрунти забезпечують продуктивність і біорізноманіття. На зміну екологічних функцій і стану ґрунтів швидко реагують ґрунтові мікроорганізми, що відбивається на їх біохімічній активності. Стерилізуючий ефект різних забруднень призводить до випадання чутливих видів мікроорганізмів, розпаду мікробних ценозів, втрати біохімічної активності ґрунту, а загибель мікроорганізмів – до деградації екосистем.

Для рослин велике значення має кислотність ґрунтів. Для більшості видів листяних дерев більш сприятливе слабо кисле або нейтральне середовище (рН=5,5–7,0). При кислій реакції ґрунту підвищується засвоєння рослинами аніонів, але утрудняється засвоєння катіонів. В результаті порушується мінеральне живлення, попадання в рослини кальцію і магнію,

гальмується синтез білків і цукрів. Лужна реакція ґрунту посилює катіонне і ускладнює аніонне живлення, а починаючи зі значень рН=8-9, робить ґрунт непридатним для росту більшості рослин. У лужному ґрунті зменшується наявність Р, багато видів дерев страждають від дефіциту мікроелементів (В, Сu, Fe, Mn, Zn), оскільки ці поживні речовини існують в нерозчинних формах, які недоступні рослинам. Дефіцит Fe або Mn погіршує здатність до фотосинтезу, що може зменшити ріст дерев і стресостійкість. До того ж, в умовах лужної реакції середовища і промивного режиму різко зростає мобільність органічної речовини, що призводить до збіднення ґрунтів гумусом.

Підвищені показники рН можуть також змінити склад та кількість ендомікоризних грибів, що живуть у ґрунті і впливають на формування кореневої системи і ємність поглинання поживних речовин.

Висновки. Одержані результати аналізу ґрунтів свідчать про те, що поля фільтрації становить надзвичайно велику небезпеку для навколишнього середовища і має бути модернізовані, а також проведені відповідні роботи по регенерації території полігону. Зростання техногенного навантаження на урбоєкосистему може призвести до змін буферних властивостей ґрунтів, їх закисленню, що буде сприяти переходу нерозчинних форм важких металів у розчинну міграційну форму, що буде становити небезпеку для рослин і біоти.

Список літератури:

1. Андрійчук, В. Г. Агропромислове виробництво і земельні ресурси [Текст] / В.Г. Андрійчук. – Київ: ННЦ "ІАЕ", 2009. – 189 с.
2. Артеменко, В. О. Конкуренентоспроможність м'ясопереробних підприємств [Текст]: зб. наук. пр. / В. О. Артеменко, А. Н. Щеглова, В. А. Артеменко // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. – 2005. – № 51 (74). – С. 148–152.
3. Коробкин, В. И. Экология [Текст] / В. И. Коробкин, Л. В. Педельский. – Феникс, 2010. – 602 с.

4. Котлярів, М. О. Екологічний маркетинг [Текст] / М. О. Котлярів. – Київ: Думка, 2009. – 311 с.
 5. Коуп, Р. Экология [Текст] / Р. Коуп. – Москва: Махаон, 2009. – 139 с.
 6. Попов, Н. А. Организация сельскохозяйственного производства [Текст] / Н. А. Попов. – Москва: ЭКМОС, 1999. – 352 с.
 7. Родіонов, О. В. Формування екологічної безпеки підприємств регіону [Текст]: монографія / О. В. Родіонов, Ю. О. Свіноров. – Луганськ: Ноулідж, 2011. – 232 с.
 8. Статюха, Г. О. До питання кількісної оцінки екологічної безпеки при ОВНС [Текст] / Г. О. Статюха, В. А. Соколов, І. Б. Абрамов, Т. В. Бойко, А. О. Абрамова // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 6/6 (48). – С. 44–46. Режим доступу: <http://journals.urau.ua/ejeet/article/view/3347/3147>
 9. Балуц, С. А. Хімічна меліорація ґрунтів (концепція інноваційного розвитку) [Текст] / С. А. Балуц, Р. С. Трускавецький, Ю. Л. Цапко, О. М. Дрозд, М. А. Захарова, Л. І. Воротишцева, Н. Ф. Чешко, В. М. Калініченко, В. А. Гаврилюк, Ю. О. Афанасьєв. – Харків: Міськдрук, 2012. – 129 с.
 10. Надточій, П. П. Екологія ґрунту та його забруднення [Текст] / П. П. Надточій, Ф. В. Вольвач, В. Г. Гермашенко. – Київ: Аграрна наука, 1997. – 286 с.
 11. Равич, Б. М. Комплексное использование сырья и отходов [Текст] / Б. М. Равич, В. П. Окладников. – Москва: Химия, 1988. – 288 с.
 2. Artemenko, V. O., Shheglova, A. N., Artemenko, V. A. (2005). Konkurentospromozhnist' m'yasopererobny'x pidpr'yemstv. Zbirny'k naukovy'x prac' Lugans'kogo nacional'nogo agrarnogo universy'tetu, 51 (74), 148–152.
 3. Korobkin, V. I., Peredel'skij, L. V. (2010). Jekologija. Feniks, 602.
 4. Kotlyarov, M. O. (2009). Ekologichnyi marketing, Kiev: Dumka, 311.
 5. Koupe, R. (2009). Ekologiy, Moscow: Mahaon, 139.
 6. Popov, N. A. (1999). Organizatsiya selskohozyaystvennogo proizvodstva. Moscow: JeKMOS, 352.
 7. Rodionov, O. V., Svinoroyev, Yu. O. (2011). Formuvannya ekologichnoyi bezpeky' pidpr'yemstv regionu. Lugansk: Noulidzh, 232.
 8. Statyha, G. O., Sokolov, V. A., Abramov, I. B., Bojko, T. B., Abramova, A. O. (2010). To issue of ecological safety quantitative evaluation at EIA. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(6(48)). 44–46. Available at: <http://journals.urau.ua/ejeet/article/view/3347/3147>
 9. Balyuk, S. A., Truskavec'ky'j, R. S., Czapko, Yu. L., Drozd, O. M., Zaxarova, M. A., Voroty'nceva, L. I., Cheshko, N. F., Kalinichenko, V. M., Gavry'lyuk, V. A., Afanas'yev, Yu. O. (2012). Ximichna melioraciya g'runtiv (konceptiya innovacijnogo rozvy'tku). Xarkiv: Mis'kdruk, 129.
 10. Nadtochij, P. P., Vol'vach, F. V., Germashenko, V. G. (1997). Ekologiya g'runtu ta jogo zabrudnennya. Kiev: Agrarna nauka, 286.
 11. Ravich, B. M., Okladnikov, V. P. (1988). Kompleksnoe ispol'zovanie syr'ja i othodov, Moscow: Himija, 288.
- Bibliography (transliterated):**
1. Andrijchuk, V. G. (2009). Agropromy'slove vy'robny'cztvo i zemel'ni resursy. Kiev: NNTs "IAE", 189.

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вплив переробних підприємств на якість природного середовища регіону/ О. В. Єгорова// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.95–100. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

Влияние перерабатывающих предприятий на качество природной среды региона/ О. В. Егорова// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.95–100. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.

The impact of processing enterprises on the quality of the natural environment of the region/ O. Yegorova// Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221). – P.95–100. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єгорова Оксана Вячеславівна – викладач, Черкаський державний технологічний університет, кафедра загальної екології, педагогіки та психології, бул. Шевченко, 460, м. Черкаси, Україна, 18006; E-mail: yegorova.ok@gmail.com.

Егорова Оксана Вячеславовна – преподаватель, Черкасский государственный технологический университет, кафедра общей экологии, педагогике и психологии, бул. Шевченко, 460, г. Черкассы, Украина, 18006; E-mail: yegorova.ok@gmail.com.

Yegorova Oksana – Lecturer at the Department, Cherkasy state technological university, Department of General ecology, pedagogy and psychology, Shevchenko str., 460 Cherkasy, Ukraine, 18006; E-mail: yegorova.ok@gmail.com.

УДК 519.876.5::628.472

С. О. ВАМБОЛЬ, В. Ю. КОЛОСКОВ

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ТЕРИТОРІЇ, ПРИЛЕГЛОЇ ДО МІСЦЯ ЗБЕРІГАННЯ ВІДХОДІВ, НА ОСНОВІ КРИТЕРІЮ ЕКОЛОГІЧНОГО РЕЗЕРВУ

Сформульовано та представлено у формалізованому вигляді інтегральний критерій оцінювання екологічного стану території за показником рівня її екологічного резерву. Новизна отриманого результату полягає у використанні логістичної моделі для опису залежностей характеристик деградаційних процесів в екосистемах від факторів негативного впливу. На основі критерію екологічного резерву запропоновано вдосконалення методу оцінювання екологічного стану території, прилеглої до місця зберігання відходів, з використанням імітаційного моделювання для отримання статистики зміни показників якості довкілля та факторів ризику виникнення надзвичайної ситуації.

Ключові слова: екологічний стан, інтегральний критерій, екологічний резерв, імітаційне моделювання, відходи.

Сформулирован и представлен в формализованном виде интегральный критерий оценивания экологического состояния территории по показателю уровня ее экологического резерва. Новизна полученного результата состоит в применении логистической модели для описания зависимостей характеристик деградационных процессов в экосистемах от факторов негативного воздействия. На основе критерия экологического резерва предложено усовершенствование метода оценивания экологического состояния территории, прилегающей к месту захоронения отходов, с использованием имитационного моделирования для получения статистики изменения показателей качества окружающей среды и факторов риска возникновения чрезвычайной ситуации.

Ключевые слова: экологическое состояние, интегральный критерий, имитационное моделирование, экологический резерв, отходы.

The purpose of the article is to improve the method of assessment of environmental condition of the territory adjoined to wastes storage place. We have stated and represented in formalized kind the integral criterion of assessment of environmental condition of the territory with the index of its environmental reserve level. Originality of the achieved result is in logistic model application for quantitative description of dependencies of values characterizing degradation processes in ecosystems considered as responses of surrounding natural environment on negative impact factors influence. Basing on environmental reserve criterion we have proposed improvement of the method of assessment of environmental condition of the territory adjoined with wastes storage places using simulation modeling to achieve stable statistics of the environmental safety level changes as respects to environmental quality indexes together with object parameters of extreme situation occurrence risk.

Keywords: environmental condition, integral criterion, environmental reserve, simulation modeling, wastes.

Вступ. У лютому 2015 року до Закону України від 19.06.2003 р. № 964-IV «Про основи національної безпеки України» було внесено ряд суттєвих доповнень щодо визначення загроз та напрямів державної політики у сфері цивільного захисту. Зокрема, до переліку загроз національним інтересам та національній безпеці держави у сфері цивільного захисту включено значне антропогенне і техногенне перевантаження території України, а також зростання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій (НС) техногенного та природного характеру. Зазначений закон визначив правові засади переходу до комплексного вирішення питань забезпечення екологічної безпеки та зменшення ризиків виникнення НС на об'єктах, які є джерелом негативного впливу на довкілля, зокрема, у місцях зберігання відходів.

Місця зберігання відходів різного походження виступають потужними довготривалими джерелами забруднення довкілля. Оскільки, на жаль, на сьогодні не все населення України охоплене системою збирання та вивозу побутових відходів, велику проблему становлять несанкціоновані звалища, а також непорядковані полігони зберігання відходів. Характерними властивостями несанкціонованого або непорядкованого сміттєзвалища є динамічність площі, яку воно займає, а також змінність складу розміщених на ньому відходів, що в свою чергу збільшує невизначеність у оцінках рівня екологічної безпеки. Реалізація динамічного керування станом довкілля потребує якісно нових підходів до оцінювання результатів негативних впливів на нього. Врахування сукупної дії різних факторів, накопичення ефекту впливу, взаємозв'язків між показниками рівня екологічної безпеки сміттєзвалища та факторами ризику виникнення НС, тощо, вимагає переходу від методів прямого оцінювання результатів впливів до методів прогнозування цих ре-

зультатів у майбутньому, що дозволить не лише виконати завдання забезпечення необхідного рівня безпеки, а й підвищити ефективність захисних заходів, які впроваджуються для його вирішення.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Основи концепції комплексного екологічного оцінювання природно-техногенних об'єктів, покладеної в основу представлених досліджень, викладено у роботах з питань екологічної безпеки [1-5].

Аналіз літературних джерел продемонстрував відсутність всеосяжного методу інтегрального оцінювання екологічного стану територій, що пов'язано насамперед з великою різноманітністю факторів негативного впливу на довкілля. Загалом сучасні розробки з питань створення методології оцінювання екологічного стану територій базуються на двох наступних підходах: експертному [6-8] та розрахунковому [9-14]. Перший базується на збиранні та вивченні великих обсягів даних групою експертів, які надалі надають сформовані висновки на їхній основі. При цьому, зазвичай, недостатню увагу приділяють граничним значенням показників з нормативних документів, внаслідок чого у отриманих висновках практично відсутні чіткі кількісні значення, які характеризують перехід територією від одного екологічного стану до іншого. За умови застосування другого підходу зазначену проблему можна подолати, визначаючи деякий узагальнюючий індекс шляхом сумування оцінок за окремими показниками, як правило, з використанням вагових коефіцієнтів. Однак, отримані вказаним чином результати більш придатні для порівняння територій між собою, аніж для визначення абсолютних показників екологічного стану. Таким чином, можна зробити висновок, що представлені у сучасних роботах підходи до вирішення проблеми оцінювання еко-

© С. О. Вамболь, В. Ю. Колосков. 2016

логічного стану територій орієнтовані головним чином на узагальнене оцінювання та прогнозування, а отже їхнє застосування для динамічного управління екологічною безпекою є суттєво ускладненим.

Оскільки реальні умови функціонування природних процесів у навколишньому середовищі характеризуються впливом складного комплексу негативних факторів, оцінювання результату їхньої дії має базуватися на сформованих динамічних моделях виникнення відгуків середовища під дією тих або інших факторів. При цьому екологічні процеси слід розглядати як інтегральну сукупність хімічних, біологічних, геологічних, техногенних та інших процесів, які відбуваються у екосистемах різного рівня, з використанням синергетичного підходу [1], який, зокрема, успішно використовувався у дослідженнях з популяційної екології. Зокрема, у роботі [14] на основі використання такого підходу для нормування складних техногенних впливів на прісноводні екосистеми запропонований ізоболічний критерій, в основу якого покладено опис залежності показників благополуччя біосистеми рівнянням логістичної кривої. Подальшим розвитком синергетичного підходу стала запропонована у [12] гіпотеза про можливість використання логістичної кривої для опису загального характеру залежності значення відгуку екосистеми від фактору негативного впливу.

Врахування ефектів сукупної дії негативних факторів різного походження, а також взаємозв'язків між показниками рівня екологічної безпеки сміттєзвалища та факторами ризику виникнення НС, вимагає переходу від методів прямого оцінювання результатів впливів до методів, заснованих на прогнозуванні цих результатів у майбутньому, що дозволить не лише забезпечити необхідний рівень екологічної безпеки, а й підвищити ефективність впроваджуваних природозахисних заходів. З урахуванням обмеженості ресурсів з ліквідації наслідків шкідливого впливу на довкілля актуальною проблемою є оцінювання екологічного стану територій, прилеглих до місць зберігання відходів, особливо несанкціонованих, як об'єктів техногенної діяльності людства.

Ціль та задачі дослідження. Метою представленої роботи є вдосконалення методу оцінювання екологічного стану територій, прилеглої до місця зберігання відходів. Для досягнення поставленої мети були поставлено та вирішено задачу розробити інтегральний критерій оцінювання екологічного стану території, прилеглої до місця зберігання відходів.

Матеріали та методи дослідження впливу місця зберігання відходів на навколишнє природне середовище. Об'єктом дослідження є вплив місця зберігання відходів на екосистему прилеглої території.

Предметом дослідження є критерії оцінювання екологічного стану території, прилеглої до місця зберігання відходів.

Впровадження відокремлених підходів до контролю негативного впливу на окремі компоненти довкілля не дозволяє організувати комплексний захист навколишнього середовища, оскільки за таких умов до уваги не береться наявність їхніх взаємозв'язків, пов'язаних, зокрема, з переміщенням забруднюючих речовин між різними елементами природного середо-

вища. Це, зокрема, означає звужування завдання захисту довкілля до впровадження заходів зі зниження окремих показників за рахунок перерозподілу факторів негативного впливу між елементами навколишнього природного середовища без значного зменшення рівня цього впливу в цілому.

Виходячи з вищесказаного, у представленій роботі оцінювання екологічного стану території розглядалося у наступному визначенні: «процес порівняння сукупності екологічних станів об'єктів з певними нормами з урахуванням потенційно можливих впливів зовнішніх факторів, зокрема, факторів ризику НС». У такому сенсі при оцінюванні результатів негативних впливів на об'єкт та довкілля потрібно враховувати якнайбільшу кількість індивідуальних особливостей об'єкту за ризиком виникнення на ньому НС техногенного чи природного характеру. Натомість вимоги безпеки виключають експериментування з відтворенням умов перебігу реальної НС. З урахуванням усього вищезгаданого, методологічною основою представленої роботи було обрано метод імітаційного моделювання, який дозволив перейти до аналізу відповідних станів об'єкту з визначенням альтернатив його режимів функціонування і, внаслідок цього, до визначення рівня безпеки об'єкту в цілому.

Основою для вдосконалення методу оцінювання екологічного стану прилеглої території став представлений у роботі [15] метод прогнозування рівня безпеки місця зберігання відходів на основі імітаційного моделювання. Практична реалізація методу потребує, зокрема, формування набору критеріїв

$$K = K^{HC} \cup K^{EB} = \{K_m^{HC}\} \cup \{K_l^{EB}\}, \quad (1)$$

які мають формалізувати вимоги нормативних документів, що регламентують умови експлуатації полігонів зі зберігання ТПВ, за припустимим рівнем ризику виникнення НС

$$K_m^{HC} : \chi_m^{HC}(\Phi, E^{HC}), \quad m = 1 \dots R, \quad (2)$$

та рівнем екологічної безпеки

$$K_l^{EB} : \chi_l^{EB}(\Phi, E^{EB}), \quad l = 1 \dots P, \quad (3)$$

де R та P – кількість критеріїв, що використовується для оцінювання рівня безпеки за кожним з цих напрямів.

Комплекс критеріїв оцінювання рівня безпеки реалізується для кожного діючого фактору, та водночас для усіх значущих відгуків довкілля та об'єкту. Вочевидь, перелік значущих показників для оцінювання екологічного стану територій, прилеглих до місць зберігання відходів має визначатися за результатами польового обстеження та геоекологічних вишукувань.

Екологічний стан території характеризує інтенсивність речовинно-енергетичних обмінів між екосистемою та її навколишнім середовищем, включаючи його антропогенну складову. Встановлення меж між класами екологічних станів має, з одного боку, відповідати законам екологічної науки, а з іншого – існуючим нормативним документам з питань забезпечення

екологічної безпеки. Слід зазначити, що для реалізації динамічного управління екологічною безпекою особливою цікавістю становлять саме проміжні межі між класами екологічних станів, оскільки їх точне встановлення дозволить гнучкіше визначати діапазони керуючих впливів, призначених для підтримки території у задовільному стані та попередження її переходу до кризового або катастрофічного екологічного стану. Ще складнішою стає ситуація, коли зовнішні навантаження представлені сукупністю деяких факторів, особливо за умов НС, адже здатність екосистеми адаптуватися до таких впливів значно послаблюється.

Розглядаючи показники якості довкілля як відгуки екосистеми на дію факторів негативного впливу, на основі гіпотези [12] про можливість використання логістичної кривої для опису загального характеру їхньої залежності представимо останню у наступному формалізованому вигляді:

$$\bar{\varepsilon}(\bar{F}) = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} \bar{\varepsilon}_0}{\bar{\varepsilon}_0 + (\bar{\varepsilon}_{\max} - \bar{\varepsilon}_0) \cdot e^{-\gamma \bar{F}}}, \quad (4)$$

де $\bar{F} = F / [F]$ – величина фактору негативного впливу F , нормована за його граничним припустимим значенням $[F]$; $\bar{\varepsilon} = \varepsilon / [\varepsilon]$ – величина відгуку екосистеми ε , нормована за його граничним припустимим значенням $[\varepsilon]$; $\bar{\varepsilon}_0$ – початкове значення відгуку; $\bar{\varepsilon}_{\max}$ – асимптотичне значення відгуку ($\bar{\varepsilon} > 1$), яке відповідає повній деградації екосистеми; γ – деяка константа, яка визначає швидкість деградації за зростання нормованого фактору негативного впливу \bar{F} та залежить від характеру реакції екосистеми на його дію. За використання нормативного підходу за значенням відгуку безпечний стан екосистеми визначається критерієм у вигляді

$$\chi^{\varepsilon} = \bar{\varepsilon} : \chi^{\varepsilon} \leq 1. \quad (5)$$

Однак, рівень екологічної безпеки характеризується більшою мірою не значенням зміни показників екосистеми, а її «запасом міцності», який визначається поняттям екологічного резерву, введеним Ю. А. Израеєм. У якості кількісного індексу за такого підходу пропонується ввести показник рівня екологічного резерву ρ , який визначатиметься за формулою:

$$\rho = 1 - \bar{\varepsilon}. \quad (6)$$

З використанням (4) отримуємо:

$$\rho(\bar{F}) = 1 - \frac{(1 - \rho_{\min})(1 - \rho_0)}{(1 - \rho_0) + (\rho_0 - \rho_{\min}) \cdot e^{-\gamma \bar{F}}}, \quad (7)$$

де $\rho_0 = 1 - \bar{\varepsilon}_0$ – початкове значення рівня екологічного резерву; $\rho_{\min} = 1 - \bar{\varepsilon}_{\max}$ – асимптотичне значення рівня екологічного резерву ($\rho_{\min} < 0$), яке відповідає повній деградації екосистеми. Форми логістичних кривих, побудовані за (5) та (7) представлено на рис. 1.

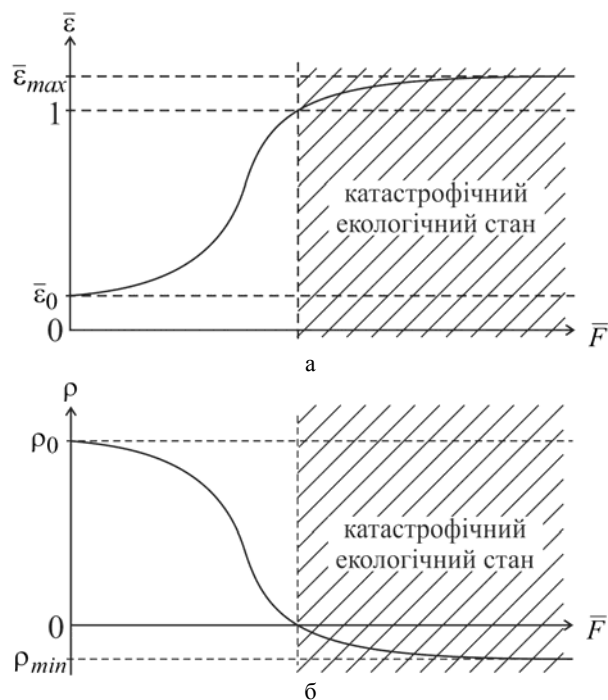


Рис. 1 – Порівняння форм логістичних кривих: а – залежність «фактор негативного впливу – відгук екосистеми»; б – залежність «фактор негативного впливу – рівень екологічного резерву»

Використання представленого підходу дозволило сформулювати новий інтегральний критерій оцінювання екологічного стану території – критерій екологічного резерву, який можна визначити як критерій наявності у території достатньої здатності сприймати зовнішні фактори негативного впливу без переходу у катастрофічний стан. Представлений підхід до визначення екологічного стану є відображенням нормативного за умови, що у якості граничного значення відгуку екосистеми прийнято таке, що відповідає досягненню нею катастрофічного стану.

Критерій екологічного резерву можна представити у формалізованому вигляді наступним чином:

$$\chi^{\rho} = \rho(\bar{F}) : \chi^{\rho} \geq 0. \quad (8)$$

Момент перетворення екологічного стану території на катастрофічний визначається значенням рівня екологічного резерву $\rho = 0$, а подальший розвиток катастрофічної деградації екосистеми характеризуватиметься значеннями $\rho < 0$.

Результати дослідження впливу місця зберігання відходів на навколишнє природне середовище. В результаті проведених досліджень сформульовано та представлено у формалізованому вигляді інтегральний критерій оцінювання екологічного стану території за показником рівня її екологічного резерву. Новизна отриманого результату полягає у використанні логістичної моделі для кількісного опису залежностей величин, які характеризують деградаційні процеси в екосистемах, у якості відгуків навколишнього природного середовища на дію факторів негативного впливу.

Обговорення результатів дослідження впливу місця зберігання відходів на навколишнє природне середовище. Оцінювання екологічного стану території, прилеглої до місця зберігання відходів, вимагає формалізації зв'язків між показниками якості довкілля та факторами негативного впливу на нього з боку об'єкту, у тому числі під час НС. При цьому необхідно брати до уваги якнайбільше індивідуальних особливостей об'єкту стосовно можливостей виникнення на ньому НС – пожежі, зсуву, тощо.

Перевагою запропонованого інтегрального критерію екологічного резерву є формалізоване представлення показника рівня екологічного резерву ρ , що у свою чергу забезпечує можливість використовувати його для оцінювання екологічного стану території у імітаційних числових експериментах з дослідження станів об'єкту, що відповідають реалізації на ньому техногенних чи природних НС.

Для практичної реалізації інтегрального критерію та методу оцінювання екологічного стану території на його основі необхідним є проведення системних досліджень, направлених на визначення формалізованих параметрів, які визначають характер деградаційних процесів у екосистемах за умови дії факторів негативного впливу різної природи.

Висновки. Основним результатом представленої роботи є розроблений інтегральний критерій оцінювання екологічного стану території за величиною показника рівня її екологічного резерву, який дозволяє визначити одночислову критеріальну оцінку результату впливу місця зберігання відходів на довкілля з урахуванням взаємозв'язків між природними процесами в ньому з параметрами функціонування об'єкту, що є джерелом негативного впливу.

Використання критерію екологічного резерву у свою чергу дає можливість вдосконалити метод оцінювання екологічного стану території, прилеглої до місця зберігання відходів, зробивши його придатним до використання не лише для довгострокового оцінювання, а й для оперативного управління екологічною безпекою подібних об'єктів.

Список літератури:

1. *Пляцук, Л. Д.* Синергетика: екосистемные процессы [Текст] / Л. Д. Пляцук, Е. Ю. Черныш, Д. Л. Пляцук // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014. – Вип. 6 (89), Ч. 1. – С. 137–142.
2. *Лисиченко, Г. В.* Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління [Текст] / Г. В. Лисиченко, Ю. Л. Забулонов, Г. А. Хміль. – К.: Наукова думка, 2008. – 543 с.
3. *Харламова, Е. В.* Теоретические основы управления экологической безопасностью техногенно нагруженного региона [Текст] / Е. В. Харламова, М. С. Малеваный, Л. Д. Пляцук // Екологічна безпека. – 2012. – № 1 (13). – С. 9–12.
4. *Білявський, Г. А.* Екологічне управління [Текст] / В. Я. Шевчук, Ю. М. Сатанкін, Г. А. Білявський та ін.; під ред. Г. А. Білявського. – К.: Лебідь, 2004. – 430 с.
5. *Приходько, М. М.* Теоретико-методологічні основи екологічної безпеки геосистем [Текст] / М. М. Приходько // Наукові записки ТНПУ. Серія: Географія. – 2012. – № 1 (31). – С. 179–191.
6. *Leung, W.* Disparate perceptions about uncertainty consideration and disclosure practices in environmental assessment and opportunities for improvement [Text] / W. Leung, B. F. Noble, J. A. G. Jaeger, J. A. E. Gunn // Environmental Impact Assessment Review. – 2016. – Vol. 57. – P. 89–100. –

- doi:10.1016/j.eiar.2015.11.001
7. Living Planet Report 2006 [Electronic resource] // WWF – World Wide Fund For Nature. – Gland, Switzerland, 2007. – Available at: http://www/URL: http://wwf.panda.org/about_our_earth/all_publications/lpr_2016/
 8. *Барановський, В. А.* Екологічна географія і екологічна картографія [Текст] / В. А. Барановський. – К.: Фітосоціоцентр, 2001. – 252 с.
 9. *Ji, C.* Comparative analysis of methods for integrating various environmental impacts as a single index in life cycle assessment [Text] / C. Ji, T. Hong // Environmental Impact Assessment Review. – 2016. – Vol. 57. – P. 123–133. – doi:10.1016/j.eiar.2015.11.013
 10. *Aydi, A.* Minimization of environmental risk of landfill site using fuzzy logic, analytical hierarchy process, and weighted linear combination methodology in a geographic information system environment [Text] / A. Aydi, M. Zairi, H. B. Dhia // Environmental Earth Sciences. – 2013. – Vol. 68, № 5. – P. 1375–1389. – doi:10.1007/s12665-012-1836-3
 11. *Макаровський, С. Л.* Екологічний атлас Харківської області [Текст] / С. Л. Макаровський, О. В. Соловійов, Г. Д. Коваленко та ін. – Х.: УкрНДІЕП, 2005. – 80 с.
 12. *Белогуров, В. П.* Разработка методологии интегрального оценивания экологического состояния территорий [Текст] / В. П. Белогуров // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 5/10 (71). – С. 51–56. doi:10.15587/1729-4061.2014.28173
 13. *Козуля, Т. В.* Комплексна екологічна оцінка природно-техногенних комплексів на основі MIPS- і ризик-аналізу [Текст] / Т. В. Козуля, Д. І. Смельянова, М. М. Козуля // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 3/10 (69). – С. 8–13. doi:10.15587/1729-4061.2014.24624
 14. *Шуїський, В. Ф.* Оценка и подход к нормированию многофакторных техногенных воздействий на биосистемы [Текст] / В. Ф. Шуїський, Д. С. Петров, М. Л. Матюшонок и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 12. – С. 109–112.
 15. *Колосков, В. Ю.* Моделі та методи прогнозування рівня безпеки полігону зі зберігання твердих побутових відходів [Текст] / В. Ю. Колосков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Механіко-технологічні системи та комплекси». – 2016. – № 4 (1176). – С. 142–146. – Режим доступу: <http://www/URL: http://mts.khpi.edu.ua/article/view/87813>

Bibliography (transliterated):

1. Plyatsuk, L. D., Chernish, E. Yu., Plyatsuk, D. L. (2014). Synergetics: ecosystem processes. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 6 (89), 137–142.
2. Lysyuchenko, G. V., Zabolonov, Yu. L., Khmil, H. A. (2008). *Pryrodnyj, tehnogennyj ta ekologichnyj ryzyky: analiz, ocinka, upravlinnja*. Kyiv: Naukova dumka, 543.
3. Harlamova, E. V., Malevanij, M. S., Pljacuk, L. D. (2012). Theoretical bases managements by ecological safety of the technogenic loaded region. *Ecological Safety*, 1 (13), 9–12.
4. Shevchuk, V. Ja., Satankin, Ju. M., Biljavs'kyj, G. A. et al.; In: Biljavs'kyj, G. A. (2004). *Ekologichne upravlinnja*. Kyiv: Lebid', 430.
5. Prykhodko, M. M. (2012). Theoretical and methodological fundamentals of geosystems' ecological safety. *The scientific issues of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National pedagogical university. Series: geography*, 1 (31), 179–191.
6. Leung, W., Noble, B. F., Jaeger, J. A. G., Gunn, J. A. E. (2016). Disparate perceptions about uncertainty consideration and disclosure practices in environmental assessment and opportunities for improvement. *Environmental Impact Assessment Review*, 57, 89–100. doi:10.1016/j.eiar.2015.11.001
7. Living Planet Report 2006. (2007). *WWF – World Wide Fund For Nature*. Gland, Switzerland. Available at: http://wwf.panda.org/about_our_earth/all_publications/lpr_2016/
8. Baranovskiy, V. A. (2001). *Ekologichna heohrafiia i ekologichna kartohrafiia*. Kyiv: Fitosotsiotsentr, 252.
9. Ji, C., Hong, T. (2016). Comparative analysis of methods for integrating various environmental impacts as a single index in life cycle assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 57, 123–133. doi:10.1016/j.eiar.2015.11.013
10. Aydi, A., Zairi, M., Dhia, H. B. (2012). Minimization of environmental risk of landfill site using fuzzy logic, analytical hierarchy process, and weighted linear combination methodology in a geographic information system environment. *Environmental Earth Sciences*, 68 (5), 1375–1389. doi:10.1007/s12665-012-1836-3

11. Makarovskiy, Ye. L., Soloviov, O. V., Kovalenko, H. D. et al. (2005). *Ecological Atlas of Kharkiv Region*. Kharkiv: UkrNDIEP, 80.
12. Belogurov, V. (2014). Elaboration of a methodology for integral estimation of ecological state of territories. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10(71)), 51–56. doi:10.15587/1729-4061.2014.28173
13. Kozulia, T., Yemelianova, D., Kozulia, M. (2014). Complex ecological estimation of natural and manmade complexes which basis on MIPS- and risk analysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10(69)), 8–13. doi:10.15587/1729-4061.2014.24624
14. Shujskij, V. F., Petrov, D. S., Matjushonok, M. L., Savchenko, A. V., Petrova, T. A. (2000). Ocenka i podhod k normirovaniju mnogofaktornyh tehnogennyh vozdeystvij na biosistemy. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'*, 12, 109-112.
15. Koloskov, V. (2016). Models and methods of forecasting of safety level of solid household wastes storage landfill. *Bulletin of NTU "KhPI". Sries: Mechanical-technological systems and complexes*, 4 (1176), 142–146. Available at: <http://mtsc.khpi.edu.ua/article/view/87813>

Надійшла (received) 11.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вдосконалення методу оцінювання екологічного стану території, прилеглої до місця зберігання відходів, на основі критерію екологічного резерву/ С. О. Вамболь, В. Ю. Колосков// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.101–105. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-5459.

Усовершенствование метода оценивания экологического состояния территории, прилегающей к месту захоронения отходов, на основе критерия экологического резерва/ С. А. Вамболь, В. Ю. Колосков// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.101–105. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-5459.

Improvement of the method of assessment of environmental condition of territory adjoined to wastes storage place based on environmental reserve criterion/ S. Vambol, V. Koloskov//Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No 49 (1221).– P.101–105. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Вамболь Сергій Олександрович – доктор технічних наук, професор, Національний університет цивільного захисту України, завідувач кафедри прикладної механіки; вул. Чернишевська, 94, м. Харків, 61023, Україна; e-mail: sergvambol@gmail.com.

Вамболь Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор, Национальный университет гражданской защиты Украины, заведующий кафедрой прикладной механики; ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, 61023, Украина; e-mail: sergvambol@gmail.com.

Vambol Sergij – doctor of technical sciences, professor, National University of Civil Protection of Ukraine, head of the Applied Mechanics Department; Chernishevsk str., 94, Kharkiv, 61023, Ukraine; e-mail: sergvambol@gmail.com.

Колосков Володимир Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет цивільного захисту України, доцент кафедри прикладної механіки; вул. Чернишевська, 94, м. Харків, 61023, Україна; e-mail: koloskov@nuczu.edu.ua.

Колосков Владимир Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет гражданской защиты Украины, доцент кафедры прикладной механики; ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, 61023, Украина; e-mail: koloskov@nuczu.edu.ua.

Koloskov Volodymyr – candidate of technical sciences, associate professor, National University of Civil Protection of Ukraine, associate professor of the Applied Mechanics Department; Chernishevsk str., 94, Kharkiv, 61023, Ukraine;; e-mail: koloskov@nuczu.edu.ua.

УДК 621.039.586:614.876

В. М. ВАЩЕНКО, І. Б. КОРДУБА, А. А. ГУДИМА

ДЕТЕРМІНІСТСЬКИЙ МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ СМЕРЧІВ НА ВОДОЙМУ-ОХОЛОДЖУВАЧ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АЕС

На основі використання модельних підходів, запропонованих В. І. Скалозубовим, виконано дослідження для оцінки параметрів хвилі цунамі, викликані впливом смерчу на водну поверхню водойми-охолоджувача ЧАЕС. При певних умовах хвиля може мати висоту більшу за висоту відгороджувальної дамби і спричинити переливання радіоактивних водних мас в річку Прип'ять поверх відгороджувальної дамби ВО ЧАЕС.

Ключові слова: зона відчуження, водойма-охолоджувач, смерчонебезпека, хвиля затоплення, детерміністський метод моделювання

В работе, на основе использования модельных подходов, предложенных В. И. Скалозубовым, выполнено исследование для оценки параметров волны цунами, вызванной влиянием смерча на водную поверхность ВО ЧАЭС. При определенных условиях волна может иметь высоту превышающую высоту отгораживающей дамбы и в таком случае и вызвать переливание радиоактивных водных масс в реку Припять поверх отгораживающей дамбы ВО ЧАЭС.

Ключевые слова: зона отчуждения, водоем-охладитель, смерчеопасность, волна затопления, детерминистский метод моделирования

Based on the fact, that Chernobyl NPP is located in tornado-hazard area and based on the model approaches by V. I. Skalozubov, a research has been carried out to estimate the parameters of a tsunami wave that might be caused by a tornado influence at water surface of a Chernobyl NPP coolant pond. Under certain conditions the wave can have height larger than the border dike and cause overflow of the water masses into Pripyat river.

Modeling of the flooding wave in the coolant pond caused by tornadoes was performed for tornadoes with intensity class F1.0, F2.0 and F3.0. It was shown that a conservative dike flooding under the design water level in the Chernobyl NPP coolant pond does not happen under F1.0 intensity tornado influence. However, in case of F2.0 and F3.0 intensity class and higher the coolant pond dike is overflowed at the earliest stages of tornado wave formation ($T < 0.3$). Flooding of Chernobyl NPP coolant pond will cause a large quantity of radiation contaminated water substance enter into Pripyat river with further hazardous environmental consequences.

The final decommissioning of the Chernobyl NPP coolant pond supposes water level reduction by 7 m, i.e. approximately to Pripyat river level. Under such conditions conservative dike overflowing by a wave created by F3.0 intensity tornado and below does not happen according to the obtained results.

Keywords: exclusion zone, water-oholaditel, smercheopasnost wave zatoplniya, deterministic simulation method.

Вступ. Згідно статистичних даних про смерчі, що були зареєстровані на території України в 1844–2001 рр., більшість вітчизняних об'єктів використання ядерної енергії (ОВЯЕ) розташовані в смерч-небезпечних районах з розрахунковим класом імовірних смерчів kp^2 та з середньорічною імовірністю виникнення смерч-небезпечної події більшої за $P_S = 10^{-4}$ 1/рік [1].

В керівних і нормативних документах смерчі відносяться до небезпечних зовнішніх природних екстремальних впливів (ЗПЕВ). Для споруд АЕС зовнішніми являються впливи, що виникають зовні фізичних меж конструкції цих споруд [2]. Для водойм-охолоджувачів АЕС визначення поняття «фізичних меж» можна замінити на поняття «географічних меж» водойм разом з усіма їх інженерно-технічними системами і спорудами (дамби, насосне обладнання, канали, шлюзові системи та інше) що забезпечують їх екологічно безпечне функціонування і експлуатацію в штатних та аварійних режимах, а також в процесі виведення водойм-охолоджувачів з експлуатації шляхом осушування, консервації чи шляхом їх повної ліквідації.

Як показав світовий досвід експлуатації та виведення з експлуатації радіоактивних водойм, вплив смерчів на них може спричинити підняття та винесення радіації за межі чаші водойми. Тому, після аварії на Чорнобильській АЕС, виникла проблема смерч-небезпеки її водойми-охолоджувача забрудненої радіацією [3].

Статистичні дані про проходження смерчів над територією вибраного промислового майданчика розташування та спорудження ОВАЕ і на основі яких визначаються рішення про прийняття допустимої

межі імовірності виникнення смерчонебезпечної події P_0 значення якої (з врахуванням рекомендацій [1]) можна прийняти рівним $P_0 = 10^{-4}$.

Смерчонебезпека території розташування ОВАЕ оцінюється шляхом визначення річної імовірності P_S виникнення смерч-небезпечної події в районі розташування і спорудження ОВАЕ в межах території площею 1000 км² що оточує промисловий майданчик ОВАЕ [1]. Якщо для району розташування ОВАЕ в межах території площею 1000 км², що оточує майданчик ОВАЕ, розташований в зоні з однорідними фізико-географічними умовами щодо утворення смерчів, встановлено річну імовірність проходження смерчів більше P_0 ($P_S > P_0$), то тоді територія є смерчонебезпечною і це вимагає визначення головних характеристик смерчів для цієї території.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Нові дискусії та дослідження щодо довготривалої екологічної безпеки ВО ЧАЕС виникли у зв'язку з початком остаточного виведення з експлуатації цієї унікальної і забрудненої радіацією водойми шляхом її поступового осушування [4, 5].

Незаперечним стимулом для нових досліджень з переоцінки екологічної смерч-небезпеки для ВО ЧАЕС також є трагічні екологічні наслідки радіаційної аварії у 1967 році на радіоактивній технологічній водоймі В-9 (відома як озеро Карачай) в яку скидалися промислові радіоактивні відходи з підприємств відомого радянського виробничого об'єднання (ВО) МАЯК в Челябінській області.

Аналіз екологічної катастрофи 1967 року в результаті впливу вітрів та смерчів на радіоактивну водойму В-9 виробничого об'єднання (ВО) Маяк.

Водойма В-9 (відома під назвою озеро Карачай) з 1951 року використовувалось як сховище рідких радіоактивних відходів, яка після радіаційно-екологічної катастрофи на ВО Маяк перекинула скидання радіації в річку Теча. В озері сумарно було накопичено понад 120 млн Кі бета-активних нуклідів: 40 % ^{90}Sr та 60 % ^{137}Cs , з яких на момент початку консервування озера 7 % – знаходились в воді, 41 % – в суглинках чаші озера, 52 % – в динамічних донних відкладеннях.

Накопичені в озері радіонукліди спричинили його розігрів і озеро почало висихати, становлячись ще більш небезпечним джерелом розповсюдження радіоактивності.

На фоні радіоактивного розігрівання озера в 1967 році в Челябінській області виникли ваомальні кліматичні умови. Зима 1966–1967 р., була малосніжною (випало осадків менше 10 % від середньої багаторічної норми) а весна також була сухою і ранньою. Подальше розігрівання ґрунтів сприяло процесам інтенсивного пилотворення. Почалось різке зниження рівня води в озері і осушення його берегів з радіоактивними відкладеннями. При цьому аномальні кліматичні умови викликали вітри та смерчі, а також стовпоподібні підйомні атмосферні потоки підняли висушені озерні радіоактивні відкладення і рознесли їх більше як на 2500 к. км, небезпечно посиливши рівень радіоактивного забруднення територій після першої катастрофи на ВО Маяк у 1957 р. В результаті було визнано що 500 000 населення було враженим вторинним радіоактивним забрудненням. Сумарна активність, рознесених вітрами і смерчами з осушених та водних поверхонь озера Карачай радіоактивних субстанцій, сягала около 600 Кі. Для порівняння відмітимо, що в озері Карачай знаходиться біля 200 млн Кі, а в Чорнобилі 40-50 млн Кі.

Радіоактивні відходи, що були перенесені вітрами і смерчами, покрили 63 населених пункти з населенням в 42 000 жителів. З них 18 000 були евакуйовані. А в результаті вторинного радіаційного забруднення в поселеннях на відстанях 7–12 км від озера Карачай утворились території рівень забруднення яких становив 0,1 Кі/кв. км що відповідає нормам надзвичайної екологічної ситуації. До того ж, дуже пологі радіоактивні береги озера стали причиною того, що навіть зовсім незначні коливання рівня води в озері внаслідок сухої погоди чи дощів призводило до значних змін площі водного дзеркала озера.

Аерокосмічні фотографії осушеної чаші ВО ЧАЕС багато в чому показують аналогічні рельєфні особливості з озером Карачай. До того ж рельєф екологічно небезпечної частини осушеної чаші ВО ЧАЕС підсилюється обширними висушеними багатокілометровими площами піщаних ділянок вкритих радіоактивними моллюсками дрейсени та їх залишками.

В пост фокусімських роботах [6, 7] були виконані переоцінки смерч-небезпеки для АЕС України з точки зору можливості затоплення їх промислових майданчиків в результаті утвореної смерчем хвилі затоплення на водоймах-

охолоджувачах АЕС. Однак дослідження параметрів такої хвилі затоплення для ВО ЧАЕС не проводились. Проте нові спостережні та експериментальні дані для штучно створюваних смерчів дають можливість уточнити моделі і адекватно оцінити масштаби небезпечних радіаційних екологічних наслідків що можуть виникнути в результаті впливу смерчів на екологічно небезпечні природно-антропогенні водойми, яким є ВО ЧАЕС.

Тому в даній роботі, на основі використання підходів В.І. Скалзубова, були виконані дослідження характеристик хвилі-цунамі, що може утворитись в результаті впливу смерчу на поверхню ВО ЧАЕС і перемістити радіоактивні водні маси за межі огорожувальної дамби.

Загальна характеристика смерчонебезпеки в районі розташування водойми-охолоджувача Чорнобильської АЕС. На європейській частині території СНГ існує два географічні центри смерчоутворення. Перший - по обидві сторони кордону Україна-Білорусь, другий – між Москвою і Новгородом [7].

Умови для формування смерчів виникають на території України нерідко – за останні 20 років зареєстровано більше 34 сильних смерчів. Найчастіше смерчі утворюються на територіях степового та центрального Полісся. Невеликі локальні смерчі спостерігаються там щороку. Оскільки Чорнобильська зона відчуження (ЧЗО), розташована на півночі Київської області на території Полісся, тому вона також є зоною підвищеної смерчонебезпеки [7]. В Київській області найпотужніший смерч, 3-го класу інтенсивності за шкалою Фуджіти, був зареєстрований 18 серпня 1969 року. Іще три руйнівних смерчі в Київській області які утворились та спостерігались в районі Київського водосховища, рухались в напрямку на південний схід. Імовірність виникнення смерчу в Київській області на 1000 км² оцінюється рівною $1.4 \cdot 10^{-1}$ 1/рік, а на території ЧЗВ - $4 \cdot 10^{-2}$ 1/рік. Таким чином, існує вагома імовірність того, що смерч може утворитись або пронестись над частково висушене чашею водойми-охолоджувача ЧАЕС.

На території України спостерігаються смерчі з діаметрами в 10-300 м. Воронки смерчів утворюються в материнських хмарах на великих висотах не менше 13 км. Потім воронка опускається до поверхні землі і працює як насос. Швидкість руху повітря в смерчі від 360 до 1100 км/годину, а всередині смерчу виникає зона дуже низького тиску, яка затягує все, що виникає на його шляху. В результаті для ВО ЧАЕС найімовірнішим може бути сценарій утворення хвилі-цунамі яка здатна спричинити затоплення огорожувальної дамби та підняття і розповсюдження за периметр чаші водойми-охолоджувача твердих і рідких радіоактивних субстанцій.

Мета та задачі дослідження. Мета роботи визначається тим, що найбільш екологічно безпечною стратегією виведення ВО ЧАЕС з експлуатації, як показує світовий практичний досвід експлуатації радіоактивних екологічно небезпечних водойм, повинна бути стратегія, що здатна забезпечити можливість підживлення ВО ЧАЕС водою за

допомогою насосів. Таке підживлення необхідне для підтримки рівня води в чаші водойми-охолоджувача на рівні, що забезпечить максимальне екранування та уникнення виносу затоплюючою хвилею, а також вітрами і смерчами радіації, що знаходиться у воді та на дні ВО ЧАЕС. При цьому цілком очевидно, що цей рівень повинен бути завжди оптимальним і враховувати можливість виникнення та головні параметри хвилі затоплення.

Матеріали та методи дослідження. Основні положення методу моделювання хвилі в ВО під

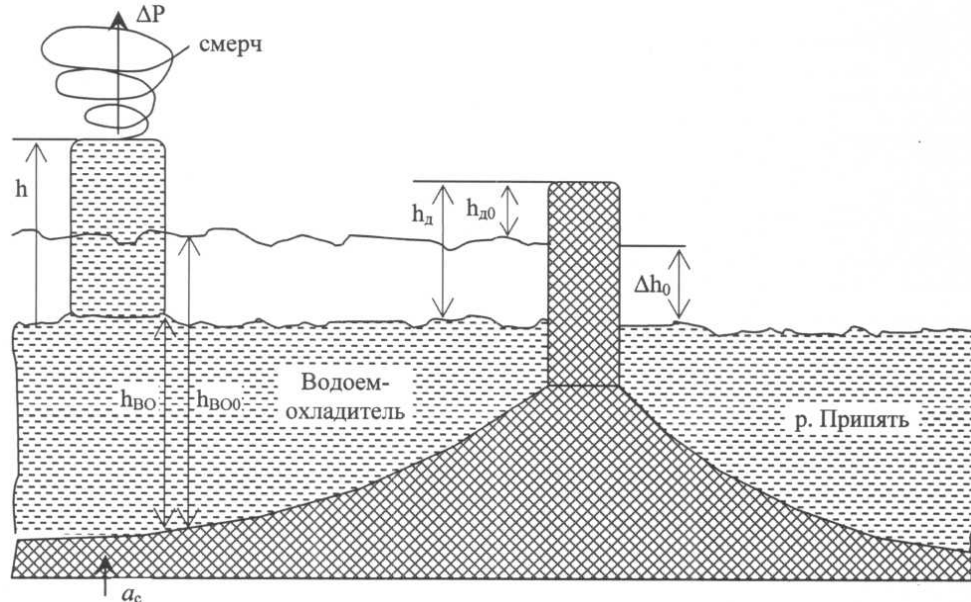


Рис. 1 – Розрахункова модель виникнення смерчу в водоймі-охолоджувачі ЧАЕС: $h_{до0}$ – проектний рівень поверхні води в ВО над поверхнею води в р. Прип'ять (~ 7 м); $h_{до}$ – висота дамби над рівнем води в частково осушеному ВО (максимальна висота ~ 3 м); h – поточна висота стовпа води над поверхнею води в ВО, сформованого в результаті смерчу; $h_{во0}$ – проектний рівень поверхні води ВО в Балтійській системі висот (~ 111,0 м БС); $h_{во}$ – поточний рівень води в частково осушеному ВО; ΔP – підйомна сила смерчу на одиницю поверхні; a_c – відгук прискорення землетрусу на дні ВО

Формуванню хвилі під впливом смерчу перешкоджають сили гідродинамічного розсіювання і вага стовпа хвилі над поверхнею ВО.

Хвиля утворювана смерчем моделюється як зосереджена система з усередненими гідродинамічними параметрами.

При моделюванні хвилі від смерчу в ВО приймаються наступні консервативні допущення, тобто «найгірші» умови щодо смерч небезпеки:

- процес формування хвилі від смерчу покладається ізотермічним а тепловими втратами енергії хвилі нехтується; щільність води в ВО р при її температурі в ВО;

- площа поверхні контакту епіцентру смерчу з поверхнею ВО значно менше загальної площі поверхні ВО а $h_{во} \sim h_{во0}$ (рис. 2);

- формування або проходження смерчу над поверхнею ВО відбувається в безпосередній близькості від дамби, яка відгороджує ВО від р. Прип'ять (рис. 2);

- перепад тиску ΔP між периферією і центром воронки смерчу приймається максимальним для кожного класу інтенсивності смерчу [4]: для F 1.0 $\Delta P = 31$ ГПа, для F 2.0 $\Delta P = 60$ ГПа, для F 3.0 $\Delta P = 104$ ГПа.

З урахуванням наведених вище припущень і положень рівняння утворення хвилі затоплення в ВО від впливу смерчу має вигляд [7]:

впливом смерчу полягають в наступному:

В результаті зародження або проходження вже сформованого смерчу над поверхнею води в ВО в результаті виникнення активного перемішування різногустинних і різнотемпературних шарів повітря виникають високошвидкісні обертання повітряних мас в епіцентрі смерчу, які створюють істотний перепад тиску ΔP на периферійній поверхні смерчу і визначають відповідну підйомну силу смерчу для виникнення вилі в ВО ЧАЕС (рис. 1).

$$\rho \frac{d}{dt} \left(h \frac{dh}{dt} \right) = \Delta P - \xi_r \rho \frac{d}{dt} \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 - \rho gh \quad (1)$$

при початкових умовах

$$h(t=0) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dh}{dt}(t=0) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d^2 h}{dt^2}(t=0) = 0 \quad (4)$$

Умова затоплення дамби хвилею утвореною смерчем:

$$h \geq h_{до} \quad (5)$$

де ρ – щільність водного середовища ВО; h – висота хвилі сформованої смерчем (рис. 2); t – поточний час; ΔP – перепад тиску на периферійно поверхні смерчу (рис. 2); ξ_r – приведений коефіцієнт гідродинамічної дисипації енергії при формуванні хвилі ВО від впливу

смерчу; g – прискорення сили тяжіння; $h_{до}$ – висота дамби над вихідною поверхнею рівня ВО.

Введемо далі безрозмірні параметри:

$$H = h/h_{до} \quad (6)$$

$$T = t/t_m \quad (7)$$

де t_m – часовий масштаб висоти хвилі сформованої смерчем.

Тоді рівняння хвилі сформованої смерчем в ВО в критеріальній формі має вигляд:

$$H \frac{d^2 H}{dT^2} + (1 + \xi_r) \left(\frac{dH}{dT} \right)^2 + K_g H = K_p \quad (8)$$

де

$$K_g = \frac{g t_m^2}{h_{до}}$$

$$K_p = \frac{\Delta P t_m^2}{\rho h_{до}^2}$$

При початкових умовах

$$H(T=0) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{dH}{dT}(T=0) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{d^2 H}{dT^2}(T=0) = 0 \quad (11)$$

З умови $K_g \approx 1$ впливає часовий масштаб хвилі затоплення дамби сформованої під впливом смерчу:

$$t_m = \sqrt{\frac{h_{до}}{g}} \quad (12)$$

Тоді рівняння (8) для хвилі затоплення в ВО сформованої під впливом смерчу:

$$H \frac{d^2 H}{dT^2} + (1 + \xi_r) \left(\frac{dH}{dT} \right)^2 + H = K_p \quad (13)$$

де

$$K_p = \frac{\Delta P}{\rho g h_{до}}$$

Аналіз результатів моделювання хвилі затоплення дамби водойми-охолоджувача Чорнобильської АЕС. Рівняння (13) при початкових умовах (9)–(11) є нелінійним диференціальним рівнянням 2-го порядку, яке не має аналітичних рішень. Тому рішення (9)–(13) виконувалось чисельним методом Рунге-Кутта з точністю розрахункового моделювання $\pm 10\%$.

Результати розрахункового моделювання динаміки хвилі затоплення в ВО під впливом смерчів з класом інтенсивності F1.0, F 2.0 і F 3.0 наведені на рис. 2.

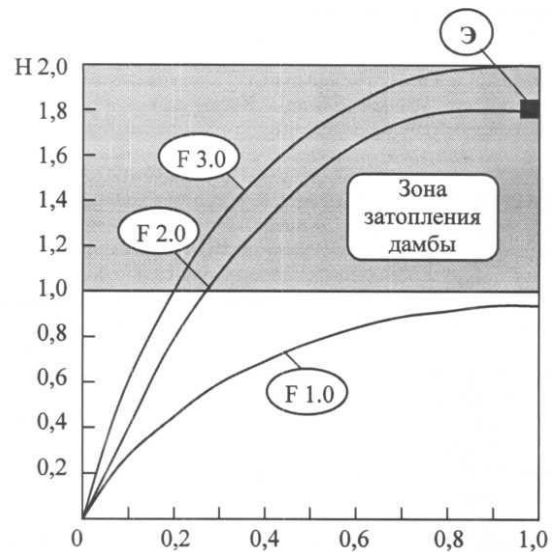


Рис. 2 – Динаміка висоти хвилі в ВО під дією смерчів з класами інтенсивності F 1.0, F 2.0 і F 3.0. Э – експериментальне значення висоти хвилі в долині річок Мацеста і Бзугу (Краснодарський край, $43^\circ 34/39^\circ 42$, 24.07.1991 р) під впливом смерчу 2-го класу інтенсивності (F 2.0)

Значення наведеного коефіцієнта гідродинамічної дисипації при формуванні хвилі в ВО під впливом смерчу визначалося на основі відповідності з відомими експериментальними даними по максимальній висоті хвилі від смерчу з класом потужності F-2.0 в долині річок Мацеста і Бзугу в Краснодарському краї, в районі міста Сочі, 24.07.1991р.). В результаті проведених варіаційних розрахунків було встановлено значення $\xi_r = 0,2$.

Аналіз отриманих результатів розрахункового моделювання впливу смерчів на ВО ЧАЕС дозволяє зробити наступні висновки:

1. Консервативне затоплення дамби при проектному рівні в ВО під впливом смерчу 1-го класу інтенсивності F 1.0 не відбувається.

2. При смерчах 2-го (F 2.0) і 3-го (F 3.0) класів інтенсивності і більше відбувається затоплення дамби ВО вже на початкових етапах формування хвилі від смерчу ($T < 0,3$). При цьому затоплення дамби ВО ЧАЕС призведе до потрапляння великої кількості радіоактивно забрудненого водного середовища в р. Прип'ять та до подальших небезпечних екологічних наслідків для навколишнього середовища.

3. Зняття з експлуатації ВО передбачає зниження проектного рівня води на 7м, тобто приблизно до рівня в р. Прип'ять. За таких умов консервативне затоплення дамби хвилею, створеною смерчем F 3.0, і класом нижче, згідно з отриманими результатами, не відбувається.

Аналіз результатів оцінок смерчонебезпеки для атомної енергетики України. Відповідно до статистичних даних для періоду 184-2001 рр., більшість ОВАЕ України знаходяться в смерч небезпечних районах в яких можливе утворення та проход-

ження смерчів з розрахунковим класом інтенсивності kr^3 з річною імовірністю виникнення смерч небезпечної події більше $PS = 10-4$ 1/рік [1].

До Фукусімської аварії оцінки смерчонебезпечної події для АЕС України виконувались в рамках звітів з аналізу безпеки при зовнішніх екстремальних впливах (ЗАБ ЗЕВ) [8]. Вплив смерчів на безпеку АЕС в ЗАБ ЗЕВ фактично характеризувався оцінкою сумарної імовірності виникнення смерчів (частоти проходження смерчів) в районі розташування АЕС при консервативному положенні, що виникнення смерчів різних класів інтенсивності, включаючи і смерчі з інтенсивністю менше 2-го класу, призводять до важких аварій. В результаті для ЗАЕС було встановлено, що смерчі привносять найбільший вклад з усіх можливих екстремальних природних явищ в ЧПАЗ для внутрішніх вихідних подій. А найкритичнішим для безпеки у разі впливу смерчів є системи нормального електрозабезпечення та технічного водо забезпечення відповідальних споживачів. Але разом з тим, на основі результатів консервативних оцінок відносно малого впливу смерчів на сумарну ЧПАЗ, відповідним протиаварійним організаційно-технічним заходам встановлений низький пріоритет. Аналогічні результати були отримані і для інших проммайданчиків АЕС України.

Проведені після Фукусімської аварії стрес-тести переоцінки безпеки атомної енергетики України з врахуванням уроків даної аварії [7,8] не виявили додаткових (нових) дефіцитів безпеки стосовно екстремальних природних явищ - в тому числі і смерчів.

У відношенні основних результатів оцінок смерч-небезпеки для АЕС України (до і після Фукусімської аварії) необхідно акцентувати увагу на наступне:

1. Оцінки ЗАБ ЗЕВ частоти проходження смерчів суперечать встановленим категоріям смерчонебезпечних зон. Так, для району ЗАЕС (зона Б підвищеної смерч небезпеки) клас інтенсивності смерчів дорівнює значенню $F = 3,58$ з частотою проходження $8,7 \times 10^{-3}$ 1/рік [1]. А в ЗАБ ЗЕВ $8,19 \times 10^{-7}$ 1/рік. Саме такі необґрунтовано низькі оцінки ЗАБ ЗЕВ частоти проходження смерчів дозволили отримати висновки про їхній відносно малий вплив на базову ЧПАЗ, навіть при надлишкових консервативних припущеннях по умовній імовірності пошкодження активної зони, у разі впливу смерчів – умовно прийнята рівною одиниці.

3. Недостатньо обґрунтованим є прийняте рішення про виключення з розгляду та аналізу аварійних подій з затоплюванням проммайданчиків АЕС, що можуть бути викликані в результаті впливу на них смерчів. Цей же висновок необхідно поширити і у відношенні смерчонебезпеки для радіоактивно забрудненої водойми-охолоджувача ЧАЭС.

Для прикладу можна навести смерчонебезпечну подію 24 липня 1991 року в районі долин річок Мацеста і Бзугу в Краснодарському краї. Смерч, що «вийшов» з моря, мав 2-й клас інтенсивності) підняв рівень води до 5 м, що призвело до значних руйнувань і людських жертв. На території бувшого СРСР було зафіксовано десятки подій, пов'язаних з насиченими водою смерчами не більше 2-го класу інтенсив-

ності з катастрофічними наслідками [1]. Так, для району розташування Запорізької АЕС при встановленому класі інтенсивності смерчу більшої за 3-й, питома (на одиницю поверхні) підйомна сила майже в 2,5 разів (109 ГПа) перевищувала відповідне значення в приведених відомих випадках. Тому є дуже важливим і необхідним проведення додаткового аналізу можливого затоплення проммайданчиків АЕС та інших навколишніх територій в смерч небезпечних районах України і в тому числі у разі спільного впливу смерчу з іншими екстремальними природними явищами.

Обговорення результатів дослідження. Одним з головних принципів уроків ядерної екологічної катастрофи на японській АЕС Фукусіма-1 є недопустимість виключення з розгляду моделювання, аналізу, протиаварійних заходів і іншого, по відношенню до впливів малоімовірних екстремальних природних явищ. Тому прийнята в Звітах з аналізу безпеки зовнішніх екстремальних впливів (ЗАБ ЗЕВ) низька пріоритетність розгляду впливу смерчів на безпеку АЕС є необґрунтованою, і особливо для тих випадків, коли об'єкти використання атомної енергії розташовані в районах з високою смерчонебезпекою.

До аналогічного висновку приводять також результати аналізу радіаційної катастрофи на радіоактивній водоймі В-9 ВО Маяк у 1967 році в СРСР яка виникла в результаті спільної дії аномально засушливих кліматичних умов в даному році та виникнення і проходження великих і малих смерчів через його акваторію та осушені ділянки берегів.

Висновки. Детерміністське моделювання та аналіз ЗЕВ на об'єкти атомної енергетики в тому числі і на водойми-охолоджувачі АЕС не проводилося і фактично зводилося до оцінок імовірності виникнення того або іншого зовнішнього екстремального впливу. При цьому використовувані в звітах з аналізу безпеки зовнішніх екстремальних впливів (ЗАБ ЗЕВ) імовірнісні оцінки частоти виникнення окремих екстремальних подій були явно занижені і суперечили результатам відомих геологічних, метеорологічних та екологічних досліджень, в тому числі і по відношенню до імовірності виникнення смерчів та інших екстремальних зовнішніх впливів [7, 8].

Уроки аварії на АЕС Фукусіма-Даїчі змусили все світове ядерне співтовариство повністю переглянути традиційні підходи щодо моделювання та аналізу вплив ЗЕВ на екологічну безпеку об'єктів атомної енергетики. У разі оцінки впливу ЗЕВ на екологічну безпеку консервативно припускалось, що виникнення будь-якого ЗЕВ призводить до важких аварій з пошкодженням ядерного палива. Однак оскільки використовується сумарна ймовірність виникнення ЗЕВ становила не більш 19 % від сумарної ЧПАЗ, то впливом ЗЕВ на безпеку АЕС фактично нехтувалось. Але цей висновок ніяк не відноситься до результатів можливого впливу ЗЕВ на водойми-охолоджувачі АЕС і в першу чергу до ВО ЧАЭС. Саме тому виникла необхідність переоцінки безпеки всіх українських АЕС з врахуванням наукового обґрунтування характеристик смерч небезпечних зон та найголовніших уроків Фукусімської аварії по відношенню до дуже мало імовірних екстремальних природних явищ і впливів.

Зняття з експлуатації ВО передбачає зниження проектного рівня води на 7м, тобто приблизно до рівня в р. Прип'ять. За таких умов консервативне затоплення дамби хвилею, створеною смерчем F 3.0, і класом нижче, згідно з отриманими результатами, не відбувається.

Консервативне затоплення дамби при проектному рівні в ВО під впливом смерчу 1-го класу інтенсивності F 1.0 не відбувається.

При смерчах 2-го (F 2.0) і 3-го (F 3.0) класів інтенсивності і більше відбувається затоплення дамби ВО вже на початкових етапах формування хвилі від смерчу ($T < 0,3$). При цьому затоплення дамби ВО ЧАЕС призведе до потрапляння великої кількості радіоактивно забрудненого водного середовища в р. Прип'ять та до подальших небезпечних екологічних наслідків для навколишнього середовища.

Список літератури:

1. Рекомендации по оценке характеристик смерча для объектов использования атомной энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/46/46587/index.php
2. Учет экстремальных метеорологических явлений при выборе площадок АЭС (без учета тропических циклонов). Руководство по безопасности [Текст]. – Вена: МАГАТЭ, 1983. – 76 с.
3. Наказ N 64 від 21.10.2002 р. Про Основні нормативні вимоги та розрахункові характеристики смерчів для майданчика Чорнобильської АЕС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://text.normativ.ua/doc10305.php>
4. Талерко, Н. Н. Прогнозная оценка трансграничного переноса радионуклидов вследствие прохождения смерча над водоемом-охладителем ЧАЭС [Текст] / Н. Н. Талерко, Е. К. Гаргер, А. Г. Кузьменко // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. – 2013. – № 20. – С. 85–93.
5. Про визначення критичних подій, які мають бути розглянуті при розробці проектної документації на вивід з експлуатації водойми-охолоджувача Чорнобильської АЕС і вимог щодо радіаційних критеріїв кінцевого стану території: пояснювальна записка до технічного рішення за № 02-ГУПС.7 [Текст]. – ДСП ЧАЕС, 2012 – 23 с.
6. Скалозубов, В. И. Комплекс методов переоценки безопасности атомной энергетики Украины с учетом уроков экологических катастроф в чернобыле и Фукусиме [Текст] / В. И. Скалозубов, Г. А. Оборский, И. Л. Козлов. – Одесса: Астопринт, 2013. – 244 с.
7. Брюхань, Ф. Ф. Смерчопасные зоны в СССР и размещение атомных станций [Текст] / Ф. Ф. Брюхань, М. Е. Ляхов, В. Н. Попробняк // Известие АН СССР. Серия география. – 1989. – № 1. – С. 40–48.
8. Скалозубов, В. И. Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР [Текст] / В. И.

9. Скалозубов, А. А. Ключников, Ю. А. Комаров, А. В. Шавлаков. – Чернобыль: Институт проблем безопасности, 2010. – 200 с.
9. Козлов, И. Критерии затопления площадок АЭС совместным воздействием смерчей и землетрясений в пруде-охладителе [Текст] / И. Козлов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 3/6 (75). – С. 53–58. doi: [10.15587/1729-4061.2015.42146](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42146)
10. Козлов, И. Обзор направлений совершенствования моделирования тяжелых аварий с учетом опыта АЭС Tree Mile Island [Текст] / И. Козлов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 5/10 (77). – С. 54–59. doi: [10.15587/1729-4061.2015.42145](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42145)

Bibliography (transliterated):

1. Rekomendacii po ocenke harakteristik smercha dlja obektov ispol'zovanija atomnoj jenerгии. Available at: http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/46/46587/index.php
2. Uchet jekstremal'nyh meteorologicheskikh javlenij pri vybore ploshhadok AJeS (bez ucheta tropicheskikh ciklonov). Rukovodstvo po bezopasnosti (1983). Vena: MAGATJe, 76.
3. Nakaz N 64 vid 21.10.2002 r. Pro Osnovni normatyvni vy'mogy' ta rozrakhunkovy harakterystyky' smerchiv dlya majdanchy'ka Chornoby'l's'koyi AES. Available at: <http://text.normativ.ua/doc10305.php>
4. Talerko, N. N., Garger, E. K., Kuz'menko, A. G. (2013). Prognoznaja ocenka transgranichnogo perenosu radionuklidov vsledstvie prohozhdenija smercha nad vodoemeom-ohladiatelyem ChAJeS. Problemy bezopasnosti atomnyh jelektrostancij i Chernobylja, 20, 85–93.
5. Pro vy'znachennya kry'ty'chny'x podij, yaki mayut' buty' rozglyanuti pry' rozrobci proektnoyi dokumentaciyi na vy'vid z ekspluataciyi vodojmy'-oxolodzhuvacha Chornoby'l's'koyi AES i vy'mog shhodo radiacijny'x kry'teriyiv kincevogo stanu tery'torij: pojasnyval'na zapy'ska do technichnogo rishennya za N 02-GUPS.7. (2012). DSP ChAES, 23.
6. Skalozubov, V. I., Oborskij, G. A., Kozlov, I. L. (2013). Kompleks metodov pereocenkы bezopasnosti atomnoj jenergetiki Ukrainy s uchetoм urokov jekologicheskikh katastrof v chernobylye i Fukusime. Odessa: Astoprint, 244.
7. Brjuhan', F. F., Ljahov, M. E., Pogrebnyak, V. N. (1989). Smercheopasnye zony v SSSR i razmeshhenie atomnyh Izvestie AN SSSR. Serija geografija, 1, 40–48.
8. Skalozubov, V. I., Kljuchnikov, A. A., Komarov, Ju. A., Shavlakov, A. V. (2010). Nauchno-tehnicheskie osnovy meroprijatij povyshenija bezopasnosti AJeS s VVJeR. Chernoby'l: Institut problem bezopasnosti, 200.
9. Kozlov, I. L. (2015). Criteria for NPP industrial site flooding by combined impact of tornadoes and earthquakes in the cooling pond. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(6(75)), 53–58. doi: [10.15587/1729-4061.2015.42146](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42146)
10. Kozlov, I. L. (2015). Overview of directions of improving the simulation of severe accidents based on the experience of the Tree Mile Island NPP. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(10(77)), 54. doi: [10.15587/1729-4061.2015.42145](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42145)

Надійшла (received) 18.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Детерміністський метод моделювання впливу смерчів на водойму-охолоджувач чорнобильської АЕС / В. М. Ващенко, І. Б. Кордуба, А. А. Гудима // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 49(1221). – С.106–112. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Детерминистский метод моделирования воздействия смерчей на водоем-охладитель Чернобыльской АЭС / В. Н. Ващенко, И. Б. Кордуба, А. А. Гудима // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 49(1221). – С.106–112. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Deterministic modeling method of tornado impact at chernobyl NPP coolant pond / V. Vashchenko, I.

Korduba, A. Gudyma //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.106–112. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ващенко Володимир Миколайович – доктор фізико-математичних наук, професор, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління; вул. Митрополита Василя Липківського, 35, м. Київ, Україна, 03035; e-mail: danileo@ukr.net

Ващенко Владимир Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор, Государственная экологическая академия последипломного образования и управления; ул. Митрополита Василия Липковского, 35, г. Киев, Украина, 03035; e-mail: danileo@ukr.net

Vashchenko Volodymyr – doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, State Ecological Academy of Post-Graduate Education and Management; V. Lypkivskogo str., 35, Kyiv, Ukraine, 03035; e-mail: danileo@ukr.net

Кордуба Ирина Богданова – аспірант, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління; вул. Митрополита Василя Липківського, 35, м. Київ, Україна, 03035

Кордуба Ирина Богданова – аспирант, Государственная экологическая академия последипломного образования и управления, ул. Митрополита Василия Липковского, 35, г. Киев, Украина, 03035

Korduba Irina – graduate student, State Ecological Academy of Post-Graduate Education and Management; V. Lypkivskogo str., 35, Kyiv, Ukraine, 03035.

Гудима Алла Анатоліївна – кандидат технічних наук, Державна інспекція ядерного регулювання України; вул. Арсенальна, 9/11, м. Київ, 01011.

Гудима Алла Анатольевна – кандидат технических наук, Государственная инспекция ядерного регулирования Украины; ул. Арсенальная, 9/11, г. Киев, 01011.

Gudyma Alla – PhD, State Inspectorate of Nuclear Regulation of Ukraine; Arsenalnaya str., 9/11, Kyiv, Ukraine, 01011.

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ

УДК 629.331

АМИНЕ ХАДИ, Н. И. КОСАЧ

ОЦЕНКА РИСКОВ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Рассматривается оценка рисков при определении качества продукции автомобильной промышленности. Исследования показали, что при многопараметрическом контроле качества изделий автомобильной промышленности целесообразно применять модель равномерного распределения случайной величины, которая позволит получить максимальные оценки показателей достоверности результатов контроля ее качества. Разработанная модель потребительской оценки качества продукции охватывает большое количество параметров, по которым можно получить общую оценку качества продукции.

Ключевые слова: оценка, риски, качество, продукция, потребительская оценка качества.

Розглядається оцінка ризиків при визначенні якості продукції автомобільної промисловості. Дослідження показали, що при багатопараметричному контролі якості виробів автомобільної промисловості доцільно застосовувати модель рівномірного розподілу випадкової величини, яка дозволить отримати максимальні оцінки показників достовірності результатів контролю її якості. Розроблена модель споживчої оцінки якості продукції охоплює велику кількість параметрів, за якими можна отримати загальну оцінку якості продукції.

Ключові слова: оцінка, ризики, якість, продукція, споживча оцінка якості.

We consider the risk assessment in determining the quality of products the automotive industry. Studies have shown that when multiparameter quality control of automotive industry products appropriate to apply the model uniform distribution of a random variable, which will maximize the reliability of evaluation indicators for monitoring the quality of results. The model developed consumer assessment of the quality of products covers a large number of parameters that you can get an overall assessment of the quality of products.

Keywords: assessment, risks, quality, products, consumer quality assessment.

Введение. В настоящее время, во всем мире уделяют большое внимание качеству продукции. Это связано с тем, что качество продукции определяет, в частности, уровень жизни людей. Повышение качества продукции является одним из наиболее важных и сложных направлений работы предприятия, а анализ ее качества имеет своей целью оценить и повысить её конкурентоспособность. Обычно качество продукции определяет по сортности, категориям, на основе бальной оценки и т.д.

Целью и задачей данной работы является определение рисков при комплексной оценке качества продукции автомобильной промышленности и обоснование возможных методов для их оценки. Для решения данной задачи необходимо провести исследования показателей оценки рисков при комплексной оценке качества продукции автомобильной промышленности и разработать модели потребительской оценки ее качества.

Как известно, в условиях жесткой конкуренции на современных автомобильных рынках наблюдается значительное усиление роли бизнес-потребителей, в связи с чем возникает необходимость формирования стратегии управления взаимоотношениями с ними. Эффективное выстраивание взаимоотношений с потребителями и постоянное взаимодействие с ними позволяет своевременно и качественно удовлетворять их потребности, что, в свою очередь, способствует повышению качества продукции и, как следствие, удержанию и повышению лояльности потребителей.

Несмотря на то, что вопросам взаимоотношений с потребителями посвящено немало научных трудов и разработан большой арсенал статистических методов оценки качества продукции, проблема ее оценки на ос-

нове взаимоотношений с потребителями и степени их удовлетворенности остается до конца не изученной.

Стандарт ISO 9001 требует, чтобы предприятие было ориентировано на удовлетворение интересов потребителей. Однако, требование стандарта может быть выполнено только в том случае, если предусмотрены соответствующие методы проверки полноты его реализации. Потребности и ожидания потребителей должны быть документально оформлены и преобразованы в конкретные требования к продукции. Установив потребности, предпочтения и ожидания потребителей, следует использовать их в качестве дополнительных данных для повышения качества продукции. Так вырабатываются те требования, выполнения которых ждет от вас потребитель. Основная задача заключается в передаче требований потребителям в производственные службы. Передача подобной информации представляет собой важный аспект любого бизнеса [1].

Как было отмечено, качество продукции является одним из самых важных факторов ее конкурентоспособности и каждая организация, заинтересованная в рынке сбыта, должна разрабатывать и внедрять эффективные системы управления качеством своей продукции.

В наиболее общем смысле управление качеством это управление теми факторами и условиями, которые наиболее существенно влияют на уровень качества продукции. Традиционное понятие «система обеспечения качества» за последние годы изменилась на понятие «система управления качеством», которая охватывает всю организацию управления предприятием (ответственность, методы, процессы), которое направлено на надежное выполнение требований ка-

чества, приняты все меры по действенному и эффективному выполнению целей, определенных в политике качества.

Одним из методов повышения качества является оценка рисков. Оценка риска – это совокупность аналитических мероприятий, позволяющих спрогнозировать возможность получения дополнительного предпринимательского дохода или определенной величины ущерба от возникшей рискованной ситуации и несвоевременного принятия мер по его предотвращению [2]. Определение эффекта от повышения качества продукции достаточно затруднительно, что обусловлено ограниченной информационной базой. Всю необходимую информацию для данных расчетов можно получить только в тех службах, которые фиксируют рекламации на продукцию и пожелания потребителей. При анализе поступивших рекламаций устанавливается и вид зарекламованной продукции, дата ее выпуска, включая и время производства, а так же причина рекламации.

Информационной основой при этом служит не только периоды времени, в течение которых рекламации получены, но и периоды изготовления зарекламованной продукции. Сгруппировав некачественную продукцию по времени выпуска необходимо произвести анализ дефектов, причины их возникновения и другие мероприятия. Однако контроль качества сложной продукции, особенно с учетом оценки потребителей, могут привести к недостоверному результату. При этом возникают ошибки 1-го рода (годную продукцию признают негодной) и 2-го рода (негодную продукцию признают годной), что приводит к снижению качества продукции и экономическим потерям как производителя, так и потребителя [3].

Вероятность этих ошибок и связанные с ними потери целесообразно минимизировать, установив оптимальные требования к точности оценивания, что вызывает определенные сложности, так как погрешность оценивания (контроля) является случайной величиной с неизвестным, предположительно симметричным, распределением [4].

Применение стандарта ISO 31000 [5] позволяет достаточно эффективно выявлять и в условиях полной неопределенности эффективно управлять рисками, влияющими на достижение целей и деятельность организаций, в частности, на их экономическую эффективность, деловую репутацию, окружающую природную среду, безопасность персонала и социальные последствия. В данном стандарте также представляются рекомендации по разработке, внедрению и постоянному совершенствованию структуры, цель которой заключается в интеграции процесса управления рисками в общую схему управления, формирование стратегии, а также планирование, управление, процессы, политику, ценности и культуру организации. Положения стандарта ISO 31000 могут быть применены к любому типу риска, независимо от его происхождения, имеющего положительные или отрицательные последствия [5].

Качество выпускаемой продукции обычно характеризуется несколькими параметрами, которые могут быть как связанными друг с другом, так и статистически независимыми. Согласно документам, регламен-

тирующим требования к продукции, каждый из параметров имеет установленные границы поля допуска. При выходе за границы любого из параметров продукция признается негодной. Достоверность же результатов контроля характеризуется несколькими установленными для каждой продукции показателями [6].

При серийном выпуске продукции основными рисками являются риски заказчика (потребителя) (R_z) и риск производителя (R_p). Риск потребителя – это условная вероятность того, что продукция является фактически негодной при условии, что она в результате контроля признана годной. Эта вероятность характеризует возможную среднюю долю негодной продукции среди всей продукции, признанной годной (поступившей потребителю). Риск производителя – это вероятность забраковать при контроле годную продукцию и характеризует среднюю долю ошибочно забракованной годной продукции среди всей поступившей на контроль [7].

В качестве показателя достоверности контроля качества продукции используют, в частности, вероятность ее признания годной при условии, что она фактически негодная (P_2).

Оценки этих показателей достоверности контроля определяются по формулам [8]:

$$R_z = N_{н.пг} / N_{пг}, \quad (1)$$

$$R_p = N_{г.пн} / N, \quad (2)$$

$$P_2 = N_{н.пг} / N_{н}, \quad (3)$$

где N – общее число контролируемой продукции (изделий); $N_{пг}$ – число изделий признанных годными, $N_{н}$ – число изделий негодных в исследуемой партии, $N_{н.пг}$ – число негодных изделий, признанных при контроле годными, $N_{г.пн}$ – число годных изделий, признанных при контроле негодными.

При большом значении N полученные оценки будут близки к точным значениям показателей достоверности контроля.

Использование вероятностного подхода к оценке достоверности результатов контроля прежде всего предполагает выбор модели закона распределения погрешности контроля.

При разработке методики многопараметрического контроля продукции целесообразно применять модель погрешности контроля в виде равномерно распределенной случайной величины. При этом будут получены максимальные оценки показателей достоверности результатов контроля.

Вместе с тем уровень надёжности контроля продукции отражает коэффициент надёжности (эксплуатационный), который можно определить по формуле [9]:

$$K_n = (T_p - T_{пр}) : T_p, \quad (4)$$

где K_n – коэффициент эксплуатационной надёжности; T_p – время работы, в частности автомобиля, включая простои по организационно-техническим причинам; $T_{пр}$ – время простоя автомобиля, связанное с устранением поломок, неисправностей.

Проведение функционального анализа качества позволяет ещё на стадии конструкторской и технологической разработки обеспечить соответствующее качество продукции, снизить затраты на её производство.

Характеристику качества выпускаемой продукции и суммарный эффект от роста ее качества можно определить как индекс качества (I_k) на основе средне-взвешенной величины между ростом потребительских свойств и полученной эффективности от каждого процента роста потребительских свойств продукции:

$$I_k = (K_1 \times \mathcal{E}_1 + K_2 \times \mathcal{E}_2 + \dots + K_n \times \mathcal{E}_n) / (\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_n), \quad (5)$$

где K_1, K_2, K_n – коэффициент роста качества по отдельным параметрам изделия; $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_n$ – эффект, полученный от роста качества на 1%; n – количество учитываемых при оценке качества параметров эффективности.

Схема анализа качества продукции и выполняемых работ представлена на рис. 1.

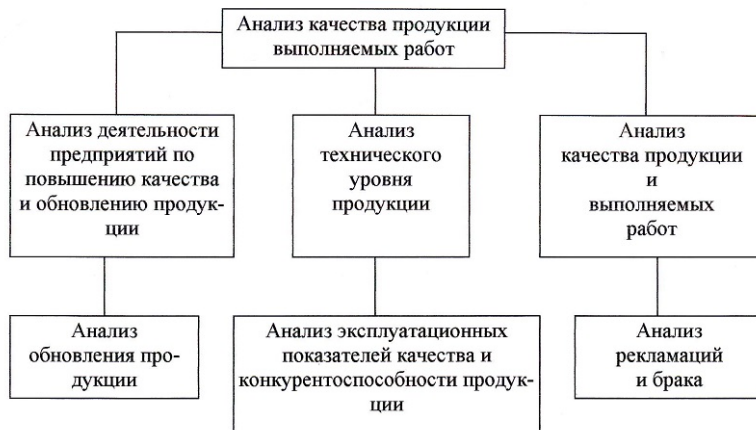


Рис. 1 – Анализ качества продукции и выполняемых работ

Повышению качеству продукции способствует проводимый на предприятиях анализ ее качества, при котором выявляются продукция, имеющая наивысшие показатели качества. При этом удельный вес продукции с наивысшим показателем качества в общем числе продукции является одним из важных показателей, по которому можно судить о качестве продукции в целом. Увеличение удельного веса высококачественной продукции свидетельствует о положительной работе предприятия, направленной на повышение ее качества.

Анализ качества продукции обычно увязывают с производственным браком. Выпуск некачественной продукции и брак – взаимосвязанные явления. При этом следует иметь в виду, что производственный брак характеризует главным образом не качество продукции, а качество труда работников предприятия. Но не учитывать это нельзя, т.к. брак не всегда можно выявить при контроле продукции на предприятии он может проявиться уже при эксплуатации продукции.

Потери в выпуске продукции за счёт брака ($\Delta\Pi_6$) можно определить по формуле [10]:

$$\Delta\Pi_6 = (\Pi_6 \times \Pi_{ф\text{плц}}) / 100, \quad (6)$$

где Π_6 – процент брака; $\Pi_{ф\text{плц}}$ – фактический объём товарной продукции в плановых ценах.

Изменение в качестве выпускаемой продукции можно установить по количеству рекламаций и стоимости гарантийного ремонта. Рекламация – это официально предъявленная претензия потребителя поставщику в связи с поставкой продукции, не отвечающей заданным требованиям. Уменьшение или отсутствие рекламации свидетельствует об улучшении работы, о повышении качества продукции, их увеличение означает ухудшение на предприятии дел с обеспечением выпуска качественной продукции. Коэффициент качества (K_k) в этом случае рассчитывается по формуле [11]:

$$K_k = 1 - (C_3 + C_{гр} + \Pi_p) / C_{пр}, \quad (7)$$

где C_3 – себестоимость окончательно забракованной продукции; $C_{гр}$ – стоимость гарантийного ремонта; Π_p – стоимость продукции по которой приняты рекламации; $C_{пр}$ – производственная себестоимость.

В процессе анализа качества продукции фиксируют не только рост или сокращение рекламаций, но и исследуют вызвавшие их причины, разрабатывают действенные меры по обеспечению качества продукции. Исходя из имеющейся информации и на основе её анализа предприятие может более эффективно проводить соответствующие мероприятия по снижению непроизводительных расходов.

Контроль за информацией по удовлетворенности и (или) неудовлетворенности потребителей является одним из способов оценки работы системы управления качеством.

Контролирование удовлетворенности потребителей – это оценивание информации от потребителей – выполняются или не выполняются их требования.

Слишком часто предприятия осознают необходимость подстраиваться под потребности, предпочтения и ожидания потребителей только после того, как начнут их терять. Необходимо стремиться к тому, чтобы предоставлять товары или услуги, отвечающие любым возможным потребностям, и пытаться как можно полнее соответствовать предпочтениям клиентов.

Для этого необходимо, чтобы персонал, занимающийся продажами, передавал полный набор сведений о нуждах и требованиях потребителей сотрудникам производственных подразделений, а также – подробные данные о всех изменениях, внесенных в заказы; организовать прохождение встречного потока информации от производственных подразделений к персоналу, занимающемуся продажами, для выявления неясностей в заказах, а также о невозможности выполнить отдельные принятые обязательства; в организации может быть несколько групп производственного персонала, и в этих случаях должен быть налажен четкий обмен информацией между ними с учетом всех требований, изложенных выше; переда-

вать данные о степени удовлетворенности потребителей всем, кого это касается [12].

При этом должны передаваться сведения, как об успехах, так и о неудачах предприятия; наличие хороших вертикальных коммуникаций между руководителями и подчиненными и наоборот. Зачастую руководители не склонны прислушиваться к мнению подчиненных, хотя именно работники, занятые в производственных процессах, знают свою работу лучше всех остальных сотрудников организации. Поэтому к ним необходимо прислушиваться и действовать в соответствии с их советами.

Процесс контроля удовлетворенности потребителя состоит в организации постоянного наблюдения за восприятием потребителями (внешними и внутренними) степени выполнения их требований и ожиданий. Этот процесс, включает в себя анализ входных данных для выявления проблем, оценки необходимости изменений и принятия корректирующих и предупреждающих действий [13].

Анализ модели профиля удовлетворенности потребителя позволяет сформулировать следующие положения:

1) потребительская оценка интегрального качества продукции R^u представляет собой комплексную оценку качества за тремя составляющими профиля качества продукции:

- базовое качество R^B ;
- нужное качество R^T ;
- желательное качество R^D ;

2) потребитель оценивает интегральное качество продукции R^T за шкалой удовлетворенности (шкала отношений);

3) соответственно аксиоме существования базы сравнения: любая операция сравнения всегда происходит по наличию определенной базы сравнения [14]:

$$\theta_{sr} \exists! B_s, \theta_{sr} / B_s; \theta_{sr} \leftrightarrow \exists! B_s, \theta_{sr} / B_s, \quad (8)$$

где θ_{sr} / B_s – операция сравнения соответственно данной базе сравнения B_s ; B_s / θ_{sr} – база сравнения, которое определяется данной операцией сравнения; B_s – база сравнения; θ_{sr} – операция сравнения.

Потребитель использует три базы сравнения:

- 1 – B_s для оценки базового уровня качества R^B ,
- 2 – B_s^n для оценки нужного уровня качества R^T ,
- 3 – B_s для оценки желательного уровня качества R^D .

Зависимость потребительской оценки продукции от величины базового уровня R^B определяется тем, что уровень неудовлетворенности качества продукции снижается с повышением базового уровня качества. Зависимость потребительской оценки продукции от величины базового уровня R^n определяется следующей зависимостью: уровень удовлетворенности качества продукции возрастает с увеличением нужного уровня качества. Зависимость потребительской оценки продукции от величины базового уровня R^D определяется тем, что уровень удовлетворенности скачкообразно возрастает при наличии желательного уровня качества.

Комплексную потребительскую оценку S интегрального качества продукции R^u можно определить на основе следующей зависимости:

$$P = \begin{cases} P^B, P^B < 0 \\ P^T \vee P^D, P^B > 0 \end{cases}, \quad (9)$$

где P^B – оценка базового качества объекта; P^T – оценка нужного качества объекта; P^D – оценка желательного уровня качества.

Таким образом, при достижении базового уровня качества продукции, основу оценки потребителя составляют показатели и их уровни, которые относятся к нужному и желательному уровню качества. В основе отрицательной оценки потребителя лежит отличная от нуля оценка продукции за базовым уровнем качества.

Итак, для решения задачи приняты следующие предположения:

1) потребитель выступает субъектом оценки и носителем системы сравнения S_r ;

2) результатом влияния данных мотивационных факторов является система потребительской оценки (сравнение) S_r ;

3) объект оценки Ob и его ряд аналогов принадлежит к одной ценовой категории, которую может приобрести потребитель со средним уровнем благосостояния;

4) влияние аналогичной продукции другого ценового диапазона на характер оценки несущественный;

5) порядок оценки потребителем интегрального качества продукции R^u соответственно профилю качества следующий: R^B, P^T, P^D .

Введение данных предположений предусматривает проведение экспериментальных исследований с целью уточнения результатов решения задачи, полученного аналитическим путем.

Основными положениями качества, которые будут использоваться дальше, являются [15]:

- 1) границы сравнения качества (Ак-1);
- 2) аксиомы существования базы сравнения (Ак-2);
- 3) аксиомы абсолютности сравнения (Ак-3): несоразмерность абсолютная, несоразмерность относительная;

4) аксиома сравнительного характера оценок (Ак-4): оценка качества всегда включает в себя операции сравнения, а система сравнения качеств S_r при оценке становится системой оценивания качества;

5) аксиома конъюнктивной дистрибутивности преимуществ дизъюнктивных свойств (Ак-5);

6) аксиома независимости преимуществ от других свойств, которые не сравниваются (Ак-6);

7) теорема субъективности оценок (Трм -1): любая оценка зависит от субъекта оценки;

8) теорема побежалости оценки во времени: оценка качества зависит от момента времени оценивания;

9) теорема Шпильрайна (Трм-3): любая квалиметрическая шкала может быть расширена до квалиметрической шкалы линейного порядка. Т.е., преимущества (оценочные отношения) потребителя являются квалиметрическими (факторно-критериальными) шкалами.

Итак, решение задачи относительного снижения величины «разрыва» между оценкой потребителя и

производителя сводится к определению механизма формирования уровней потребительского профиля качества, систем сравнения каждого уровня, т.е., $S_r = \langle S_b, O_b, B_s, \theta_{sr} \rangle$ и дальнейшего закрепления данного механизма в виде экспертной оценки, которая разрешит производителю моделировать оценку качества продукции потребителем.

Для этого используются принятые предположения, аксиомы, теоремы, состав профиля качества, которые указывают на вид базы сравнения потребителя и взаимосвязь между оценками качества продукции. Данные положения положены в основу разработанной модели потребительского профиля качества [16-17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{\mu_{\min}\} \cup \left\{ \frac{1}{\mu'_{\min}} \right\} \cup \left\{ \frac{1}{\mu'_{\max}} \right\} \cup \{\mu'_L\} \cup \{\mu'_S\} \in \{B_s^B\} \\ \{\mu_{\min}\} \cup \{\mu_0\} \cup \{\mu'_L\} \cup \{\mu'_S\} \in \{B_s^T\} \\ \{\mu_{\min}\} \cup \{\mu_0\} \in \{B_s^D\} \\ \{B_s^B\} \subset \{B_s\}; \{B_s^T\} \subset \{B_s\}; \{B_s^D\} \subset \{B_s\} \end{array} \right. , \quad (10)$$

где триада $\mu_{\text{опт}}, \mu_L, \mu_S$ – база сравнения для оценки элементарных свойств r_q и соответствует диапазону положительной реакции потребителя; $\{B_s^B\}$ – базовые параметры качества уровня базового профиля; $\{B_s^T\}$ – базовые параметры качества уровня нужного профиля; $\{B_s^D\}$ – базовые параметры качества уровня желательного профиля; B_s – базовые параметры качества профиля качества потребителя.

Исходя из модели профиля качества потребителя (10), можно определить за какими критериями будут формироваться уровни профиля качества потребителя.

Состав уровней профиля качества продукции согласно принятой модели (10) определяется следующим образом:

1. К базовому уровню профиля качества относятся свойства, показатели качества которых вызывают отрицательную реакцию потребителя, и могут быть определены следующим образом:

$$\mu_{\text{я}} \in \{\mu_0^B\}, \left\{ \begin{array}{l} \mu_{\text{я}} \in \{\mu_i\}, \exists S_r^s, y_i^m(\mu_{\text{я}}) \leq 0 \\ \mu_{\text{я}} \in \{\mu_j\}, \exists S_r^s, y_j^m(\mu_{\text{я}}) \leq 0 \\ \mu_{\text{я}} \in \{\mu_q\}, \exists S_r^s, y_q^m(\mu_{\text{я}}) \leq 0 \end{array} \right. , \quad (11)$$

где S_r^s – система оценки конкретного свойства; $\mu_{\text{я}}$ – параметр качества свойства r_q ; $\{\mu_0^B\}$ – множество параметров качества, которое относится к базовому уровню профиля качества потребителя.

2. К нужному уровню профиля качества относятся свойства, показатели качества которых вызывают положительную реакцию потребителя, и которые можно определить следующим образом:

$$\mu_{\text{я}} \in \{\mu_0^T\}, \left\{ \begin{array}{l} \mu_{\text{я}} \in \{\mu_i\}, \exists S_r^s, y_i^m(\mu_{\text{я}}) > 0 \\ \mu_{\text{я}} \in \{\mu_q\}, \exists S_r^s, y_q^m(\mu_{\text{я}}) > 0 \end{array} \right. , \quad (12)$$

где $\{\mu_0^T\}$ – множество параметров качества, которые относятся к нужному уровню профиля качества потребителя.

3. К желательному уровню профиля качества относятся свойства, показатели качества которых вызывают максимально положительную реакцию потребителя (насыщение), и могут быть определены следующим образом:

$$\mu_{\text{я}} \in \{\mu_0^D\}, \left\{ \begin{array}{l} \mu_{\text{я}} \in \{\mu_i\}, \exists S_r^s, y_i^m(\mu_{\text{я}}) \gg \mu_0^D \\ \mu_{\text{я}} \in \{\mu_i\}, B_s = 0 \end{array} \right. \quad (13)$$

где $\{\mu_0^D\}$ – множество параметров качества, которые относятся к желательному уровню профиля качества потребителя.

Разработанная модель потребительской оценки качества продукции охватывает большое количество оценок продукции, а расчет итоговой оценки качества может быть выполнен для любой продукции. Тем не менее, поскольку построение модели потребительской оценки качества выполнялось с рядом предположений, то для точности результатов возникает необходимость проведения ее экспериментальной проверки.

Выводы.

1. Существует достаточно большое количество методик оценки рисков. Однако, при разработке методики многопараметрического контроля качества продукции целесообразно применять систему опроса в виде равномерно распределенной случайной величины с максимальными оценками показателей достоверности результатов контроля качества.

2. Разработанная модель потребительской оценки качества продукции учитывает большое количество входящих параметров, на основе которых можно рассчитать общую оценку качества продукции с учетом рисков.

Список литературы:

1. Горбунов, А. МЕЖДУНАРОДНЫЙ СТАНДАРТ ISO 9000 Системы менеджмента качества – Основные положения и словарь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-9000-2015-rus.pdf>
2. Астанина, М. А. Система аудита качества: когнитивный подход [Текст] / М. А. Астанина. – Москва: МИСАО, 2014. – 108 с.
3. Евдокимова, Л. И. Комплексная оценка динамики эффективности работы предприятия как инструментарий активизации аналитической деятельности на промышленном предприятии [Текст]: дис. ... канд. Эконом. наук / Л. И. Евдокимова. – Москва, 2015. – 150 с.
4. Захаров, М. Г. Система качества – это инструмент самосохранения предприятия в условиях кризиса [Текст] / М. Г. Захаров // Стандарты и качество. – 2010. – № 2. – С. 34–35.
5. ISO 31000-2009. Risk Management – Principles & Guidelines [Electronic resource]. – Available at: http://www.dvbi.ru/risk_management/library/tabid/213/Token/ViewInfo/ItemId/14/
6. Зекунов, А. Г. Управление качеством [Текст]: монография / А. Г. Зекунов, В. Н. Иванов, В. М. Мишин, Ю. В. Пазюк, Т. И. Власова. – Москва: Юрайт, 2015. – 475 с.
7. Медунецкий, В. М. Основы обеспечения качества и сертификация промышленных изделий [Текст]: учебн. пос. / В. М. Медунецкий. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. – 61 с.
8. Казанцев, С. А. Створення науково-методичних та нормативних засад фахових систем сертифікації [Текст]: автореф. дис... канд. техн. наук : 05.01.02 / С. А. Казанцев. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2008. – 20 с.

9. ISO 9000:2005. Quality management systems – Fundamentals and vocabulary [Electronic resource]. – Available at: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=42180
10. Медунецький, В. М. Основы обеспечения качества и сертификация промышленных изделий [Текст]: учеб. пос. / В. М. Медунецький. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. – 61 с.
11. Международный стандарт ISO 9001 Системы менеджмента качества – Требования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-9001-2015-\(rus\).pdf](http://www.pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-9001-2015-(rus).pdf)
12. Погосян, А. М. Создание конкурентоспособной наукоемкой продукции. Международное сотрудничество [Текст] / А. М. Погосян // Компетентность. – 2011. – № 4–5. – С. 26–30.
13. Свиткин, М. З. Менеджмент качества и обеспечение качества продукции на основе международных стандартов ИСО [Текст] / М. З. Свиткин, В. Д. Мацута, К. М. Рахлин. – Санкт-Петербург: Изд-во СПб карт. фабрики, 1999. – 403 с.
14. Пономарев, С. В. Управление качеством продукции. Инструменты и методы менеджмента: учебное пособие [Текст] / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, В. Я. Белобрагин, В. А. Самородов, Б. И. Герасимов, А. В. Трофимов, С. А. Пахомова, О. С. Пономарева. – Москва: РИА «Стандарты и качество», 2005. – 248 с.
15. Hadi, A. (2016). The product quality: characteristics, essence, evolution of approaches [Text] / A. Hadi // Economy. Management. Modern problems and prospects of development. – 2016. – № 4. – P. 64–72.
16. Kosach, N. I. (2016). The quality of the system engineering company Iran Khodro management [Text] / N. I. Kosach, V. P. Siroklyn, A. Hadi // All-Ukraine Scientific and Technic Conference of Young Scientists in Metrology. – 2016. – № 1–5. – P. 82–96.
17. Hadi, A. (2016). Assessment of Consumers' Satisfaction with the Automotive Product Quality [Text] / A. Hadi, N. Kosach // International Journal of Environmental & Science Education. – 2016. – № 11 (16). – P. 8726–8739.
4. Zaharov, M. G. (2010). Sistema kachestva – jeto instrument samosohranenija predprijatija v uslovijah krizisa. Standarty i kachestvo, 2, 34–35.
5. ISO 31000-2009. Risk Management – Principles & Guidelines. Available at: http://www.dvbi.ru/risk_management/library/tabid/213/Token/Vi ewInfo/ItemId/14/
6. Zekunov, A. G., Ivanov, V. N., Mishin, V. M., Pazjuk, Ju. V., Vlasova, T. I. (2015). Upravlenie kachestvom. Moscow: Jurajt, 475.
7. Medunec'kij, V. M. (2013). Osnovy obespechenija kachestva i ser'tifikacija promyshlennyh izdelij. Saint Peterburg: NIU ITMO, 61.
8. Kazantsev, S. A. (2008). Stvorennaya naukovno-metodychnykh ta normatyvnykh zasad fakhovykh system ser'tifikatsiyi. Natsional'nyy universytet «L'viv's'ka politekhnika», Lviv, 20.
9. ISO 9000:2005. Quality management systems – Fundamentals and vocabulary. Available at: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=42180
10. Medunec'kij, V. M. (2013). Osnovy obespechenija kachestva i ser'tifikacija promyshlennyh izdelij. Saint Petersburg: NIU ITMO, 61.
11. Mezhdunarodnyj standart ISO 9001 Sistemy menedzhmenta kachestva – Trebovanija. Available at: [http://www.pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-9001-2015-\(rus\).pdf](http://www.pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-9001-2015-(rus).pdf)
12. Pogosjan, A. M. (2011). Sozdanie konkurentosposobnoj naukoemkoj produkcii. Mezhdunarodnoe sotrudnichestvo. Kompetentnost', 4–5, 26–30.
13. Svitkin, M. Z., Macuta, V. D., Rahlin, K. M. (1999). Menedzhment kachestva i obespechenie kachestva produkcii na osnove mezhdunarodnyh standartov ISO. Saint-Petersburg: Izd-vo SPb kart. fabriki, 403.
14. Ponomarev, S. V., Mishhenko, S. V., Belobragin, V. Ja., Samorodov, B. A., Gerasimov, B. I., Trofimov, A. V., Pahomova, C. A., Ponomareva, O. S. (2005). Upravlenie kachestvom produkcii. Instrumenty i metody menedzhmenta: uchebnoe posobie. Moscow: RIA «Standarty i kachestvo», 248.
15. Hadi, A. (2016). The product quality: characteristics, essence, evolution of approaches. Economy. Management. Modern problems and prospects of development, 4, 64–72.
16. Kosach, N. I., Siroklyn, V. P., Hadi, A. (2016). The quality of the system engineering company Iran Khodro management. All-Ukraine Scientific and Technic Conference of Young Scientists in Metrology, 1–5, 82–96.
17. Hadi, A., Kosach, N. (2016). Assessment of Consumers' Satisfaction with the Automotive Product Quality. International Journal of Environmental & Science Education, 11 (16), 8726–8739.

Bibliography (transliterated):

1. Gorbunov, A. MEZHdUNARODNYJ STANDART ISO 9000 Sistemy menedzhmenta kachestva – Osnovnye polozenija i slovar'. Available at: [http://www.pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-9000-2015-\(rus\).pdf](http://www.pqm-online.com/assets/files/pubs/translations/std/iso-9000-2015-(rus).pdf)
2. Astanina, M. A. (2014). Sistema audita kachestva: kognitivnyj podhod. Moscow: MISAO, 108.
3. Evdokimova, L. I. (2015). Kompleksnaja ocenka dinamiki jeffektivnosti raboty predprijatija kak instrumentarij aktivizacii analitich-

Поступила (received) 18.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оцінка ризиків при комплексній оцінці якості продукції автомобільної промисловості/ Хаді Аміне, Н. І. Косач // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.113–119. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-5459.

Оценка рисков при комплексной оценке качества продукции автомобильной промышленности/ Хаді Аміне, Н. І. Косач// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.113–119. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-5459.

Risk assessment with comprehensive quality assessment of automotive industry products/ / Hadi Amineh, N. I. Kosach//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.113–119. – Bibliogr.: 17. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Хаді Аміне – аспірант кафедри 303 «Авіаційні прилади та вимірювання», Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; вул. Чкалова, 17, Харків, Україна, 61070; e-mail: hadiamineh@hotmail.com

Хади Аминне – аспірант кафедри 303 "Авиационные приборы и измерения" Национального аэрокосмического университета имени М. Е. Жуковского Жуковского «Харьковский авиационный институт»; ул. Чкалова, 17, Харьков, Украина, 61070; e-mail: hadiamineh@hotmail.com

Косач Наталія Ігорівна – доктор технічних наук, професор кафедри 303 «Авіаційні прилади та вимірювання», Національного аерокосмічного університету ім. М.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; вул. Чкалова, 17, Харків, Україна, 61070; e-mail: nataliya.kosach@khai.edu

Косач Наталья Игоревна – доктор технических наук, профессор кафедры 303 "Авиационные приборы и измерения" Национального аэрокосмического университета имени М. Е. Жуковского Жуковского «Харьковский авиационный институт»; ул. Чкалова, 17, Харьков, Украина, 61070; e-mail: nataliya.kosach@khai.edu

Hadi Amineh – graduate student, department 303 "Aviation devices and measuring", National aerospace university. M. E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute"; Chkalov str., 17, Kharkiv, Ukraine, 61070; e-mail: hadiamineh@hotmail.com

Kosach Nataliya Igorivna – doctor of Technical Sciences, Professor, department 303 "Aviation devices and measuring", National aerospace university. M. E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute"; Chkalov str., 17, Kharkiv, Ukraine, 61070; e-mail: nataliya.kosach@khai.edu

УДК 629.4.077

В. Г. РАВЛЮК

АНАЛІЗ НЕГАТИВНИХ НАСЛІДКІВ ВІД НЕНОРМАТИВНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ГАЛЬМІВНИХ КОЛОДОК З КОЛІСНИМИ ПАРАМИ У ВАНТАЖНИХ ВАГОНАХ

Представлено результати статистичних досліджень характеру і параметрів зносу гальмівних колодок в умовах експлуатації, процес утворення й розвитку клиноподібного зношування колодок у взаємодії з колесами, як під час руху без гальмування так і під час гальмувань. Наведено результати досліджень основних негативних наслідків від ненормативної взаємодії колодок з колесами та висвітлено основні чинники наднормативних матеріальних витрат залізничного транспорту.

Ключові слова: гальмівна колодка, вагон, клиноподібний знос, важільна передача, колесо, поїзд, тертя.

Представлены результаты статистических исследований характера и параметров износа тормозных колодок в условиях эксплуатации, процесс образования и развития клиновидного износа колодок во взаимодействии с колесами, как во время движения без торможения, так и во время торможений. Приведены результаты исследований основных негативных последствий ненормативного взаимодействия колодок с колесами и освещены основные факторы сверхнормативных материальных затрат железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: тормозная колодка, вагон, клиновидный износ, рычажная передача, колесо, поезд, трение.

The paper analyzed the results of field surveys and feasibility study process, wedge-shaped brake pads wear, which allowed for the first time revealed a number of negative factors, causing serious damage, like railway infrastructure and the environment.

Completed studies and assessment of damages on the basis of the research force factors arising in a typical design of the beam brake system of freight wagon bogies and tribotechnical processes due obscure influence of emerging powers.

Researched chronology of the formation and development of the wedge-shaped wear pads on the initial stage of occurrence wedge-shaped state, its intensive development and to the final stage.

Taken into account the following factors: slope and friction pads on the wheel while driving without braking and braking mode, operating with forces on the shoe, wear from friction and friction heat, which generally lead to a wedge-shaped and wear pads in operation. In this analysis the following negative factors wedge-shaped formation of the state of shoes such as deterioration in braking efficiency of trains; increased costs of energy for traction trains; reduce resource brake pads; high-friction surface character of damage rolling wagon wheels and negative environmental act.

Keywords: brake pad, wagon, wedge-shaped wear, lever transmission, wheel, train, friction.

Вступ. Зростання об'ємів перевезень вантажів на залізничному транспорті України потребує збільшення ваги поїздів і швидкості руху. Такі збільшення можливі тільки за умови достатньої надійності роботи автоматичних гальм локомотивів і вагонів. Але стан гальмівного обладнання більшості вантажних вагонів і локомотивів за останні роки значно погіршився. У цьому полягає найбільш стримуючий чинник у збільшенні обсягів перевезень на залізницях і призводить до зростання собівартості.

Зважаючи на те, що гальмівна система сучасних вантажних поїздів найбільш вразлива й у більшості вагонів і локомотивів знаходиться у незадовільному стані, в ПАТ «Укрзалізниця» виконуються роботи щодо підвищення надійності гальм вантажних поїздів установленної та підвищеної довжини та ваги [1].

Забезпечення чіткої та надійної роботи гальмівних вузлів у процесі експлуатації вантажних поїздів є одним із головних завдань системи технічного обслуговування та ремонту вагонів [2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією з основних складових частин рухомого складу є гальмівна система. Саме її технічний стан головним чином впливає на надійну та безпечну експлуатацію поїздів.

Питаннями удосконалення гальмівної важільної передачі, а зокрема ліквідації клиноподібного зносу та збільшення ресурсу гальмівних колодок присвячено багато наукових праць. Зокрема у статті [3] при розробленні вітчизняного візка нового покоління для вантажних вагонів авторами запропонований пристрій для відведення колодок із автоматичним коре-

гуванням взаємного положення гальмівних колодок і поверхонь кочення коліс. У китайській гальмівній важільній передачі оригінальне конструктивне виконання у візку ZK-1 має підвіска триангеля [4]. Вона виконана на шатуні необресореної частини, яка, в свою чергу, опирається на конусні втулки через гуму, а для запобігання падіння триангеля на залізничну колію активно використовуються запобіжні троси.

Науковцями в роботах [5–10] приділено особливу увагу аналізу впливу негативних чинників, що призводять до збитків залізничної галузі від масового клиноподібного спрацювання гальмівних колодок.

Для зменшення кількості транспортних подій на залізничному транспорті України щорічно виконують аналіз [7]. За яким розробляють ряд заходів, які дають можливість покращити ситуацію на залізниці. У багатьох випадках причиною виникнення транспортних подій є несправність механічної частини гальмівного обладнання, яке не завжди вдається виявити при виконанні технічного обслуговування вантажних вагонів на шляху приямвання.

Мета статті – аналіз негативних наслідків від ненормативної взаємодії гальмівних колодок з колісними парами у вантажних вагонах.

Дослідження негативних наслідків від ненормативної взаємодії гальмівних колодок з колісними парами у вантажних вагонах. Результати проведених розширених обстежень гальмівної механічної системи візків вантажних вагонів в умовах експлуатації дозволили встановити, що більше 80 % гальмівних колодок у вантажних поїздах при русі без гальмування сильно звисають, нахилені й труть верхньою частиною по поверхні кочення коліс. У процесі фрикційного зношування такі колодки здобувають клиноподібну форму. Верхні їх кінці стають тонкими, а нижні залишаються товстими майже нестертими. При цьому верхня частина робочої маси колодок зношується не при гальмуваннях, а від тертя по колесах при русі без гальмування, створюючи шкідливий опір руху всього поїзда [5].

Аналіз результатів натурних обстежень і проведені аналітичні дослідження процесу клиноподібного зношування гальмівних колодок (рис. 1), дозволили вперше виявити ряд супутніх такому зношуванню негативних чинників, що істотно впливають на збитки, які наносяться, як залізничній інфраструктурі так і навколишньому природному середовищу [7, 10].

Обґрунтувати й оцінити збитки вдалося на підставі проведених досліджень силових чинників, що виникають у типовій конструкції триангельної гальмівної системи візків вантажних вагонів і триботехнічних процесів, обумовлених дією ненормативно виникаючих сил. Такі шкідливі сили утворюються гравітаційною масою деталей гальмової важільної передачі у візках вантажних вагонів. У той же час динамічні впливи ударного характеру, що виникають у шарнірних з'єднаннях з зазорами більше 1 мм в недресорених частинах візків руйнують як ті, що застосовуються нині механізми рівномірного зношування

гальмівних колодок, так і інші, що розробляються та впроваджуються не тільки на регіональних філіях ПАТ «Укрзалізниця», але й за кордоном.

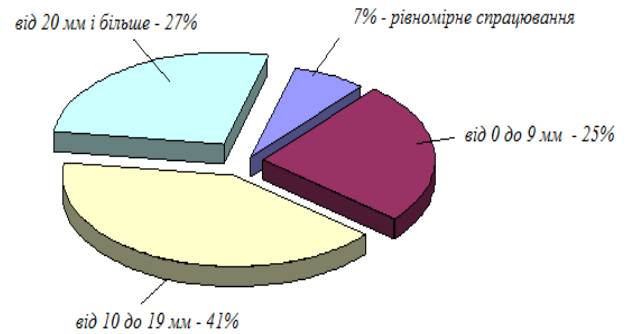


Рис. 1 – Діаграма часткового розподілу середніх розмірів ексцентричного спрацювання гальмівних колодок вантажних вагонів

Після нетривалого терміну служби такі пристрої втрачають працездатність, через це колодки нахилиються до упору верхніми краями в поверхню кочення коліс і під час руху в поїздах без гальмування на них виникає місцеве фрикційне зношування (рис. 2, а), що супроводжується тепловиділенням T_{cm} із утворенням шкідливої сили тертя F_{cm} , що створює опір обертанню колеса [5, 10].

При гальмуваннях верхня стерта частина колодок відходить від колеса й не бере участь у створенні гальмівної сили (рис. 2, б). Фрикційна взаємодія колодок з колесами, а значить і гальмівний процес істотно спотворюються через перерозподіл питомих тисків по довжині колодок $q_e > q_n$. На верхніх, укорочених стертими частинах колодок, концентруються значно більші питомі тиски, чим на нижніх. Тому верхні частини колодок зношуються прискорено з утворенням осередку інтенсивних тепловиділень T_e у контактній фрикційній взаємодії з колесами. У той же час на нижніх частинах колодок, через менші питомі тиски, зношування й тепловиділення T_n значно менше, що й приводить до клиноподібного зношування гальмівних колодок (рис. 2, в). У такий спосіб граничне зношування у верхніх частинах колодок настає значно раніше, що вимагає їх заміни при досить великій залишковій робочій масі на нижніх частинах колодок (рис. 2, г) [6].

Наведений процес спотвореного фрикційного зношування гальмівних колодок дозволив дослідити та класифікувати на групи причини збитків, які наносяться нині залізничній інфраструктурі та впливають на безпеку руху поїздів. Серед них це – погіршення ефективності гальмувань у поїздах; збільшення витрат енергоресурсів на тягу поїздів; зменшення ресурсу гальмівних колодок; пошкодження поверхні кочення коліс; негативні екологічні дії та промислові витрати. Нижче розглянемо класифікацію кожної групи.

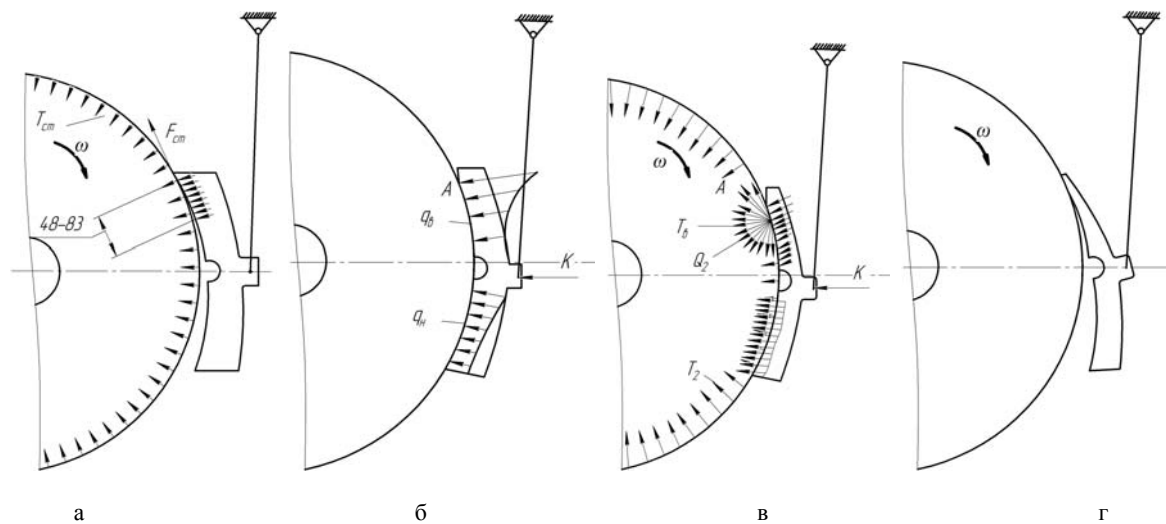


Рис. 2 – Хронографія утворення й розвитку клиноподібного зношування гальмівних колодок: а – початковий стан повномірної схиленої колодки до спірання верхньою крайкою у колесо із здійсненням тертя під час руху без гальмування; б – розподіл гальмівних контактних натисень від колодки на колесо за наявної верхньої стертості; в – кожне гальмування супроводжується інтенсивним зносом верхньої частини колодки та занадто сповільненням у нижній; г – вигляд клиноподібного зносу колодки, яку необхідно замінювати при досить великій частині неспрацьованої робочої маси в нижній її половині

Погіршення ефективності гальмувань у поїздах. Під час руху поїзда в режимі тяги й вибігу стерті верхні частини гальмівних колодок при гальмуваннях відходять від поверхні кочення коліс і не можуть приймати участі в гальмуваннях (рис. 2, в). Це приводить до суттєвого погіршення ефективності гальмувань у поїздах.

Відповідно до гальмівних нормативів таке погіршення пропорційне зменшенню контактної площі тертя колодок. За отриманими статистичними даними стертість гальмівних колодок зменшує робочу площу тертя майже на 20 %. У результаті виникнення цього явища, нині на таку ж величину збільшується гальмівний шлях вантажних поїздів через ненормативне зношування гальмівних колодок.

Збільшення витрат енергоресурсів на тягу поїздів. Тертя верхніх країв гальмівних колодок по колесах у вантажних поїздах при русі без гальмування створює силу тертя F_{cm} (рис. 2, а), що суттєво збільшує опір руху поїзда, на подолання якого додатково витрачаються енергоносії. Відповідно до проведених тягових розрахунків додатковий опір руху, що створюється частковим тертям верхніми краями гальмівних колодок по колесах, становить 3–8 % залежно від ваги поїзда. Звідси впливає, що в цей час, через часткове тертя гальмівних колодок по колесах, витрата енергоносіїв на тягу вантажних поїздів збільшена у середньому більше ніж на 5 %.

Зменшення ресурсу гальмівних колодок. У середньому близько 47 % робочої маси гальмівних колодок нині зношується корисно при гальмуваннях, що й визначає їх ресурс (рис. 3). У іншій частині робочої маси колодок близько 14 % шкідливо зношується тертям по

колесах при русі без гальмування й 39 % колодок залишається клиноподібно зношених, які непридатні до подальшого використання та експлуатації на вагонах [5, 7, 8].



Рис. 3 – Типовий зразок спотворено зношеної гальмівної колодки

Пошкодження поверхні кочення коліс. Гальмування частково стертими вгорі колодками супроводжується утворенням концентрованого осередка з високотемпературними впливами на поверхню кочення коліс (рис. 2, в), наслідком яких стають вищербини, сітка термічних поверхневих мікротріщин, кільцеві виробки, навари та ін. дефекти й пошкодження, що

потребують значних витрат для заміни та ремонту колісних пар вагонів шляхом – обточування їх поверхонь та приведення до нормативних геометричних параметрів [8].

При граничному зношуванні колодок виникає загроза тертя по поверхні кочення колеса верхнім краєм сталевго гальмівного башмака в який кріпиться колодка. Такі випадки прийнято класифікувати як «завар башмака». Він пошкоджує геометричні параметри поверхні кочення колеса й призводить до виникнення транспортних подій та спричиняє негативні наслідки для залізниці. Результатом яких є значні нанесені збитки залізничному транспорту від затримання поїзда на перегоні, що в свою чергу призводить до збою графіку руху поїздів на дільниці де сталася транспортна подія, з подальшим відчепленням вагона з несправною колісною парою від поїзда для виконання технічного обслуговування з відчепленням на механізованих пунктах, які мають спеціалізовані засоби та технологічне обладнання для заміни колісної пари вагона [9].

Негативні екологічні діяння. Шкідливий молекулярно-механічний процес зношування у високотем-

пературному середовищі від застосування нині полімерних композиційних гальмівних колодок супроводжується утворенням отруйного явища навколо кожного поїзда, що рухається. Це дрібнодисперсні порохо- і димоподібні частинки: гуми, сажі, азбесту, бариту, електрокорунду, графіту, сірки та ін. хімічних компонентів робочої маси колодок, що розсіюються та отруюють природне навколишнє середовище й фіброгенно діють на дихальні шляхи людей і тварин. Такі гальмівні колодки повинні бути заборонені. Однак, через свою низьку собівартість виготовлення вони широко застосовуються на залізницях всіх країн СНД, що дозволяє наднормативно й безгосподарно їх використовувати при спотвореному зносі. Замість корисного зносу, здійснюючи гальмування поїздів, колодки перетворюються у тверді полімерні промислові відходи (рис. 4), які технологічно неможливо переробляти. Тому тисячі тон не повністю стертих гальмівних колодок, що використовувалися при експлуатації на вантажних вагонах залізничного транспорту вивозяться й накопичуються на промислових сміттєвих смітниках, істотно збільшуючи їх обсяги.



Рис. 4 – Видгляд відпрацьованих гальмівних колодок, підготовлених до вивезення на смітник

Промислові витрати. Такі витрати пов'язані з наднормативним (більш ніж у два рази) придбанням і транспортуванням нових гальмівних колодок від підприємств виготовлювачів на всю мережу залізничних станцій і підприємств, де передбачена заміна непридатних колодок. Вагомими стають і збитки, пов'язані з вивозом і утилізаційним нагромадженням знятих колодок із великими залишками полімерної робочої маси на смітниках.

Одночасно більш ніж удвічі збільшуються трудовитрати, які пов'язані із заміною спотворено зношених гальмівних колодок на нові й подальшим регулюванням гальмівних важільних передач вагонів.

Такий стан з роботою й зношуванням гальмівних колодок у вантажних вагонах, як найбільш масовому

виді рухомого складу, завдає істотної шкоди залізничній інфраструктурі й вимагає вживання необхідних серйозних заходів.

Висновки. Виконаний аналіз негативних наслідків від клиноподібного зносу гальмівних колодок вказує та те, що досліджувана проблема стоїть досить гостро для залізничного транспорту, через значні матеріальні збитки.

Проведені дослідження процесів утворення й розвитку клиноподібного зносу колодок дають можливість напрацювати напрямки вирішення такої проблеми у подальшій роботі.

Список літератури:

1. Асадченко, В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава [Текст] / В. Р. Асадченко. – Москва: Маршрут, 2006. – 392 с.
2. Бабаєв, А. М. Принцип дії, розрахунки та основи експлуатації гальм рухомого складу залізниць [Текст]: навч. посіб. / А. М. Бабаєв, Д. В. Дмитрієв. – Київ: ДЕТУТ, 2007. – 176 с.
3. Радзиковский, А. А. Устройство отвода тормозных колодок [Текст] / А. А. Радзиковский, И. А. Омеляненко, Л. А. Тимошина // Вагонный парк. – 2009. – № (11–12). – С. 18–21.
4. Блохин, Е. П. Тележки ЗК1 полувагонов, построенных в КНР [Текст] / Е. П. Блохин, К. Т. Алпысбаев, В. Я. Панасенко // Вагонный парк. – 2012. – № 9 (66). – С. 12–14.
5. Нечволода, С. І. Проблеми нерівномірного зносу гальмівних колодок у вантажних вагонах [Текст]: зб. наук. праць / С. І. Нечволода, М. О. Романюха, К. С. Нечволода // УкрДАЗТ. – 2007. – № 86. – С. 50–56.
6. Мартынов, И. Э. О способе полной ликвидации клиновидного износа тормозных колодок грузовых вагонов [Текст] / И. Э. Мартынов, К. С. Нечволода // Вагонный парк. – 2010. – № 4. – С. 36–39.
7. Аналіз стану безпеки руху поїздів на залізницях України за 2013 рік [Текст] / Головне управління вагонного господарства. – Київ, 2013. – 24 с.
8. Болотина, А. Б. Исследование параметров и совершенствование механической части тормозной системы грузовых вагонов с учетом перспективных условий эксплуатации [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А. Б. Болотина. – Москва, 2000. – 244 с.
9. Дроздов, Е. В. Определение причин и разработка способов устранения неравномерного износа тормозных колодок на грузовых вагонах [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Е. В. Дроздов. – Москва, 1986. – 286 с.
10. Нечволода, К. С. Проведення розширених експлуатаційних випробовувань важільних передач візків вантажних вагонів обладнаних пристроями рівномірного зносу гальмових колодок [Текст] / К. С. Нечволода, В. Г. Равлюк. – Харків: Український державний університет залізничного транспорту, 2013. – 52 с.

Bibliography (transliterated):

1. Asadchenko, V. R. (2006). Automatic brake podvizhnoho composition Textbook posobyе. – Moscow: Route, 392.
2. Babayev, A. M., Dmitriev, D. V. (2007). The principle of the calculations and fundamentals of operation of brakes for rail transport. Kyiv: DETUT, 176.
3. Radzikhovskiy, A. A., Omelianenko, I. A., Tymoshyna, L. A. (2009). Prysirii vidvodu halmivnykh kolodok. Vahonnyi park. 11–12, 18–21.
4. Blokhin, E. P., Alpysbaev, K. T., Panasenko, V. Ya. (2012) Vizky ZK1 pivvahoniv, pobudovanykh v KNR. Vahonnyi park, 9 (66), 12–14.
5. Nechvoloda, S. I., Romanyuha, M. O., Nechvoloda, K. S. (2007). Problems of uneven wear of brake blocks in freight wagons. UkrDAZT, 86, 50–56.
6. Martynov, I. E., Nechvoloda, K. S. (2010). On a method to the complete elimination of the wedge brake pad wear wagons. Vahonnyi park, 4, 36–39.
7. Analysis of traffic safety on the railways of Ukraine for 2013 (2013). Department carload economy, Kyiv, 24.
8. Bolotyna, A. B. (2000). Yssledovanye parametrov y sovershenstvovanye mekhanicheskoi chasti tormoznoy systemi hruzovikh vahonov s uchetom perspektivnykh uslovyi ekspluatatsyi. Moscow; 244.
9. Drozdov, E. V. (1986). Opredelenye prychyn y razrabotka sposobov ustraneniya neravnomernoho yznosa tormoznykh kolodok na hruzovnykh vahonakh. – Moscow; 286.
10. Nechvoloda, K. S., Ravlyuk, V. G. (2013). Provedennya rozshyreny'x ekspluatatsijny'x vy'provovuvan' vazhil'ny'xperedach vizkiv vantazhny'x vagoniv obladnany'x pry'stroymy'rivnomirnogo znosu gal'movy'x kolodok. Kharkiv: Ukrayins'ky'j derzhavny'j universy'tet zalizny'chnogo transportu, 52.

Надійшла (received) 20.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз негативних наслідків від ненормативної взаємодії гальмівних колодок з колісними парами у вантажних вагонах / В. Г. Равлюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.119–123. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Анализ негативных последствий от ненормативного взаимодействия тормозных колодок с колесными парами в грузовых вагонах / В. Г. Равлюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.119–123. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Analysis of negative consequences resulting from inappropriate interaction between brake pads and wheel pairs of freight wagons / V. Ravlyuk // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221). – P.119–123. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

Равлюк Василь Григорович – кандидат технічних наук, доцент, кафедра вагонів, Український державний університет залізничного транспорту (УкрДУЗТ), пл. Фейербаха, 7, м. Харків, Україна, 61050, E-mail: ravg@ukr.net.

Равлюк Василий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра вагонів, Український державний університет залізничного транспорту (УкрДУЗТ), пл. Фейербаха, 7, м. Харків, Україна, 61050, E-mail: ravg@ukr.net.

Ravlyuk Vassyl – PhD, Associate professor, Department of Wagons, Ukrainian State University of Railway Transport, 7 Feuerbach sq., Kharkiv, Ukraine, 61050, E-mail: ravg@ukr.net.

ЗМІСТ

Гасанова Н. С. Аналіз задачі кручення для радіально-неоднородного сферического пояса с закрепленной боковой поверхностью	3
Реброва К. С., Донцова Т. А., Астрелін І. М. Стануму (IV) оксид, отриманий золь-гель методом, як матеріал для газових сенсорів	7
Кашицький В. П., Малець В. М., Щеглов С. М. Термоциклічна та корозійна стійкість епоксикомполімерів модифікованих у фізичних полях	12
Блінцов О. В. Оптимізація довжини кабель-троса при керуванні рухом прив'язного телекерованого підводного апарата	18
Баркалов А. А., Титаренко Л. А., Зеленева І. Я., Грушко С. С. Метод уменьшения числа термов при реализации схемы совмещенного микропрограммного автомата в базе CPLD.....	25
Kotovskiy V. , Shlykov V., Danilova V. The mathematical model of heat transfer in Matlab for device of cardiopulmonary by pass in cardiology	31
Дорошенко М. В., Дрaб Т. І. Комп'ютерна система вивчення та реалізації наближених методів алгебри та аналізу з використанням інтегрованого середовища Word та Matlab.....	36
Жовнір М. Ф. Математична модель первинного перетворювача кутових переміщень з кільцевим п'єзоелектричним хвилеводом поверхневих акустичних хвиль	42
Нурієв М. Н., Мусаєва Т. Т. Разработка алгоритма распознавания поверхности паковок крестовой намотки	52
Савельєва О. С., Березовська К. І., Хеблов І., Валід Шер Х., Гур'єв І. М., Кошулян С. В. Віртуальна передислокація дискретного простору-часу в задачах планування проектної логістики	56
Шулима О. В., Шендрік В. В., Давідсон П. Формалізація задачі прийняття рішень для вибору оптимальної структури гібридної енергетичної системи	62
Юськів М. І., Цегелик Г. Г. Моделювання та дослідження ефективності методу послідовного перегляду сторінок на веб-сайті для різних законів розподілу ймовірностей звертання до сторінок.....	70
Васильєв Є. А., Попов С. В., Васильєв А. В. Підвищення ефективності глибокого свердління спіральними свердлами при обробці деталей з матеріалу сталь 40.....	75
Біленко О. І., Першина К. В. Вплив характеристик системи «людина–машина» на ефективність виконання вогневих завдань працівниками сил безпеки.....	80
Вамболь В. В., Рашкевич А. С., Рашкевич Н. В. Анализ особенностей экологического мониторинга атмосферного воздуха в зоне чрезвычайных ситуаций техногенного характера.....	85
Радов Д. Г., Маслов В. П., Дорожнинский Г. В. Дослідження процесу додаткового очищення питної води методом поверхневого плазмонного резонансу	89
Єгорова О. В. Вплив переробних підприємств на якість природного середовища регіону.....	95
Вамболь С. О., Колосков В. Ю. Вдосконалення методу оцінювання екологічного стану території, прилеглої до місця зберігання відходів, на основі критерію екологічного резерву.....	105
Ващенко В. М., Кордуба І. Б., Гудима А. А. Детерміністський метод моделювання впливу смерчів на водойму-охолоджувач чорнобильської АЕС	106
Хади Амине, Косач Н. И. Оценка рисков при комплексной оценке качества продукции автомобильной промышленности.....	113
Равлюк В. Г. Аналіз негативних наслідків від ненормовативної взаємодії гальмівних колодок з колісними парами у вантажних вагонах.....	119

CONTENTS

Hasanova N. Analysis torsion problem for radial-inhomogeneous spherical belt with a side surface of the fixing	3
Rebrova K., Dontsova T., Astrelin I. Tin (IV) oxide obtained by a sol-gel method as a material for gas sensors	7
Kashytskyi V., Malets V., Scheglov S. Thermal cyclic corrosion resistance and epoxy composites modified by physical fields	12
Blintsov O. Umbilical cable length optimization at tethered remotely operated vehicle motion control	18
Barkalov A., Titarenko L., Zeleneva I., Hrushko S. Method of reducing the number of terms for combined finite state machine implementing in CPLD	25
Kotovskiy V., Shlykov V., Danilova V. The mathematical model of heat transfer in Matlab for device of cardio-pulmonary bypass in cardiology	31
Doroshenko M., Drab T. Computer system and implementation studying approximate methods of algebra and analysis using integrated environmental Word and Matlab	36
Zhovnir M. A mathematical model of the primary transducer of angular displacements with piezoelectric waveguide surface acoustic waves	42
Nuriev M., Musaeva T. Development of algorithms surface recognition forging cross winding	52
Saveleva O., Beresovska K., Heblou I., Valid Sher H., Gurjev I., Koshulyan S. The discrete space-time virtual relocation in project logistics planning	56
Shulyma O., Shendryk V., Davidsson P. The formalization of decision-making problem to select the optimal structure of a hybrid energy system.....	62
Yuskiv M., Tsehelyk H. Modelling and investigation of efficiency of consecutive revision method for browsing of pages on a web-site for different distribution laws of probability of accessing pages	70
Vasyliiev E., Popov S., Vasyliiev A. Efficiency upgrading of twist bit deep-hole drilling in machining of steel-40 parts.....	75
Bilenko A., Pershyna K. Impact characteristics of the system "man-machine" on the effectiveness of the fire safety task force staff	80
Vamol V., Rashkevich A., Rashkevich N. An analysis of features of the ecological monitoring of atmospheric air is in the zone of emergencies of technogenic character.....	85
Radov D., Maslov V., Dorozinsky G. Investigation of further purification of drinking water by surface plasmon resonance.....	89
Yegorova O. The impact of processing enterprises on the quality of the natural environment of the region.....	95
Vambol S., Koloskov V. Improvement of the method of assessment of environmental condition of territory adjoined to wastes storage place based on environmental reserve criterion.....	101
Vashchenko V., Korduba I., Gudyma A. Deterministic modeling method of tornado impact at chernobyl NPP coolant pond.....	106
Hadi Amineh, Kosach N. Risk assessment with comprehensive quality assessment of automotive industry products	113
Ravlyuk V. Analysis of negative consequences resulting from inappropriate interaction between brake pads and wheel pairs of freight wagons.....	119

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

Збірник наукових праць

Серія:

Механіко-технологічні системи та комплекси

№ 49(1221) 2016

Наукові редактори: д-р техн. наук, проф. Д. О. Дьомін
д-р техн. наук, проф. О. В. Акімов
Технічний редактор В. О. Костик

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ».
Кафедра ливарного виробництва.
Тел. (057) 707-68-54; e-mail: c7508990@gmail.com

Обл.-вид. №16-16

Підп. до друку 14.06.2016р. Формат 60x84/16. Надруковано на різнографі
Gestetner 6123CP. Ум.-друк. арк. 8. Облік.вид.арк. 8,75.
Наклад 100 прим. Зам. № **32-16**. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи
ДК №3657 від 24.12.2009
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня "Технологічний Центр"
Свідоцтво про державну реєстрацію №1 480 120 0000 021055 від 02.04.2002
Адреса: 61145, м. Харків, вул. Шатилова дача,4, тел. (057)750-89-90