

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ЧЕРКАСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Технічні науки
Заснований у грудні 1996 р.

4/2021

Редакційна колегія:

Al-Azzeh J., д-р філософії, доцент (Йорданія)
Антонюк В. С., д-р техн. наук, професор
Артемчук В.О., д-р техн. наук, с.н.с.
Базіло К. В., д-р техн. наук, доцент
Батраченко О. В., д-р техн. наук, доцент
Бондаренко М. О., д-р техн. наук, доцент
Бондаренко Ю. Ю., канд. техн. наук, професор
Вамболь В. В., д-р техн. наук, професор
Вашенко В. А., д-р техн. наук, професор
Вітенько Т. М., д-р техн. наук, професор
Вербицький С. Б., канд. техн. наук
Вязовик В. М., д-р техн. наук, доцент
Гальченко В. Я., д-р техн. наук, професор
Гевод В. С., д-р хім. наук, доцент
Зайчук О. В., д-р техн. наук, професор
Заболотний С. В., д-р техн. наук, доцент
Iavich M., д-р філософії, професор (Грузія)
Kažys R. J., д-р техн. наук, професор (Литва)
Коваленко І. Л., д-р техн. наук, професор
Лобода О. А., д-р хім. наук
Лукашенко В. М., д-р техн. наук, професор
Мусієнко М. П., д-р техн. наук, професор
Осипенко В. І., д-р техн. наук, професор
Палагін В. В., д-р техн. наук, професор
Півоваров О. А., д-р техн. наук, професор
Плахотний О. П., д-р техн. наук, доцент
Прокопенко Т. О., д-р техн. наук, професор
Ситник О. О., д-р техн. наук, професор
Скиба М. І., канд. техн. наук, доцент
Смотраєв Р. В., канд. техн. наук, доцент
Столяренко Г. С., д-р техн. наук, професор
Сухенко В. Ю., д-р техн. наук, професор
Уткіна Т. Ю., канд. техн. наук, доцент
Фауре Е. В., д-р техн. наук, професор (*гол. ред.*)
Федоров Є. Є., д-р техн. наук, професор
Фролова Л. А., д-р техн. наук, доцент
Хоменко О. М., канд. хім. наук, доцент
Яценко І. В., д-р техн. наук, професор

ЗАСНОВНИК І ВИДАВЕЦЬ – Черкаський
державний технологічний університет

Свідоцтво про державну реєстрацію
друкованого засобу масової інформації
КВ № 6061 від 16.04.2002.

Виходить 4 рази на рік

У ВИПУСКУ:

- **ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ**
- **АВТОМАТИЗАЦІЯ
ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ**
- **ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ІНЖЕНЕРІЯ,
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА**
- **МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО,
ТЕХНОЛОГІЇ ТА
ОБЛАДНАННЯ СУЧАСНИХ
МАШИНОБУДІВНИХ
І ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

Редакційна рада видання:

Григор О. О., д-р політ. наук, професор,
ректор Черкаського державного
технологічного університету (голова ради);
Гончаров А. В., канд. техн. наук, доцент,
перший проректор ЧДТУ;
Фауре Е. В., д-р техн. наук, професор,
проректор з науково-дослідної роботи
і міжнародних зв'язків ЧДТУ;
Столяренко Г. С., д-р техн. наук, професор;
Литвин О. В., нач. ред.-видав. відділу ЧДТУ

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

ЧДТУ, к. 604/1, бульвар Шевченка, 460,
м. Черкаси, 18006,
тел. (0472) 51-15-89

vtn.chdtu.edu.ua (подання статей)

Сисоєнко С. В. (*відповідальний секретар*)
e-mail: vtn@chdtu.edu.ua

4•2021

ВІСНИК

Черкаського державного
технологічного університету

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

VISNYK

Cherkaskogo derzhavnogo
tehnologichnogo universitetu

TECHNICAL SCIENCE

4 • 2021

Видання включене до Переліку
наукових фахових видань України
як фахове видання з технічних наук
(спеціальності 101, 113, 121, 122, 123, 125,
126, 131, 132, 133, 151, 152, 161, 172)
категорія «Б»
(накази МОНУ від 02.07.2020 №886,
від 24.09.2020 №1188)

Видання зареєстровано
у міжнародних наукометричних базах,
каталогах і системах пошуку:
Index Copernicus Journals Master List,
BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref,
Directory of Open Access Journals (DOAJ),
Eurasian Scientific Journal Index (ESJI),
ResearchBib – Academic Resource Index,
Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat,
Open Ukrainian Citation Index

Електронна версія:
vtn.chdtu.edu.ua; visnyk.chdtu.edu.ua

Затверджено Вченою радою
Черкаського державного
технологічного університету,
протокол № 8 від 20.12.2021

За повного або часткового
передрукування матеріалів
посилання на «Вісник Черкаського
державного технологічного
університету» є обов'язковим.

ЗМІСТ

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Федоров Є. Є., Уткіна Т. Ю.</i> Метод очищення від шуму візуальної біометричної інформації.....	5
<i>Фауре Е. В., Ступка Б. А.</i> Імітаційне моделювання процесу встановлення циклового синхронізму в системах зв'язку з нероздільним факторіальним кодуванням.....	16
<i>Фауре Е. В., Заспа Г. О., Сисоєнко С. В.</i> Впровадження STEM-освіти в освітні програми закладів вищої освіти через кооперацію з підприємствами та компаніями.....	25

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

<i>Мацена С. М., Канашиєвич Г. В., Коваленко Ю. І., Цинда Р. В., Жайворонок І. С.</i> Покращення якості оптичних поверхонь елементної бази інформаційних систем методом електронно-променевої мікрообробки.....	35
<i>Боровицький В. М., Микитенко В. І., Гудзь О. Є.</i> Узагальнений метод демодуляції для отримання тривимірних цифрових зображень та його програмна реалізація	45

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРІЯ,
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

<i>Хавікова К. Є., Іванченко А. В.</i> Удосконалення технології очищення стічних вод із утилізацією осаду на коксохімічних підприємствах	54
<i>Кириченко Є. П., Ковалишин В. В., Гвоздь В. М., Ващенко В. А., Колінько С. О., Цибулін В. В.</i> Дослідження механізму та розробка моделі розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей металеве пальне + оксид металу при зовнішніх термічних діях	68

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ
СУЧАСНИХ МАШИНОБУДІВНИХ І ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

<i>Посувайло В. М., Шовкопляс М. В., Романів М. М., Малінін В. Ю.</i> Порівняння методів поверхневого зміцнення деталей машин покриттями.....	83
---	----

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES

<i>Fedorov E. E., Utkina T. Yu.</i> Noise cleaning method for visual biometric information.....	5
<i>Faure E. V., Stupka B. A.</i> Simulation modeling of the process of establishing frame synchronism in communication systems with non-separable factorial coding	16
<i>Faure E. V., Zaspas H. O., Sysoienko S. V.</i> Implementation of STEM education in educational programs of higher education institutions through cooperation with enterprises and companies.....	25

AUTOMATION AND CONSTRUCTION OF DEVICES

<i>Matsepa S. M., Kanashevych H. V., Kovalenko Yu. I., Tsynda R. V., Zhaivoronok I. S.</i> Improvement of the quality of optical surfaces of the element base of information systems by the method of electron-beam microprocessing.....	35
<i>Borovytsky V. M., Mykytenko V. I., Hudz O. Ye.</i> Generalized demodulation technique for obtaining three-dimensional digital images and its software implementation	45

CHEMICAL TECHNOLOGIES AND ENGINEERING, ECOLOGICAL SECURITY

<i>Khavikova K. Ye., Ivanchenko A. V.</i> Improvement of wastewater treatment technology with sediment disposal at coke-chemical enterprises	54
<i>Kirichenko E. P., Kovalychin V. V., Gvozd V. M., Vaschenko V. A., Kolinko S. O., Tsybulin V. V.</i> Research of the mechanism and development of a model for the development of the process of combustion of pyrotechnic mixtures metal fuel + oxide of metal at external thermal actions	68

MATERIALS SCIENCE, TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT OF MODERN MACHINE-BUILDING AND FOOD PLANTS

<i>Posuvailo V. M., Shovkoplias M. V., Romaniv M. M., Malinin V. Yu.</i> Comparison of methods of surface strengthening of machine parts by coatings.....	83
---	----

[0000-0003-3841-7373] **Є. Є. Федоров**, д-р техн. наук, професор,
[0000-0002-6614-4133] **Т. Ю. Уткіна**, канд. техн. наук, доцент
e-mail: t.utkina@chdtu.edu.ua

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

МЕТОД ОЧИЩЕННЯ ВІД ШУМУ ВІЗУАЛЬНОЇ БІОМЕТРИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

У роботі запропоновано метод очищення від шуму візуальної біометричної інформації за рахунок визначення структури моделі згладжуючої фільтрації візуальної інформації про ідентифіковану особистість на основі статистичного оцінювання якості очищення від шуму двовимірною сигналу.

В результаті проведеного системного аналізу сучасних методів очищення зображення від шуму встановлено, що розглянуті методи мають один або більше з таких недоліків: не автоматизовано вибір структури та параметрів моделі фільтра та/або невисока точність очищення від адитивного та мультиплікативного шуму.

Тому актуальною є розробка методу очищення від шуму візуальної біометричної інформації для проведення попередньої обробки зображення обличчя людини, що забезпечить необхідну якість зображень і не вимагатиме трудомісткої процедури визначення значень параметрів оператором на основі емпіричного досвіду.

Визначено структуру моделі згладжуючої фільтрації. Запропоновано характеристики та критерій якості очищення від шуму візуального сигналу. Для визначення параметра порядку фільтра проведено чисельні дослідження за допомогою бази даних Siblings, що дозволило встановити найефективніший метод: у випадку адитивного гаусового шуму та у випадку мультиплікативного гаусового шуму, найменшу середньоквадратичну помилку, тобто таку, що відповідає критерію якості очищення від шуму візуального сигналу, забезпечує середньо α -усічений фільтр.

Запропонований метод дозволяє ставити і вирішувати завдання попередньої обробки візуального сигналу, що використовуються для аналізу і зберігання візуальної інформації в інтелектуальних комп'ютерних системах біометричної ідентифікації особистості по зображенню обличчя.

Ключові слова: візуальний сигнал, часова фільтрація, частотна фільтрація, порогова фільтрація, вейвлет-перетворення, адитивний гаусовий шум, мультиплікативний гаусовий шум.

Вступ. Однією з найважливіших проблем, які існують сьогодні у системах безпеки, є підвищення ефективності ідентифікації особистості. Автоматизована біометрична ідентифікація людини означає прийняття рішень, яке базується на мультимодальній інформації, що підвищує якість розпізнавання досліджуваної особи. На відміну від традиційного підходу, комп'ютерна біометрична ідентифікація прискорює й підвищує точність процесу розпізнавання, що особливо критично в умовах обмеженого часу. Особливий клас біометричної ідентифікації людини утворюють методи, що ґрунтуються на аналізі візуальної інформації.

Обробка візуальної біометричної інформації з метою аналізу та подальшого розпізнавання об'єктів, таких як обличчя людини,

вирішується за допомогою виконання послідовності декількох етапів. Першим етапом, але від цього не менш важливим, є цифрова фільтрація зображення або усунення низько-частотного шуму, що з'являється завдяки внесенню спотворень у зв'язку з різноманітними пристроями формування зображень (адитивний шум) та подальшою їх передачею по різних каналах зв'язку: за наявності швидких перехідних процесів, таких як неправильна комутація (імпульсний шум), зміни характеристик ліній зв'язку при коливаннях напруги живлення (мультиплікативний шум).

Фільтрація зображень дозволяє визначати об'єкти, що цікавлять саме дослідника, від усіх інших об'єктів та фону зображення. Додавання до кожного пікселя зображення значень відповідного нормального розподілу з

нульовим середнім значенням являє собою адитивний шум, добуток ідеального сигналу і випадково розподіленого спотвореного сигналу у матриці пікселів зображення – мультиплікативний шум, а заміна частини пікселів значеннями фіксованої чи випадкової величини – імпульсний шум.

У практичних завданнях досліднику найчастіше доводиться стикатися з зображеннями, зашумленими комбінованими моделями, де наявні як адитивний, так і мультиплікативний та/або імпульсний шуми.

Відтак, розробка методу попередньої обробки зображення обличчя людини для очищення від шуму візуальної біометричної інформації є актуальною проблемою.

Аналіз останніх джерел і публікацій. Очищення від шуму візуального сигналу використовується перед аналізом і кодуванням.

Адитивні й мультиплікативні безперервні та безперервно-імпульсні шуми видаляються з сигналу за допомогою вейвлет-аналізу з пороговою обробкою, згладжуючими лінійними та нелінійними фільтрами, спектральним відніманням.

Імпульсні шуми видаляються згладжуючими нелінійними фільтрами. Адитивні неперіодичні шуми видаляються низькочастотними фільтрами. Адитивні періодичні шуми видаляються смуговими та режекторними фільтрами.

З методів згладжуючої адаптивної лінійної часової фільтрації найбільшого поширення набув алгоритм Лі, який ґрунтується на Вінерівській фільтрації і не вимагає наявності сигналу, що містить тільки шум, на відміну від інших методів.

Згладжуюча адаптивна лінійна частотна фільтрація (спектральне віднімання) вимагає наявності сигналу, що містить тільки шум, що технічно не завжди можливо.

Для очищення від шуму візуальної інформації проведено системний аналіз відповідних методів [1-6], а саме:

1. Згладжуюча адаптивна лінійна часова фільтрація:

- фільтрація на основі мінімальної середньоквадратичної помилки [7-14];
- фільтрація на основі рекурсивних найменших квадратів [8-14];
- Калманівська фільтрація [8-14];
- фільтрація на основі методу Лі [15-17].

2. Згладжуюча адаптивна лінійна частотна фільтрація, яка називається спектральним відніманням [18]:

- фільтрація за Болом [19];
- фільтрація за Беруті, Шварцем та Макхоулом [20];
- Вінерівська фільтрація [15];
- фільтрація на основі методу максимальної правдоподібності [21].

3. Вейвлет-аналіз з пороговою обробкою [22].

4. Згладжуюча неадаптивна лінійна часова фільтрація:

- середньоарифметична фільтрація [23-27];
- гаусова фільтрація [24, 27].

5. Згладжуюча нелінійна фільтрація:

- середньогометрична фільтрація [16, 28];
- середньогармонійна фільтрація [16, 28];
- контргармонійна фільтрація [16, 28];
- медіанна фільтрація [16, 17, 24, 27, 28];
- середньо α -усічена фільтрація [16];
- середньоточкова фільтрація [16];
- консервативна фільтрація [27];
- морфологічна фільтрація [16, 23, 28, 29].

Переваги та недоліки методів згладжуючої адаптивної лінійної часової фільтрації, вейвлет-аналізу з пороговою обробкою згладжуючою неадаптивною лінійною часовою фільтрацією, згладжуючою нелінійною фільтрацією візуального сигналу представлені в таблиці 1.

Як видно з таблиці 1, всі зазначені методи очищення від шуму мають деякі недоліки.

Таблиця 1 – Переваги та недоліки методів очищення від шуму

Метод на основі	Переваги	Недоліки
вейвлет-аналізу із пороговою обробкою	використання адаптивного порогу	▪ невисока точність очищення від адитивного та мультиплікативного шуму; ▪ не автоматизовано вибір структури та параметрів моделі фільтра

Закінчення таблиці 1

Метод на основі	Переваги	Недоліки
адаптивного фільтра	адаптивне визначення параметрів фільтра	■ невисока точність очищення від адитивного та мультиплікативного шуму; ■ не автоматизовано вибір структури моделі фільтра
гаусового фільтра	■ адаптивне визначення параметрів фільтра; ■ висока точність очищення від адитивного та мультиплікативного шуму для візуального сигналу	не автоматизовано вибір структури моделі фільтра
середньоарифметичного фільтра	■ адаптивне визначення параметрів фільтра; ■ висока точність очищення від адитивного та мультиплікативного шуму для візуального сигналу	не автоматизовано вибір структури моделі фільтра
середньогометричного фільтра	адаптивне визначення параметрів фільтра	■ невисока точність очищення від адитивного та мультиплікативного шуму; ■ не автоматизовано вибір структури моделі фільтра
середньогармонійного фільтра	адаптивне визначення параметрів фільтра	■ невисока точність очищення від адитивного та мультиплікативного шуму; ■ не автоматизовано вибір структури моделі фільтра
контргармонійного фільтра	адаптивне визначення параметрів фільтра	■ невисока точність очищення від адитивного та мультиплікативного шуму; ■ не автоматизовано вибір структури моделі фільтра
медіанного фільтра	■ адаптивне визначення параметрів фільтра; ■ висока точність очищення від адитивного та мультиплікативного шуму	не автоматизовано вибір структури моделі фільтра
середньо α -усіченого фільтра	■ адаптивне визначення параметрів фільтра; ■ найвища точність очищення від адитивного та мультиплікативного шуму	не автоматизовано вибір структури моделі фільтра
середньоточкового фільтра	адаптивне визначення параметрів фільтра	■ невисока точність очищення від адитивного та мультиплікативного шуму для візуального сигналу; ■ не автоматизовано вибір структури моделі фільтра
консервативного фільтра	адаптивне визначення параметрів фільтра.	■ невисока точність очищення від адитивного та мультиплікативного шуму; ■ не автоматизовано вибір структури моделі фільтра

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності очищення від шуму візуальної біометричної інформації на підставі згладжуючої фільтрації.

Завдання дослідження, поставлені та вирішені для досягнення мети:

- визначити модель згладжуючої фільтрації;
- визначити методику структурної та параметричної ідентифікації моделі згладжуючої фільтрації;
- визначити характеристики та критерій якості очищення від шуму візуального сигналу;
- провести чисельні дослідження.

Опис моделі згладжуючої фільтрації.

Відповідно до таблиці 1 середньо α -усічений фільтр має найвищу точність, тому в роботі як модель згладжуючої фільтрації візуального сигналу обрано модель середньо α -усіченої фільтрації з параметром усічення, кратним 2, модель якого в цій роботі пропонується визначити в наступному вигляді:

$$s(n_1, n_2) = \frac{\sum_{m=-\frac{(2M+1)^2-1}{2}+\frac{\alpha}{2}}^{\frac{(2M+1)^2-1}{2}-\frac{\alpha}{2}} a_{n_1 n_2}(m)}{(2M+1)^2 - \alpha},$$

$$n_1 \in \overline{M+1, N_1-M}, \quad n_2 \in \overline{M+1, N_2-M},$$

$$a_{n_1 n_2} = \text{sort}(f(n_1-M, n_2-M), \dots, f(n_1-M, n_2+M), \dots, f(n_1, n_2-M), \dots, f(n_1, n_2+M), \dots, f(n_1+M, n_2-M), \dots, f(n_1+M, n_2+M)),$$

$$\alpha = \frac{(2M+1)^2 - 1}{2},$$

де $f(n_1, n_2)$ – зображення з шумом;

$s(n_1, n_2)$ – знешумлений візуальний сигнал;

$\text{sort}(\cdot)$ – функція, що повертає вектор, упорядкований за зростанням;

α – параметр усічення;

M – порядок фільтра.

Методика структурної та параметричної ідентифікації моделі згладжуючої фільтрації візуального сигналу. Визначення структури моделі згладжуючої фільтрації візуального сигналу зводиться до визначення порядку фільтра, яке згідно з таблицею 1 не автоматизовано і виконується оператором на основі його емпіричного досвіду. Тому в роботі для визначення порядку фільтра пропонується метод на основі статистичного оці-

нювання якості очищення від шуму, який включає наступні кроки:

1. Задати 8-бітне зображення з шумом $f(n_1, n_2)$, $n_1 \in \overline{1, N_1}, n_2 \in \overline{1, N_2}$. Задати 8-бітне зображення без шуму $\tilde{f}(n_1, n_2)$, $n_1 \in \overline{1, N_1}, n_2 \in \overline{1, N_2}$.

2. Обчислити початкову середньоквадратичну помилку

$$MSE^{old} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} (\tilde{f}(n_1, n_2) - f(n_1, n_2))^2.$$

3. Встановити порядок фільтра $M = 1$. Задати параметр α кратним 2, причому $\alpha = \frac{(2M+1)^2 - 1}{2}$.

4. Створити для кожного пікселя зображення вектора у вигляді

$$a_{n_1 n_2} = (f(n_1-M, n_2-M), \dots, f(n_1-M, n_2+M), \dots, f(n_1, n_2-M), \dots, f(n_1, n_2+M), \dots, f(n_1+M, n_2-M), \dots, f(n_1+M, n_2+M)),$$

$$n_1 \in \overline{M+1, N_1-M}, \quad n_2 \in \overline{M+1, N_2-M}.$$

5. Сортувати для кожного n -го пікселя зображення елементи його вектора $a_{n_1 n_2}$ за зростанням.

6. Виконати середньо α -усічену фільтрацію візуального сигналу у вигляді

$$y(n_1, n_2) = \frac{\sum_{m=-\frac{(2M+1)^2-1}{2}+\frac{\alpha}{2}}^{\frac{(2M+1)^2-1}{2}-\frac{\alpha}{2}} a_{n_1 n_2}(m)}{(2M+1)^2 - \alpha},$$

$$n_1 \in \overline{M+1, N_1-M}, \quad n_2 \in \overline{M+1, N_2-M}.$$

7. Обчислити середньоквадратичну помилку

$$MSE = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} (\tilde{f}(n_1, n_2) - s(n_1, n_2))^2.$$

8. Якщо $MSE^{old} > MSE$, то $M = M + 1$, $\alpha = \frac{(2M+1)^2 - 1}{2}$, $MSE^{old} = MSE$, перехід до кроку 4.

В результаті визначається порядок середньо α -усіченого фільтра.

Характеристики та критерій якості очищення від шуму візуального сигналу. Для оцінювання методів очищення від шуму у роботі використовуються такі характеристики:

1. Середньоквадратична помилка

$$MSE = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} (\tilde{f}(n_1, n_2) - s(n_1, n_2))^2,$$

де $\tilde{f}(n_1, n_2)$ – візуальний сигнал без шуму;
 $s(n_1, n_2)$ – знешумлений візуальний сигнал.

2. Відношення сигнал/шум (в дБ)

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} \tilde{f}^2(n_1, n_2)}{\sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} v^2(n_1, n_2)} \right),$$

де $\tilde{f}(n_1, n_2)$ – візуальний сигнал без шуму;
 $v(n_1, n_2)$ – шум.

У роботі формулюється наступний критерій якості очищення від шуму, що означає вибір такого знешумленого візуального сигналу, що доставляє максимум відношення сигнал/шум:

$$F = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{1}{N_1 N_2} \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} \tilde{f}^2(n_1, n_2)}{MSE} \right) \rightarrow \max_{s(n_1, n_2)}. \quad (1)$$

Результати досліджень. Експерименти проводилися на комп'ютері з процесором Intel Pentium Quad-Core з тактовою частотою 2.58 ГГц в середовищі MATLAB.

Для візуальних сигналів, що містять зображення облич, встановлювалася кількість рівнів квантування $L = 256$, розмір зображення – 1024×1024 .

Результати чисельного дослідження порога методу очищення від шуму на основі вейвлет-аналізу з пороговою обробкою у випадку вейвлета Добеші порядку $M = 8$ для візуальних сигналів людей з бази даних Siblings [30], які були зашумлені адитивним гаусовим шумом з математичним очікуванням 0 та дисперсією 0,001 (відношення сигнал/шум – приблизно 23 дБ), представлені в таблиці 2, а які були зашумлені мультиплікативним гаусовим шумом з математичним очі-

куванням 1 і дисперсією 0,01 (відношення сигнал/шум – приблизно 38 дБ), наведені в таблиці 3.

Вибір набору даних LQfaces з бази даних Siblings здійснено через наявність в ньому фотографій облич людей з різною роздільною здатністю, достатньою для проведення чисельного дослідження параметрів методів очищення від шуму. Цей набір даних містить фотографії 98 пар братів і сестер (196 особин) суб'єктів-знаменитостей, знайдених в Інтернеті. Пози напівфронтальні. На обличчях часто вираз обличчя (посмішка), а зображення зроблені за різних умов освітлення. Особи становлять 45,5 % чоловіків, і в основному європейці [30].

Таблиця 2 – Результати чисельного дослідження параметрів методу очищення від шуму на основі вейвлет-аналізу з пороговою обробкою у випадку адитивного гаусового шуму

Порогова обробка	Середньоквадратична помилка у випадку		
	універсального порогу	SURE-порогу	мінімаксного порогу
м'яка	75,8397	61,1618	62,7804
жорстка	116,6381	62,4308	97,0012

Таблиця 3 – Результати чисельного дослідження параметрів методу очищення від шуму на основі вейвлет-аналізу з граничною обробкою у випадку мультиплікативного гаусового шуму

Порогова обробка	Середньоквадратична помилка у випадку		
	універсального порогу	SURE-порогу	мінімаксного порогу
м'яка	80,2837	62,4530	69,0839
жорстка	111,5864	63,0517	94,3165

Результати чисельного дослідження параметра методу очищення від шуму на основі гаусового фільтра для візуальних сигналів людей з бази даних Siblings [30], які були зашумлені адитивним гаусовим шумом з математичним очікуванням 0 і дисперсією 0,001 (відношення сигнал/шум – приблизно 23 дБ), представлені в таблиці 4, а які були зашумлені мультиплікативним гаусовим шумом з математичним очікуванням 1 та дисперсією 0,01 (відношення сигнал/шум – приблизно 38 дБ), наведені в таблиці 5.

Таблиця 4 – Результати чисельного дослідження параметрів методу очищення від шуму на основі гаусового фільтра у випадку адитивного гаусового шуму

Середньоквадратична помилка у випадку значення параметра гаусового фільтра		
$\sigma = 0,3$	$\sigma = 0,5$	$\sigma = 0,7$
62,6479	26,8666	14,5153

Таблиця 5 – Результати чисельного дослідження параметрів методу очищення від шуму на основі гаусового фільтра у випадку мультиплікативного гаусового шуму

Середньоквадратична помилка у випадку значення параметра гаусового фільтра		
$\sigma = 0,3$	$\sigma = 0,5$	$\sigma = 0,7$
62,1002	27,1948	14,4523

Для візуальних сигналів, що містять зображення облич, встановлювалася кількість рівнів квантування $L = 256$, розмір зображення – 1024×1024 .

Результати чисельного дослідження методів очищення від шуму на основі:

- вейвлет-аналізу з пороговою обробкою у випадку вейвлета Добеші порядку $M = 8$ з м'якою пороговою обробкою з SURE-порогом;
- адаптивного фільтра порядку $M = 2$;
- гаусового фільтра порядку $M = 1$ з параметром $\sigma = 0,7$;
- середньоарифметичного фільтра порядку $M = 1$;
- середньгеометричного фільтра порядку $M = 1$;
- середньгармонійного фільтра порядку $M = 1$;
- контргармонійного фільтра порядку $M = 1$ з параметром $Q = 1$;
- медіанного фільтра порядку $M = 2$;
- середньо α -усіченого фільтра порядку $M = 2$ з параметром $\alpha = 12$;
- середньоточкового фільтра порядку $M = 1$;
- консервативного фільтра порядку $M = 1$;

для візуальних сигналів людей з бази даних Siblings, які були зашумлені адитивним гаусовим шумом з математичним очікуванням 0 та дисперсією 0,001 (відношення сигнал/шум – приблизно 23 дБ), представлені в таблиці 6, а

які були зашумлені мультиплікативним гаусовим шумом з математичним очікуванням 1 та дисперсією 0,01 (відношення сигнал/шум – приблизно 38 дБ), наведені в таблиці 7.

Таблиця 6 – Результати чисельного дослідження методів очищення від шуму у випадку адитивного гаусового шуму

Метод очищення від шуму на основі	Середньоквадратична помилка
вейвлет-аналізу із пороговою обробкою	61,1618
адаптивного фільтра	25,0059
гаусового фільтра	14,5153
середньоарифметичного фільтра	13,5166
середньгеометричного фільтра	21,0175
середньгармонійного фільтра	26,8280
контргармонійного фільтра	23,0710
медіанного фільтра	13,7405
середньо α -усіченого фільтра	12,4101
середньоточкового фільтра	21,5423
консервативного фільтра	43,9773

Таблиця 7 – Результати чисельного дослідження методів очищення від шуму у випадку адитивного гаусового шуму

Метод очищення від шуму на основі	Середньоквадратична помилка
вейвлет-аналізу із пороговою обробкою	62,4530
адаптивного фільтра	29,3010
гаусового фільтра	14,4523
середньоарифметичного фільтра	13,4708
середньгеометричного фільтра	19,2765
середньгармонійного фільтра	19,8429
контргармонійного фільтра	19,6940
медіанного фільтра	13,7738
середньо α -усіченого фільтра	12,7022
середньоточкового фільтра	20,9723
консервативного фільтра	44,6537

На рисунках 1-5 наведено приклад та мультиплікативного гаусового шуму середньо α -усіченим фільтром.



Рисунок 1 – Вихідне зображення обличчя (8-біт, розмір 1024×1024)

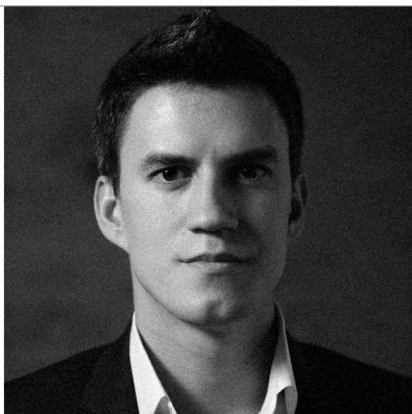


Рисунок 2 – Зображення обличчя з адитивним гаусовим шумом із дисперсією 0,001

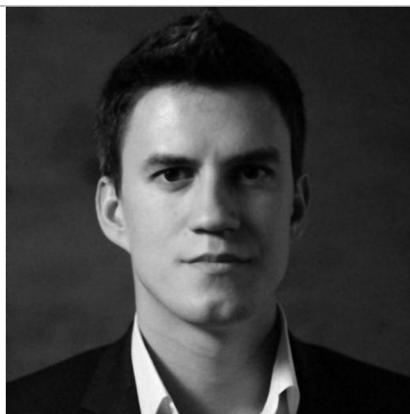


Рисунок 3 – Зображення обличчя після очищення від адитивного гаусового шуму середньо α -усіченим фільтром порядку $M=2$ з параметром $\alpha=2$

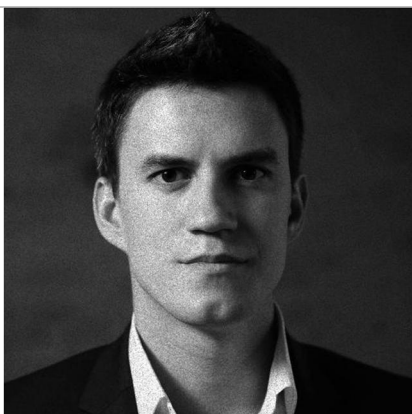


Рисунок 4 – Зображення обличчя з мультиплікативним гаусовим шумом із дисперсією 0,01



Рисунок 5 – Зображення обличчя після очищення від мультиплікативного гаусового шуму середньо α -усіченим фільтром порядку $M=2$ з параметром $\alpha=12$

Обговорення результатів. Результат, поданий у таблицях 2-3, показує, що найменшу середньоквадратичну помилку, тобто таку, що задовольняє критерію якості, забезпечує жорстка і м'яка обробка з SURE-порогом.

На основі проведених експериментів можна зробити такі висновки. Універсальний та мінімаксний порогови призводять до більш грубої порогової обробки, оскільки не враховують значення деталізуючих коефіцієнтів, але мають меншу обчислювальну складність. SURE-порог приводить до більш тонкої порогової обробки, оскільки враховує значення деталізуючих коефіцієнтів, але має більшу обчислювальну складність.

Результат, представлений у таблицях 4-5, показує, що найменшу середньоквадратичну помилку, тобто таку, що задовольняє критерію якості, забезпечує значення параметра гаусового фільтра $\sigma = 0,7$.

Результат, поданий у таблицях 6-7, показує, що найменшу середньоквадратичну помилку, тобто таку, що задовольняє критерію якості, забезпечує середньо α -усічений фільтр.

Проведено чисельне дослідження методів очищення від шуму візуального сигналу, яке дозволило визначити найбільш ефективний метод.

В результаті проведеного чисельного дослідження методів очищення від шуму візуального сигналу у випадку адитивного гаусового шуму та у випадку мультиплікативного гаусового шуму визначено, що найменшу середньоквадратичну помилку, тобто таку, що відповідає критерію якості, забезпечує середньо α -усічений фільтр.

Запропонований метод дозволяє ставити і вирішувати завдання попередньої обробки візуального сигналу, що використовуються для аналізу і зберігання біометричної інформації.

Висновки. В статті в межах створення методу очищення від шуму візуальної біометричної інформації були вирішені такі завдання:

- визначено модель згладжуючої фільтрації;
- визначено методику структурної та параметричної ідентифікації моделі згладжуючої фільтрації;
- визначено характеристики та критерій якості очищення від шуму візуального сигналу;
- проведено чисельні дослідження.

Наукова новизна проведеного дослідження полягає в наступному:

- визначено структуру моделі згладжуючої фільтрації візуального сигналу, яка, на відміну від існуючих, дозволяє встановити залежність між параметрами та порядком моделі, що підвищує якість очищення візуального сигналу від шуму;
- розроблено методику ідентифікації моделі згладжуючої фільтрації візуального сигналу, яка, на відміну від існуючих, дозволяє визначити не тільки параметри, а й структуру на основі статистичного оцінювання, що підвищує якість очищення візуального сигналу від шуму;
- визначено критерій якості очищення від шуму візуального сигналу, який, на відміну від існуючих, дозволяє врахувати декілька характеристик.

Практичне значення. Запропонований метод дозволяє ставити та вирішувати завдання попередньої обробки візуального сигналу, що використовується для аналізу та зберігання біометричної інформації в інтелектуальних комп'ютерних системах.

Перспективи подальших досліджень. Надалі передбачається досліджувати питання впливу методів шумоочищення на виявлення контуру обличчя та ідентифікацію особистості.

Список використаних джерел

- [1] Є. Є. Федоров, О. В. Нечипоренко, Т. Ю. Уткіна, та Я. В. Корпань, *Моделі та методи комп'ютерних систем розпізнавання зорових образів*: монографія. Черкаси, Україна, 2021.
- [2] S. A. Broughton, and K. Bryan, *Discrete Fourier Analysis and Wavelets. Applications to Signal and Image Processing*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2018.
- [3] P. R. Hill, *Audio and Speech Processing with MATLAB*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2019.
- [4] A. K. Nandi, N. Sujatha, R. Menaka, and J. S. R. Alex, *Computational Signal Processing and Analysis*. Singapore: Springer, 2018.
- [5] W. Burger, and M. J. Burge, *Digital Image. An Algorithmic Introduction Using Java*. London, GB: Springer-Verlag, 2016.
- [6] K. S. Thyagarajan, *Introduction to Digital Signal Processing using MATLAB with Ap*

- plication to Digital Communications*. Cham, Switzerland: Springer, 2020.
- [7] Б. Уидроу, и С. Стирнз, *Адаптивная обработка сигналов*. Москва, Россия: Радио и связь, 1989.
- [8] К. Ф. Коуэн, и П. М. Грант, *Адаптивные фильтры*. Москва, Россия: Мир, 1988.
- [9] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Harlow, Essex, GB: Pearson Education, 2014.
- [10] P. S. R. Diniz, *Adaptive Filtering Algorithms and Practical Implementation*, Cham, Switzerland: Springer, 2020.
- [11] F. Gustafsson, *Adaptive Filtering and Change Detection*. Chichester, West Sussex, GB: John Wiley & Sons, 2000.
- [12] A. D. Poularikas, and Z. M. Ramadan, *Adaptive Filtering Primer with MATLAB*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.
- [13] M. Najim, *Modeling, Estimation and Optimal Filtering in Signal Processing*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2008.
- [14] M. G. Bellanger, *Adaptive Digital Filters and Signal Analysis*. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 2001.
- [15] J. S. Lim, *Two-Dimensional Signal and Image Processing*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1990.
- [16] Р. Гонсалес, Р. Вудс, и С. Эддинс, *Цифровая обработка изображений в среде MATLAB*. Москва, Россия: Техносфера, 2006.
- [17] *Методы компьютерной обработки изображений*, В. А. Сойфер, Ред. Москва, Россия: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
- [18] Н. Ю. Секунов, *Обработка звука на РС*. Санкт-Петербург, Россия: БХВ-Петербург, 2001.
- [19] S. F. Boll, "Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction", in *Proc. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ASSP-27)*, 1979, vol. 2, pp. 113-120.
- [20] M. Berouti, R. Schwartz, and J. Makhoul, "Enhancement of speech corrupted by acoustic noise", in *Proc. IEEE, Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP-79)*, 1979, pp. 208-211.
- [21] R. J. McAulay, and M. L. Malpass, "Speech enhancement using a soft-decision noise suppression filter", in *Proc. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1980, vol. 28, no. 2, pp. 137-144.
- [22] С. Малла, *Вейвлеты в обработке сигналов*. Москва, Россия: Мир, 2005.
- [23] E. Fedorov, T. Utkina, O. Nechyporenko, and Y. Korpan, "Method of speech signal structuring and transforming for biometric personality identification", *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1158, pp. 307-322, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-61656-4.
- [24] G. X. Ritter, and J. N. Wilson, *Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2001.
- [25] S.-T. Bow, *Pattern Recognition and Image Preprocessing*. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 2002.
- [26] W. K. Pratt, *Digital Image Processing*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2001.
- [27] U. Qidwai, and C. H. Chen, *Digital Image Processing: An Algorithmic Approach with MATLAB*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2009.
- [28] Н. Н. Красильников, *Цифровая обработка 2D и 3D изображений*. Санкт-Петербург, Россия: БХВ-Петербург, 2011.
- [29] *Mathematical Morphology and its Application to Image and Signal Processing*, J. Goutsias, L. Vincent, and D. S. Bloomberg, Eds. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [30] Siblings Database. [Online]. Available: <https://areeweb.polito.it/ricerca/cgvg/siblingsDB.html>.

References

- [1] E. E. Fedorov, O. V. Nechyporenko, T. Yu. Utkina, and Ya. V. Korpan, *Models and Methods of Computer Systems for Visual Image Recognition: a monograph*. Cherkasy, Ukraine, 2021 [in Ukrainian].
- [2] S. A. Broughton, and K. Bryan, *Discrete Fourier Analysis and Wavelets. Applications to Signal and Image Processing*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2018.
- [3] P. R. Hill, *Audio and Speech Processing with MATLAB*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2019.
- [4] A. K. Nandi, N. Sujatha, R. Menaka, and J. S. R. Alex, *Computational Signal Processing and Analysis*. Singapore: Springer, 2018.
- [5] W. Burger, and M. J. Burge, *Digital Image. An Algorithmic Introduction Using Java*. London, GB: Springer-Verlag, 2016.

- [6] K. S. Thyagarajan, *Introduction to Digital Signal Processing using MATLAB with Application to Digital Communications*. Cham, Switzerland: Springer, 2020.
- [7] B. Widrow, and S. Stearns, *Adaptive Signal Processing*. Moscow, Russia: Radio i svyaz, 1989 [in Russian].
- [8] C. F. Cowan, and P. M. Grant, *Adaptive Filters*. Moscow, Russia: Mir, 1988 [in Russian].
- [9] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Harlow, Essex, GB: Pearson Education, 2014.
- [10] P. S. R. Diniz, *Adaptive Filtering Algorithms and Practical Implementation*, Cham, Switzerland: Springer, 2020.
- [11] F. Gustafsson, *Adaptive Filtering and Change Detection*. Chichester, West Sussex, GB: John Wiley & Sons, 2000.
- [12] A. D. Poularikas, and Z. M. Ramadan, *Adaptive Filtering Primer with MATLAB*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.
- [13] M. Najim, *Modeling, Estimation and Optimal Filtering in Signal Processing*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2008.
- [14] M. G. Bellanger, *Adaptive Digital Filters and Signal Analysis*. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 2001.
- [15] J. S. Lim, *Two-Dimensional Signal and Image Processing*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1990.
- [16] R. Gonzalez, R. Woods, and S. Eddins, *Digital Image Processing in MATLAB*. Moscow, Russia: Tekhnosfera, 2006 [in Russian].
- [17] *Methods of Computer Image Processing*, V. A. Soyfer, Ed. Moscow, Russia: FIZ-MATLIT, 2003 [in Russian].
- [18] N. Yu. Sekunov, *PC Sound Processing*. St. Petersburg, Russia: BHV-Petersburg, 2001 [in Russian].
- [19] S. F. Boll, "Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction", in *Proc. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ASSP-27)*, 1979, vol. 2, pp. 113-120.
- [20] M. Berouti, R. Schwartz, and J. Makhoul, "Enhancement of speech corrupted by acoustic noise", in *Proc. IEEE, Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP-79)*, 1979, pp. 208-211.
- [21] R. J. McAulay, and M. L. Malpass, "Speech enhancement using a soft-decision noise suppression filter", in *Proc. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1980, vol. 28, no. 2, pp. 137-144.
- [22] S. Malla, *Wavelets in Signal Processing*. Moscow, Russia: Mir, 2005 [in Russian].
- [23] E. Fedorov, T. Utkina, O. Nechyporenko, and Y. Korpan, "Method of speech signal structuring and transforming for biometric personality identification", *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1158, pp. 307-322, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-61656-4.
- [24] G. X. Ritter, and J. N. Wilson, *Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2001.
- [25] S.-T. Bow, *Pattern Recognition and Image Preprocessing*. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 2002.
- [26] W. K. Pratt, *Digital Image Processing*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2001.
- [27] U. Qidwai, and C. H. Chen, *Digital Image Processing: An Algorithmic Approach with MATLAB*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2009.
- [28] N. N. Krasilnikov, *Digital Processing of 2D and 3D Images*. St. Petersburg, Russia: BHV-Petersburg, 2011 [in Russian].
- [29] *Mathematical Morphology and its Application to Image and Signal Processing*, J. Goutsias, L. Vincent, and D. S. Bloomberg, Eds. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [30] Siblings Database. [Online]. Available: <https://areeweb.polito.it/ricerca/cgvg/siblingsDB.html>.

E. E. Fedorov, *Dr. Tech. Sc., Professor*,
T. Yu. Utkina, *Ph. D., Associate Professor*
e-mail: t.utkina@chdtu.edu.ua
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

NOISE CLEANING METHOD FOR VISUAL BIOMETRIC INFORMATION

One of the most important problems that exist in security systems today is to increase the effectiveness of identification of a person. Computer biometric identification speeds up and increases the accuracy of the recognition process, which is especially critical in a limited time. A special class of biometric identification of a person is formed by methods based on the analysis of visual information. The first step in processing the visual biometric information for analysis and subsequent recognition of objects such as a human face is digital image filtering or low-frequency noise elimination due to distortion of various imaging devices and their subsequent transmission through various communication channels.

The paper proposes the noise cleaning method for visual biometric information by determining the structure of the smoothing filtering model of visual information about the identified person based on statistical evaluation of the noise cleaning quality of two-dimensional signal.

The systematic analysis of modern noise cleaning methods for image is carried out. Smoothing adaptive linear time filtering; smoothing adaptive linear frequency filtering, called spectral subtraction; wavelet analysis with threshold processing; smoothing non-adaptive linear time filtering; smoothing non-linear filtration have been studied. It is established that the considered cleaning methods for visual biometric information have one or more of the following disadvantages: not automation of the choice of structure and parameters of the filter model and/or the low accuracy of additive and multiplicative noise cleaning. Therefore, it is important to develop the noise cleaning method of visual biometric information for pre-processing of human face images, which will ensure the necessary image quality and will not require time-consuming procedures to determine parameter values by the operator based on his empirical experience.

The structure of the smoothing filtration model, which is reduced to determining the filter order, is determined. The characteristics and quality criterion of visual signal noise cleaning are offered. Numerous studies have been performed to determine the filter order parameter using the Siblings database, which allows to establish the most effective method based on statistical evaluation of the quality of visual information noise cleaning: in the case of additive Gaussian noise and in the case of multiplicative Gaussian noise, the least standard error, that meets the criterion of quality of visual signal noise cleaning, provides a medium α -truncated filter.

The proposed method allows to set and solve the problem of the visual signal pre-processing used for analysis and storage of visual information in intelligent computer systems of biometric identification of the person on the face image.

Keywords: *visual signal, time filtering, frequency filtering, threshold processing, wavelet transform, additive Gaussian noise, multiplicative Gaussian noise.*

[0000-0002-2046-481X] **Е. В. Фауре**, *д-р техн. наук, професор*,
[0000-0002-3185-8427] **Б. А. Ступка**

e-mail: b.a.stupka.fitis20@chdtu.edu.ua

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВСТАНОВЛЕННЯ ЦИКЛОВОГО СИНХРОНІЗМУ В СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ З НЕРОЗДІЛЬНИМ ФАКТОРІАЛЬНИМ КОДУВАННЯМ

У роботі досліджено ефективність методів циклової синхронізації систем передавання інформації з нероздільним факторіальним кодуванням: методу, що використовує як синхрокомбінацію перестановку, що має максимальне значення мінімальної відстані Хеммінга від її двійкового представлення до всіх її циклічних зсувів, та методу, який базується на використанні як синхрокомбінації перестановки чисел з її поділом на префіксну та суфіксну частини. Розроблено та описано структурні схеми імітаційних моделей системи передавання даних для кожного з методів. Описано середовище розробки та параметри апаратної частини, на якій виконувалося моделювання. Побудовано програмні імітаційні моделі систем передавання даних, у яких реалізовано алгоритми встановлення циклового синхронізму для кожного з наведених методів. Обґрунтовано основні модулі, які використовувалися як для реалізації моделей, так і для інтерпретації результатів. Оцінено показники ефективності методів циклової синхронізації: швидкість встановлення синхронізму та ймовірність хибного фазування залежно від ймовірності бітової помилки в каналі зв'язку. Продемонстровано особливості та переваги для кожного з методів.

Ключові слова: факторіальне кодування, циклова синхронізація, синхрокомбінація, ймовірність встановлення синхронізму, завада високої інтенсивності, імітаційне моделювання, короткий пакет.

Вступ. Процедура циклового фазування є невід'ємною частиною всіх стандартних протоколів мережевої взаємодії [1]–[5]. Одним із основних параметрів, за яким оцінюється якість системи циклової синхронізації, є час входження в синхронізм. Розвиток телекомунікаційних систем приводить до необхідності постійного зменшення часу входження в синхронізм як засобу зменшення витрат часу на процедуру встановлення з'єднання в загальному часі сеансу зв'язку. Ця обставина стимулює постійні пошуки нових технічних рішень, спрямованих на досягнення цієї мети.

Система циклової синхронізації після отримання потоку даних забезпечує ідентифікацію вхідних сигналів циклового вирівнювання (синхрокомбінації або синхрослова). Типовий формат кадру передбачає, що синхрокомбінація відправляється в кожному кадрі і використовується, крім кадрової синхронізації, для оцінки якості каналу.

Цю роботу спрямовано на розвиток теорії побудови телекомунікаційних систем з нероздільним факторіальним кодуванням [6]–[11]. Телекомунікаційні системи з нероздільним факторіальним кодуванням [8] використовують нестандартну та надлишкову струк-

туру кадру, в якій не передбачено окремого поля початку роздільника кадру (SFD). Циклова синхронізація базується на особливостях кодового слова факторіального коду з відновленням даних за перестановкою (ФКВД) [6].

У публікаціях [12], [13] розроблено та детально досліджено два методи входження в цикловий синхронізм для телекомунікаційних систем передавання інформації з нероздільним факторіальним кодуванням в умовах впливу в каналі зв'язку завад високої інтенсивності. Обидва методи використовують як синхрокомбінацію перестановку π з M символів. Кожен символ перестановки кодується рівномірним двійковим кодом з довжиною кодової комбінації $l_r = \lceil \log_2 M \rceil$ біт. Тоді довжина перестановки π , представленої в двійковому вигляді, дорівнює $n = l_r \cdot M$.

Перший метод [12] передбачає виконання таких кроків:

1) перший символ перестановки π записується послідовністю, що складається тільки з нулів, другий – тільки з одиниць; третій символ перестановки π в двійковому записі повинен починатися нулем, а останній символ – закінчуватися одиницею;

2) у накопичувач приймача записуються три фрагменти отриманої з каналу бітової послідовності. Довжина кожного з фрагментів дорівнює довжині перестановки – M символів або n біт;

3) за прийнятими фрагментами формується уточнена послідовність R , біти якої обчислюються за мажоритарним принципом на основі відповідних біт фрагментів;

4) в уточненій послідовності R перевіряється наявність комбінації $\underbrace{10\dots 01\dots 10}_{l_r}$;

5) уточнена послідовність R порівнюється з синхрокомбінацією π . У випадку їх збігів з точністю до одного символу процедура циклового фазування припиняється;

6) якщо комбінацію $\underbrace{10\dots 01\dots 10}_{l_r}$ в уточ-

неній послідовності R не знайдено або їх більше однієї, а також якщо суфікс уточненої послідовності R відрізняється від суфікса еталонної синхрокомбінації π більше, ніж на один символ, додатково накопичуються ще два фрагменти. Перехід на п. 3.

Після досягнення деякого заданого порогу кількість накопичених фрагментів не змінюється. Процес пошуку синхронізму триває, поки або не буде знайдений синхронізм, або не закінчиться ліміт часу на виконання пошуку синхронізму.

Другий метод [13] передбачає виконання таких кроків:

1) синхрокомбінацією є перестановка π довжини M , що має максимальне значення мінімальної відстані Хеммінга від її двійкового представлення до всіх її циклічних зсувів;

2) приймачем накопичуються прийняті з каналу зв'язку K блоків, що складаються з l фрагментів по n біт. Значення K і l змінюються відповідно до описаної в [13] методики;

3) для кожного блоку незалежно обчислюється уточнена послідовність R_k , $k \in [1, K]$. Кожний біт цієї послідовності обчислюється за мажоритарним принципом, враховуючи відповідні біти прийнятих фрагментів;

4) для кожної уточненої послідовності R_k обчислюються відстані Хеммінга до всіх циклічних зсувів синхрокомбінації π . Якщо для якогось із зсувів ця відстань не перевищує значення $d_{lim} = \lfloor (d-1)/2 \rfloor$, приймається рішення про відповідність прийнятої послідовності цьому зсуву;

5) якщо всі послідовності R_k , $k \in [1, K]$, відповідають одному і тому ж зсуву синхрокомбінації, синхронізм встановлено. В іншому випадку повторюються всі операції виявлення синхрокомбінації, починаючи з п. 2.

Кількість накопичених фрагментів може послідовно збільшуватися до деякого, заздалегідь заданого порогу.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є оцінка показників ефективності методів циклової синхронізації [12], [13] для телекомунікаційних систем передавання інформації з нероздільним факторіальним кодуванням на основі імітаційного моделювання та дослідження області застосування для кожного з методів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

- побудувати імітаційну модель системи передавання інформації з нероздільним ФКВД;

- у блоках циклової синхронізації приймачів реалізувати алгоритми, побудовані за описаними методами;

- виконати дослідження часу входження в цикловий синхронізм для різних параметрів каналу зв'язку (значень бітової помилки в каналі зв'язку);

- виконати порівняльний аналіз отриманих показників часу входження в цикловий синхронізм;

- сформулювати рекомендації щодо використання методів циклової синхронізації для телекомунікаційних систем передавання інформації з нероздільним факторіальним кодуванням.

Виклад основного матеріалу. Виходячи з [13], перший метод [12] має наступні недоліки:

1) інтегральна функція часу входження в синхронізм не є оптимальною, оскільки запропонована процедура не враховує всю структурну надлишковість кодового слова ФКВД;

2) імовірність встановлення хибного синхронізму відносно велика, що особливо проявляється зі збільшенням імовірності бітової помилки в каналі зв'язку, а також для великих значень коефіцієнта накопичення.

За теоретичними оцінками з [13], другий метод має кращі кількісні показники встановлення циклового синхронізму телекомунікаційних систем передавання інформації з ФКВД в умовах впливу в каналі зв'язку завад високої інтенсивності. Зокрема, підвищується ймовірність встановлення циклового синхронізму для заданого коефіцієнта нако-

пичення, а також зменшується ймовірність встановлення хибного синхронізму.

Наведений на рисунку 1 роботи [13] графік свідчить про більш швидке досягнення відносною частотою встановлення вірного синхронізму заданого порогового значення для другого методу [13] порівняно з першим методом [12]. Разом з тим, існують діапазони значень кількості накопичених фрагментів, де

відносна частота встановлення вірного синхронізму для першого методу [12] вища. Водночас перший метод [12] не задовольняє поставленим вимогам щодо ймовірності встановлення хибного синхронізму.

Побудова та опис імітаційних моделей. Виконаємо побудову імітаційних моделей систем передавання даних (СПД) з ФКВД.

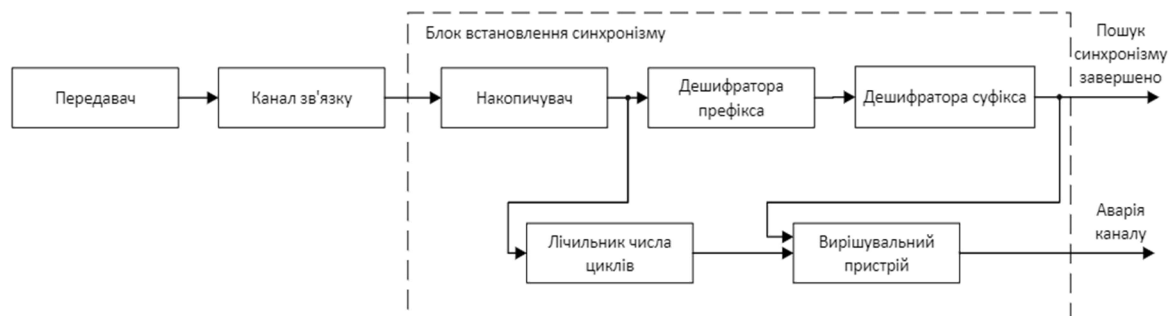


Рисунок 1 – Структурна схема імітаційної моделі СПД із застосуванням першого методу циклової синхронізації [12]

Розглянемо структурну схему імітаційної моделі СПД із застосуванням першого методу циклової синхронізації [12] (рисунку 1).

Для цього методу синхрокомбінація містить префікс, що виявляє межі символів. Прикладом такої синхрокомбінації для $M=8$ може бути перестановка

$$\pi = (000,111,001,010,100,110,101,011) \text{ [12].}$$

Обрана послідовність записується в постійний запам'ятовувальний пристрій (ПЗП) передавача, який є джерелом синхрокомбінації передавальної станції.

У приймач надходить синхрокомбінація, уражена дією завад у каналі зв'язку і зсунута за фазою щодо положення ковзного вікна (виконаного у вигляді регістра зсуву). Водночас ні інтенсивність завади, ні зсув ковзного вікна (величина фазової неузгодженості циклів передавача та приймача) апріорно невідомі.

Під час старту процедури пошуку синхронізму встановлюється мінімальне значення коефіцієнта накопичення $l=3$. У буферний накопичувач записуються три фрагменти прийнятої з каналу зв'язку послідовності. Довжина кожного фрагмента дорівнює довжині синхрокомбінації. За цими трьома фрагментами мажоритарно обчислюється уточнена послідовність R .

У накопичувачі виконується побітовий циклічний зсув уточненої послідовності R .

Дешифратор префікса після виконання кожного зі зсувів перевіряє, чи виявлено префікс синхрокомбінації. Якщо префікс виявлено, то дешифратором суфікса перевіряється суфікс. Якщо обидві перевірки завершено позитивно, синхронізм встановлено. У цьому випадку дешифратор суфікса формує сигнал «Пошук синхронізму завершений». Він надсилається зворотним каналом на передавальну станцію.

Якщо ж дешифратором префікса не виявлено префікса синхрокомбінації або дешифратором суфікса не підтверджено цілісність синхрокомбінації, то в накопичувач додатково записуються ще два фрагменти отриманої з каналу послідовності біт. Після цього знову повторюються описані вище дії: обчислюється уточнена послідовність, за якою дешифратор префікса і дешифратор суфікса виконують виявлення синхрокомбінації. Такий пошук синхронного стану триває або до успішного завершення процедури пошуку, або до вичерпання ліміту часу на пошук синхронізму. Для цього система циклової синхронізації містить лічильник кількості циклів. Якщо після закінчення ліміту часу, відведеного на пошук синхронізму, він не знайдений, то вирішувальний пристрій формує сигнал «Аварія каналу». Процедура циклової синхронізації припиняється.

Розглянемо структурну схему імітаційної моделі СПД із застосуванням другого методу циклової синхронізації [13] (рисунку 2).

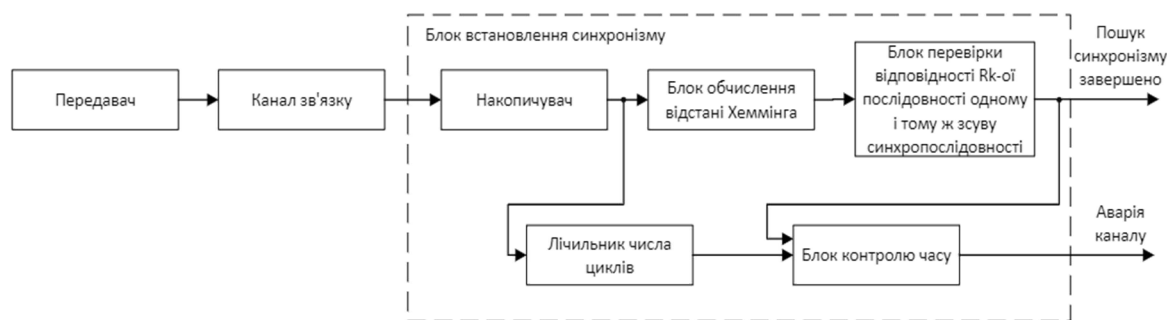


Рисунок 2 – Структурна схема імітаційної моделі СПД із застосуванням другого методу циклової синхронізації [13]

Синхрокомбінацією є перестановка π довжини M , що має максимальне значення мінімальної відстані Хеммінга від її двійкового представлення до всіх її циклічних зсувів. Для $M=8$ такою синхрокомбінацією може бути перестановка $\pi = (000, 001, 111, 011, 010, 101, 100, 110)$ [13]. Ця синхрокомбінація записується в ПЗП передавача, який стане джерелом синхрокомбінації передавальної станції.

У накопичувачі приймача накопичуються прийняті з каналу зв'язку K блоків, що містять l фрагментів по n біт. Значення K і l змінюються відповідно до методики [13], яка забезпечує дотримання заданої ймовірності хибного фазування. У накопичувачі також для кожного блоку незалежно обчислюється уточнена послідовність R_k , $k \in [1, K]$.

У блоці обчислення відстані Хеммінга для кожної уточненої послідовності R_k обчислюються відстані Хеммінга до всіх циклічних зсувів синхрокомбінації. Якщо для якогось із зсувів ця відстань не перевищує значення $d_{lim} = \lfloor (d-1)/2 \rfloor$, приймається рішення про відповідність прийнятої послідовності цьому зсуву.

У блоці перевірки відповідності R_k -ї послідовності одному і тому ж зсуву синхропослідовності виконується перевірка, чи всі послідовності R_k , $k \in [1, K]$, відповідають одному і тому ж зсуву синхропослідовності. Якщо це так, то системою циклової синхронізації приймається рішення про встановлення синхронізму. У цьому випадку блок перевірки на відповідність одному і тому ж зсуву синхрокомбінації для всіх R_k формує сигнал «Пошук синхронізму завершений». Він надсилається зворотним каналом на передавальну станцію.

В іншому випадку повторюються всі операції виявлення синхрокомбінації.

Як і у випадку з першим методом, пошук синхронного стану триває або до успішного завершення процедури пошуку, або до вичерпання ліміту часу на пошук синхронізму.

Опис програмного та апаратного забезпечення. Імітаційні моделі розроблено мовою програмування Python [14] з використанням інтегрованого середовища розробки PyCharm community edition 2020.3 [15].

Зазначимо, що PyCharm [15] створюється JetBrains на основі IntelliJ IDEA і є кросплатформним середовищем розробки, сумісним з Windows, macOS, Linux. Використання PyCharm [15] дозволило ефективно застосувати інструменти аналізу коду, графічний налагоджувач, запуск модульного тестування та підтримку веб-дозволів для Django.

Під час розробки моделі використовувалися наступні модулі Python:

- collections [16]–[19] – надає спеціалізовані типи даних на основі словників, кортежів, наборів, списків. З цього модуля в роботі використано collections. Counter – словник, який дозволяє підрахувати кількість незмінних об'єктів (в більшості випадків рядків). Модуль застосовано для полегшення роботи з результатами експериментів (процес, вихід);

- multiprocessing [17], [20], [21] – дає змогу створювати процеси так само, як і під час створення потоків за допомогою модуля потокової обробки. Цей модуль дозволяє обійти GIL (Global Interpreter Lock), що дає змогу лише одному потоку керувати інтерпретатором Python, і скористатися можливістю використання декількох (всіх) процесорів на комп'ютері. Модуль використано для пришвидшення виконання експериментів за рахунок розпаралелювання виконання експериментів на всіх можливих потоках використовуваного центрального процесора;

- random [14], [16] – для створення блоку даних із заданою ймовірністю бітової помилки p_0 ;

- os [14], [16] – для отримання від системи кількості потоків центрального процесора. Це значення використовується для модульної багатопроцесорної обробки.

Розробка програмної моделі відбувалася на персональному комп'ютері форм-фактора ноутбук з наступними параметрами:

- ОС – Windows 10;
- ЦП – Intel Core i5-8250U;
- ОЗУ 8gb (2x4gb dual channel 2133Mhz);
- Відеокарта – nVIDIA GeForce MX150 2gb;
- Сховище – INTEL SSDSC2KW256G8L (256 Гб, SATA-III).

Реалізація експериментів. Імітаційне моделювання мало на меті визначення таких параметрів:

- швидкість входження в синхронізм залежно від ймовірності бітової помилки p_0 . Цей показник отримано шляхом визначення середнього часу встановлення синхронізму для різних значень p_0 ;

- відносна частота хибного фазування залежно від ймовірності бітової помилки p_0 . Цей показник отримано шляхом визначення кількості хибних фазувань, поділеної на загальну кількість виконаних експериментів для конкретного значення p_0 .

Через значне збільшення часу виконання експерименту для великих значень ймовірності бітової помилки ($p_0 \geq 0.48$) кількість експериментів не була однаковою для всіх значень p_0 :

- для кожного значення $p_0 < 0.48$ проведено 10 000 експериментів;

- для кожного значення $p_0 \geq 0.48$ проведено 1000 експериментів.

Усі експерименти реалізовано в програмному середовищі PyCharm Community Edition [15] на персональному комп'ютері форм-фактора десктоп з наступними параметрами:

- ОС – Windows 10;
- ЦП – Intel Core i5-10400F;
- ОЗУ 32Gb (2x16Gb dual channel 3200Mhz);
- Відеокарта – GeForce GTX 1650 4Gb;
- Сховище – SSD M.2 2280 1TB Samsung.

Результати досліджень. Результати виконання експериментів та обробки їх результатів наведено в графічному вигляді.

Так, на рисунку 3 зображено графіки залежності середнього часу встановлення циклового синхронізму від ймовірності бітової помилки для кожного з розглянутих методів [12], [13].

На рисунку 4 зображено графіки залежності відносної частоти хибного фазування від ймовірності бітової помилки. Такі залежності дозволяють виконати оцінку надійності (достовірності) встановлення синхронізму для кожного з методів.



Рисунок 3 – Графіки залежностей середнього часу встановлення циклового синхронізму від ймовірності бітової помилки

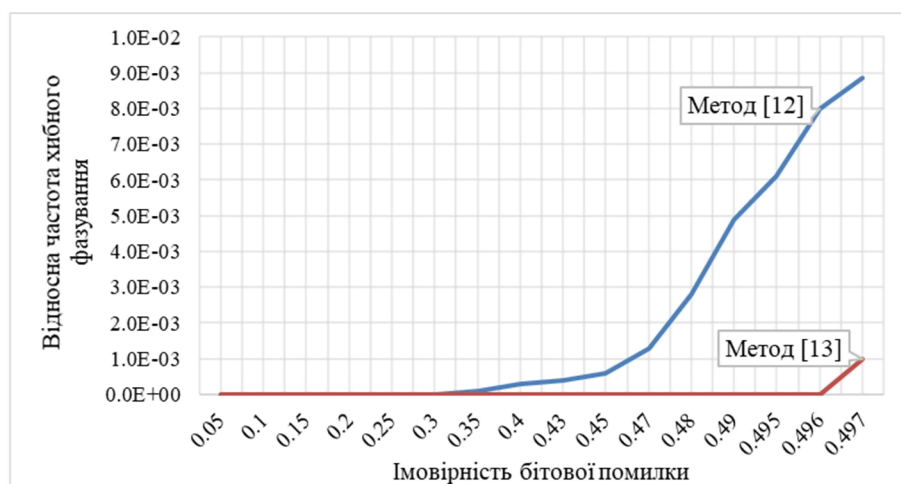


Рисунок 4 – Графіки залежностей відносної частоти встановлення хибного циклового синхронізму від імовірності бітової помилки

Обговорення результатів. Аналіз результатів експериментів свідчить про те, що:

- у каналах з рівнем бітової помилки $p_0 < 0.495$ швидкість встановлення циклового синхронізму є вищою для реалізації першого методу [12], для каналів з $p_0 \geq 0.495$ – для реалізації другого методу [12], [13];

- реалізація першого методу [12] має вищі значення ймовірності хибного фазування.

Зазначені результати пояснюються наступним:

- параметри в реалізації другого методу циклової синхронізації [13] не є оптимальними для всіх значень бітової помилки p_0 , а визначені для $p_0 = 0.495$. Для максимальної ефективності методу [13] імовірність бітової помилки в каналі має бути спрогнозована максимально точно. З другого боку, процедура вибору моментів зміни значень параметрів K і l може бути адаптивною та залежати від імовірності виникнення бітової помилки в каналі зв'язку;

- параметри другого методу циклової синхронізації [13] формуються, виходячи з вимог до забезпечення дотримання заданої ймовірності хибного фазування, дозволяючи визначити її на етапі проектування системи циклової синхронізації.

Висновки. У результаті представленого дослідження побудовано імітаційні моделі систем передавання інформації з нероздільним факторіальним кодуванням із застосуванням відомих методів циклової синхронізації ФКВД [12], [13]. Використання розроблених моделей дозволило виконати оцінку показників ефективності цих методів циклової синхронізації (часу входження в цикловий синхронізм, частоти

встановлення хибного циклового синхронізму для різних параметрів каналу зв'язку). Продемонстровано особливості та переваги для кожного з методів. Порівняльний аналіз отриманих показників дає змогу сформулювати рекомендації щодо застосування кожного з розглянутих методів.

Практична цінність роботи полягає в реалізації алгоритмів циклової синхронізації для ФКВД. У роботі детально описано середовище розробки та основні модулі, які використовувалися для реалізації алгоритмів.

Предметом подальших досліджень є побудова та дослідження системи циклової синхронізації [13] з адаптивним визначенням моментів зміни значень K і l у процесі її роботи, а також реалізація методів циклової синхронізації ФКВД на макетних зразках приймачів інформації СПД, аналіз показників їхньої ефективності та їх порівняння з теоретичними результатами та результатами моделювання.

Список використаних джерел

- [1] M. Popovic, *Communication protocol engineering*, 2nd ed. CRC Press, 2021.
- [2] D. Hercog, *Communication protocols: principles, methods and specifications*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2020.
- [3] D. S. Dawoud, and P. Dawoud, *Serial communication protocols and standards: RS232/485, UART/USART, SPI, USB, INSTEON, Wi-Fi and WiMAX*. 2020.
- [4] A. Mannani, *Synthesis of communication protocols: a supervisory control approach*. S.I.: Scholars' Press, 2013.

- [5] H. König, *Protocol engineering*. Heidelberg ; New York: Springer, 2012.
- [6] Э. В. Фауре, "Факториальное кодирование с восстановлением данных", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 33-39, 2016.
- [7] Е. В. Фауре, О. О. Харін, В. В. Швидкий, та А. І. Щерба, "Спосіб факторіального кодування з відновленням даних", 117004, Груд. 06, 2017.
- [8] J. S. Al-Azzeh, B. Ayyoub, E. Faure, V. Shvydkyi, O. Kharin, and A. Lavdanskyyi, "Telecommunication systems with multiple access based on data factorial coding", *Int. J. Commun. Antenna Propag.*, vol. 10, no. 2, pp. 102-113, 2020. doi: 10.15866/irecap.v10i2.17216.
- [9] E. V. Faure, "Factorial coding with error correction", *Radio Electron. Comput. Sci. Control*, vol. 0, no. 3, pp. 130-138, Nov. 2017. doi: 10.15588/1607-3274-2017-3-15.
- [10] E. V. Faure, V. V. Shvydkyi, A. O. Lavdanskyyi, and O. O. Kharin, "Methods of factorial coding of speech signals", *Radio Electron. Comput. Sci. Control*, vol. 0, no. 4, pp. 186-198. Nov. 2019. doi: 10.15588/1607-3274-2019-4-18.
- [11] E. V. Faure, A. I. Shcherba, and A. A. Kharin, "Factorial code with a given number of inversions", *Radio Electron. Comput. Sci. Control*, no. 2, pp. 143-153, 2018. doi: 10.15588/1607-3274-2018-2-16.
- [12] Е. В. Фауре, В. В. Швидкий, А. І. Щерба, О. О. Харін, та Б. А. Ступка, "Метод циклової синхронізації на основі перестановок", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 67-76, 2020. doi: 10.24025/2306-4412.4.2020.222439.
- [13] E. Faure, A. Shcherba, and B. Stupka, "Permutation-based frame synchronisation method for short packet communication systems", in *2021 11th IEEE Int. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Cracow, Poland, Sept. 2021, pp. 1073-1077. doi: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660996.
- [14] "Python 3.9.6 documentation". [Online]. Accessed on: <https://docs.python.org/3>
- [15] *PyCharm: the Python IDE for Professional Developers by JetBrains*. JetBrains. [Online]. Available: <https://www.jetbrains.com/ru-ru/pycharm>.
- [16] Ch. Severance, *Python for Everybody: Exploring Data Using Python 3*. University of Michigan, 2016.
- [17] K. Liou, *Python Advanced Programming: The guide to learn python programming. Reference with exercises and samples about dynamical programming, multithreading, multiprocessing, debugging, testing and more*. Independently published, 2019.
- [18] W. McKinney, *Python for Data Analysis*, 2nd ed. O'Reilly Media, 2017.
- [19] J. VanderPlas, *Python Data Science Handbook*, 1st ed. O'Reilly Media, 2016.
- [20] Rick van Hattem, *Mastering Python: Master the art of writing beautiful and powerful Python by using all of the features that Python 3.5*. Packt Publishing, 2016.
- [21] G. Zaccane, *Python Parallel Programming Cookbook: Over 70 recipes to solve challenges in multithreading and distributed system with Python 3*, 2nd ed. Packt Publishing, 2019.

References

- [1] M. Popovic, *Communication protocol engineering*, 2nd ed. CRC Press, 2021.
- [2] D. Hercog, *Communication protocols: principles, methods and specifications*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2020.
- [3] D. S. Dawoud, and P. Dawoud, *Serial communication protocols and standards: RS232/485, UART/USART, SPI, USB, INSTEON, Wi-Fi and WiMAX*. 2020.
- [4] A. Mannani, *Synthesis of communication protocols: a supervisory control approach*. S.I.: Scholars' Press, 2013.
- [5] H. König, *Protocol engineering*. Heidelberg ; New York: Springer, 2012.
- [6] E. Faure, "Factorial coding with data recovery", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, no. 2, pp. 33-39, 2016 [in Russian].
- [7] E. V. Faure, O. O. Kharin, V. V. Shvydkyi, and A. I. Shcherba, "Method of factorial coding with data recovery", 117004, Dec. 06, 2017 [in Ukrainian].
- [8] J. S. Al-Azzeh, B. Ayyoub, E. Faure, V. Shvydkyi, O. Kharin, and A. Lavdanskyyi, "Telecommunication systems with multiple access based on data factorial coding", *Int. J. Commun. Antenna Propag.*, vol. 10, no. 2, pp. 102-113, 2020. doi: 10.15866/irecap.v10i2.17216.

- [9] E. V. Faure, "Factorial coding with error correction", *Radio Electron. Comput. Sci. Control*, vol. 0, no. 3, pp. 130-138, Nov. 2017. doi: 10.15588/1607-3274-2017-3-15.
- [10] E. V. Faure, V. V. Shvydkyi, A. O. Lavdanskyyi, and O. O. Kharin, "Methods of factorial coding of speech signals", *Radio Electron. Comput. Sci. Control*, vol. 0, no. 4, pp. 186-198, Nov. 2019. doi: 10.15588/1607-3274-2019-4-18.
- [11] E. V. Faure, A. I. Shcherba, and A. A. Kharin, "Factorial code with a given number of inversions", *Radio Electron. Comput. Sci. Control*, no. 2, pp. 143-153, 2018. doi: 10.15588/1607-3274-2018-2-16.
- [12] E. V. Faure, V. V. Shvydkyi, A. I. Shcherba, O. O. Kharin, and B. A. Stupka, "Method of cyclic synchronization based on permutations", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, no. 4, pp. 67-76, 2020 [in Ukrainian]. doi: 10.24025/2306-4412.4.2020.222439.
- [13] E. Faure, A. Shcherba, and B. Stupka, "Permutation-based frame synchronisation method for short packet communication systems", in *2021 11th IEEE Int. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Cracow, Poland, Sept. 2021, pp. 1073-1077. doi: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660996.
- [14] "Python 3.9.6 documentation". [Online]. Available: <https://docs.python.org/3>.
- [15] *PyCharm: the Python IDE for Professional Developers by JetBrains*. JetBrains. [Online]. Available: <https://www.jetbrains.com/ru-ru/pycharm>.
- [16] Ch. Severance, *Python for Everybody: Exploring Data Using Python 3*, University of Michigan, 2016.
- [17] K. Lioy, *Python Advanced Programming: The guide to learn python programming. Reference with exercises and samples about dynamical programming, multithreading, multiprocessing, debugging, testing and more*, Independently published, 2019.
- [18] W. McKinney, *Python for Data Analysis*, 2nd ed. O'Reilly Media, 2017.
- [19] J. VanderPlas, *Python Data Science Handbook*, 1st ed. O'Reilly Media, 2016.
- [20] Rick van Hattem, *Mastering Python: Master the art of writing beautiful and powerful Python by using all of the features that Python 3.5*. Packt Publishing, 2016.
- [21] G. Zaccane, *Python Parallel Programming Cookbook: Over 70 recipes to solve challenges in multithreading and distributed system with Python 3*, 2nd ed. Packt Publishing, 2019.

E. V. Faure, Dr.Sc., Professor,

B. A. Stupka

e-mail: b.a.stupka.fitis20@chdtu.edu.ua

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

SIMULATION MODELING OF THE PROCESS OF ESTABLISHING FRAME SYNCHRONISM IN COMMUNICATION SYSTEMS WITH NON-SEPARABLE FACTORIAL CODING

The efficiency of frame synchronization for information transmission systems with non-separable factorial coding is investigated. The paper considers both the method that uses as a syncword a permutation with the maximum value of the minimum Hamming distance from its binary representation to all its cyclic shifts, and the method that uses as a syncword a permutation with its division into prefix and suffix parts.

Synchronization algorithms for each of the studied methods have been described. Structural diagrams for simulation models of data transmission system for each of the methods have been developed and described. The development environment and hardware parameters, on which the simulation has been performed, are described. Software simulation models of data transmission systems have been constructed. The algorithms for establishing frame synchronism for each of the above methods have been implemented. The main modules used both for the implementation of models and for the interpretation of results are substantiated. The use of the developed models allows to

evaluate the effectiveness of frame synchronization methods: the speed of synchronization and the probability of erroneous phasing depending on the bit error rate in communication channel.

The features and benefits for each of the methods are demonstrated based on the results of performance evaluations.

The practical value of the work consists in the implementation of the algorithms for establishing frame synchronization for factorial coding with data recovery by permutations.

The obtained research results can be useful not only in systems with non-separable factorial coding but also in classical data transmission systems with standard delimiter.

The subject of the future research is the construction and study of the frame synchronization system for the method with adaptive determining the moments for changing synchronization process parameters while the system is running, as well as implementation of the frame synchronization methods on prototypes of data receivers for information transmission system with factorial coding with data recovery by permutation.

Keywords: *factorial coding, frame synchronization, syncword, probability of establishing synchronism, high-intensity noise, simulation modeling, short packet.*

УДК 378.6.147:6

[0000-0002-2046-481X] **Е. В. Фауре**, д-р техн. наук, професор,
e-mail: e.faure@chdtu.edu.ua

[0000-0001-8726-7100] **Г. О. Заспа**, канд. техн. наук,
e-mail: g.zaspa@chdtu.edu.ua

[0000-0002-6082-981X] **С. В. Сисоєнко**, канд. техн. наук,
e-mail: s.sysoienko@chdtu.edu.ua

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ВПРОВАДЖЕННЯ STEM-ОСВІТИ В ОСВІТНІ ПРОГРАМИ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЧЕРЕЗ КООПЕРАЦІЮ З ПІДПРИЄМСТВАМИ ТА КОМПАНІЯМИ

Метою статті є формулювання підґрунтя для проєктної пропозиції в рамках грантової програми Європейського Союзу Еразмус+ «STEM освіта в закладах вищої освіти Казахстану та України». Задачі, що вирішуються в рамках дослідження: дослідження стану STEM-освіти в світі та в Україні; дослідження прикладів застосування STEM-підходу в освітній діяльності Черкаського державного технологічного університету; на основі проведеного дослідження та досвіду в університеті формулювання пропозиції стосовно розвитку STEM-освіти в Україні для включення в грантову заявку. Проаналізовано літературні джерела та нормативні документи, які відображають стан і розвиток STEM-освіти в США, Європі та Україні. Зроблено аналіз досвіду проєктів з елементами STEM-освіти, що реалізовані в Черкаському державному технологічному університеті. Результати аналізу включено як пропозиції до розроблюваного консорціумом університетів з Європи, України та Казахстану проєкту, спрямованого на те, щоб шляхом співпраці з компаніями та іншими зацікавленими сторонами розробити усталену дуальну програму навчання на основі STEM з міжнародною орієнтацією в закладах України та Казахстану й стати лідером STEM-освіти в своїх регіонах.

Ключові слова: Еразмус+, вища освіта, міжнародна співпраця, дуальна освіта, точні науки.

Вступ. Термін STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) увійшов в освітню термінологію та міцно закріпився в ній в останні два десятиліття. Він пропонує підхід до технічної та природничої освіти, в якому наголошується на міждисциплінарному та прикладному аспектах, а також науковому та інноваційному аспектах в навчанні. STEM-освіта практикується як на шкільному, так і на університетському рівнях.

Актуальність STEM-освіти визначається тим, що стрімкий розвиток технологій веде до все більшої затребуваності фахівців в галузі високих технологій, IT-професіоналів, інженерів тощо. У майбутньому з'являться нові професії, більшість з яких буде пов'язана з технологіями та високотехнологічним виробництвом на межі з природничими науками. Особливий попит очікується на фахівців з біо- та нанотехнологій [1].

Традиційним лідером у STEM-освіті в світі вважаються США. Проте останнім часом цей підхід набув популярності і в інших країнах, зокрема в Європі, включно з Україною.

Черкаський державний технологічний університет (ЧДТУ) бере участь у консорціумі європейських університетів та інших установ, які готують заявку на реалізацію проєкту «STEM освіта в закладах вищої освіти Казахстану та України» в рамках грантової програми Європейського Союзу Еразмус+. Метою проєкту є просування STEM-підходу в університетській та шкільній освіті на основі вивчення досвіду європейських країн та взаємодії з підприємствами й організаціями реального сектору економіки.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення та формулювання підґрунтя формування і реалізації проєктної пропозиції в рамках грантової програми Євро-

пейського Союзу Еразмус+ «STEM освіта в закладах вищої освіти Казахстану та України».

Задачами дослідження є:

- 1) дослідження стану STEM-освіти в світі та в Україні;
- 2) дослідження прикладів застосування STEM-підходу в освітній діяльності ЧДТУ;
- 3) на основі проведеного дослідження та досвіду в університеті формулювання пропозиції стосовно розвитку STEM-освіти в Україні для включення в грантову заявку Еразмус+.

Виклад основного матеріалу

STEM-освіта в світі та Україні. Освіта в галузі STEM є основою підготовки співробітників у галузі високих технологій. Тому багато країн, такі як США, Австралія, Китай, Великобританія, Ізраїль, Корея, Сінгапур, проводять державні програми в галузі STEM-освіти [1].

У 2009 р. Федеральний уряд США розпочав кампанію "Educate to Innovate", основною задачею якої було мотивувати студентів до здобуття STEM-освіти і, таким чином, вивести американську освіту з середняка в галузі точних наук до вершини світових рейтингів. Було запущено низку федеральних програм, спрямованих, зокрема, на набір та підтримку викладачів STEM, а також на підтримку середніх шкіл, орієнтованих на STEM, за допомогою STEM Innovation Networks, і підтримку дослідницьких проєктів у галузі освіти, щоб краще зрозуміти технології навчання нового покоління [2]. Міністерство освіти США зазначає: «якщо ми хочемо мати націю, де наші майбутні лідери та працівники зможуть розуміти та вирішувати деякі складні виклики сьогоdnішнього та завтрашнього дня, а також відповідати вимогам динамічної та еволюційної робочої сили, розвиток навичок, знання та грамотність в галузях STEM має важливе значення» [3].

Урядом США розроблено та схвалено Стратегічний план STEM-освіти «Прокладаючи курс на успіх: Американська стратегія для STEM-освіти», опублікований у грудні 2018 р. Він визначає федеральну стратегію на наступні п'ять років, що ґрунтується на баченні майбутнього, де всі американці матимуть доступ до високоякісних послуг протягом усього життя. Виконання плану та, відповідно, якісна STEM-освіта повинні сприяти тому, щоб Сполучені Штати стали світовим лідером у сфері STEM-грамотності, інновацій та зайнятості. Виконання стратегії покликане об'єднати учнів, сім'ї,

освітян, громади та роботодавців, будучи дороговказом для спільноти STEM [3]. Стратегія включає візію, цілі, шляхи діяльності з зазначенням цілей для кожного з них (рисунк 1).

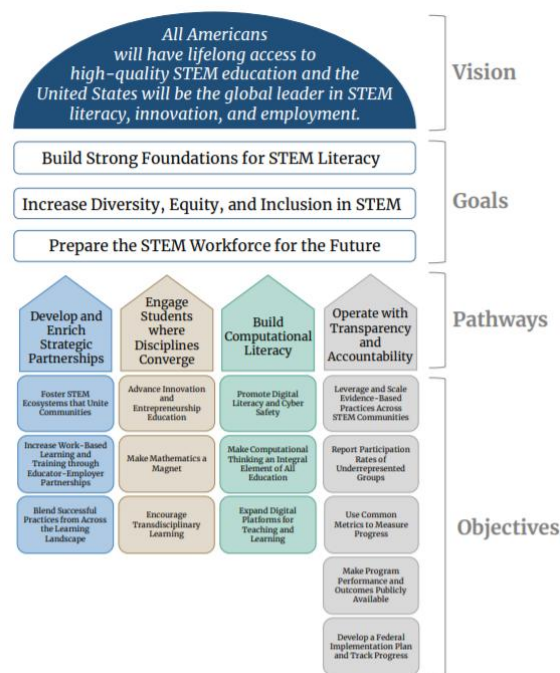


Рисунок 1 – Схема організаційної структури Федеральної стратегії STEM-освіти США [4]

Майже кожен американський університет пропонує низку програм у галузі STEM. Приклад з сайту університету-партнера ЧДТУ наведено на рисунку 2.

UNIVERSITY OF NEBRASKA-OMAHA	
STEM	
Do you have an interest in solving problems by applying principles from science, technology, engineering, and mathematics (STEM)?	
UNO is a leader in STEM, and has many interesting and engaging degree programs across a number of collaborating departments and colleges. These STEM majors often engage students in exciting learning opportunities both on campus and in the community, and graduates are typically in high demand both locally and nationally.	
Select an area below to learn more.	
Architectural Engineering (UNL at PKI)	Aviation
Bioinformatics	Biology
Biomechanics	Chemistry
Civil Engineering (UNL at PKI)	Computer Engineering (UNL at PKI)
Computer Science	Construction Engineering (UNL at PKI)
Cybersecurity	Economics
Electrical Engineering (UNL at PKI)	Emergency Management
Environmental Science	Geography
Geology	Interdisciplinary Studies
IT Innovation	Kinesiology
Management Information Systems	Mathematics
Molecular and Biomedical Biology	Multidisciplinary Studies*
Music (Music Technology Concentration only)	Neuroscience

Рисунок 2 – STEM-програми університету штату Небраска в Омасі, США [5]

Нині уряд США пропонує понад 25 грантових програм на підтримку STEM-освіти [2].

Велика увага розвитку STEM-освіти приділяється в Європі. Зокрема, програма Європейського Союзу «Горизонт 2020», маючи пріоритетом розбудову потенціалу та розвиток інноваційних способів зв'язку науки з суспільством, спрямована на те, щоб зробити науку привабливішою для молоді, підвищити прагнення суспільства до інновацій та відкрити для подальшої науково-дослідницької та інноваційної діяльності. Зробити наукову освіту та кар'єру привабливими для молоді є амбітною метою, оскільки вона спрямована на стрімке покращення наукової та технологічної грамотності в суспільстві. Інноваційна офіційна та неформальна наукова освіта має важливе значення для підвищення обізнаності молоді про різні аспекти науки і техніки в сучасному суспільстві, а також для вирішення проблем, з якими стикаються молоді люди, коли роблять кар'єру в галузі STEM [6].

У [7] виконано дослідження стану STEM-освіти в країнах-членах Євросоюзу. Відзначаючи зусилля країн стосовно розвитку STEM-освіти, в документі вказано на недостатній прогрес у цій сфері. Зокрема, хоча зросло усвідомлення важливості співпраці між освітніми установами та роботодавцями – і це можна побачити в розроблюваних політиках та ініціативах, – рівень такої співпраці далекий від бажаного. Серед основних напрямів діяльності, пропонованих у документі, які допоможуть розвитку STEM-освіти, є:

- реформування навчальних програм;
- створення партнерських відносин між освітніми установами та компаніями;
- створення наукових центрів;
- розробка методичних матеріалів;
- розвиток постійного професійного розвитку (CPD) для вчителів;
- розвиток інституту консультантів в галузі обрання професії;
- необхідність посилення високоякісних професійних консультацій у закладах освіти;
- ініціативи щодо набору нових викладачів STEM-предметів.

Ключову роль у поширенні STEM-освіти в Європі грає спонсорована програмою Еразмус+ EU STEM Coalition, яка є координатором національних STEM-платформ. Основна мета цієї організації – сприяти обміну пе-

редовим досвідом між країнами та регіонами. Завдяки різноманітним видам діяльності та ресурсам об'єднуються стейкхолдери, які можуть впливати на політики, для обміну ідеями, досвідом та розробки нових підходів у низці сфер, пов'язаних зі STEM-освітою та ринком праці. Діяльність коаліції включає щорічні конференції, тематичні робочі групи, вебінари, навчальні заходи та онлайн-ресурси. Крім того, EU STEM Coalition надає пряму підтримку в розробці нових ініціатив, організацій і стратегій на основі існуючих найкращих практик [8]. Україна входить до асоційованих партнерів коаліції.

Останнім часом державні органи України все більше уваги звертають на STEM-освіту. Про підтримку STEM-освіти серед пріоритетів державної політики згадується в деяких урядових та міністерських нормативних документах [9, 10]. Також розроблено низку нормативних документів, спрямованих безпосередньо на популяризацію та розвиток STEM-освіти [11, 12].

Зокрема, в розпорядженні Кабінету Міністрів України «Про схвалення Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018-2020 роки та затвердження плану заходів щодо її реалізації» [9] серед основних напрямів цифровізації освіти зазначалось «розроблення та впровадження інноваційних комп'ютерних, мультимедійних та комп'ютерно-орієнтованих засобів навчання та обладнання для створення цифрового навчального середовища (мультимедійні класи, науково-дослідні STEM-центри, лабораторії, інклюзивні класи, класи змішаного навчання)», а в плані заходів щодо реалізації Концепції серед пріоритетних напрямів цифрової економіки для розвитку експорту цифрових технологій є пункт «Підготовка пропозицій щодо модернізації освіти для підтримки розвитку цифрової індустрії, зокрема посилення підготовки учнівської молоді з предметів природничо-математичного циклу і технічної творчості в усіх ланках освіти, збільшення кількості закладів освіти, в яких запроваджується STEM-навчання, утворення науково-дослідних STEM-центрів/лабораторій із залученням міжнародних організацій» [9].

У «Концепції реалізації державної політики у сфері реформування загальної середньої освіти «Нова українська школа» на період до 2029 року» [10] серед іншого робиться

наголос на розвитку інноваційної особистості в процесі навчання та виховання. На підтримку цього нещодавно було розроблено та схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України Концепцію розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти) та план заходів щодо її реалізації [11, 12]. У Концепції визначаються проблеми, що існують у цій галузі і потребують розв'язання, мета і строки реалізації, шляхи і способи розв'язання проблем та очікувані результати.

Програмним гаслом документа є те, що STEM-освіта «повинна стати одним з пріоритетів розвитку сфери освіти, складовою частиною державної політики з підвищення рівня конкурентоспроможності національної економіки та розвитку людського капіталу, одним з основних факторів інноваційної діяльності у сфері освіти» [11]. Реалізація Концепції спрямована на модернізацію освіти для задоволення запитів економіки та суспільства на наукоємну освіту, формування у випускників інноваційного мислення й актуальних на ринку праці умінь і компетентностей.

Напрямами діяльності з реалізації концепції виділено:

- модернізацію природничо-математичної освіти (STEM-освіти);
- широкомасштабне впровадження STEM-освіти на всіх рівнях освіти;
- встановлення партнерства з бізнесом та промисловістю;
- встановлення партнерства з науковими установами для залучення їх до розвитку STEM-освіти [11].

Серед рівнів, на яких може забезпечуватися STEM-освіта, є вищий/професійний – вища освіта, основним завданням якої є «становлення фахівців різних науково-технічних, інженерних професій на базі закладів вищої освіти, а також підвищення професійної майстерності педагогічних працівників із впровадження нових методик викладання, відповідних курсів та реалізації інноваційних проєктів» [11].

Позакласна STEM-освіта в ЧДТУ. Черкаський державний технологічний університет має багаторічний досвід використання елементів STEM-освіти, а саме: навчання студентів на основі розв'язання практичних задач для подальшого використання отриманих знань, умінь і навичок у професійній діяльності; різноманітні способи взаємодії з роботодав-

цями з метою покращення практичної складової навчання студентів; крос-дисциплінарний підхід та організація роботи студентів у командах над проєктами.

Зокрема, в [13] зазначено, що ще з середини 2000-х рр. у ЧДТУ налагоджено співпрацю з ІТ компаніями за такими напрямками:

- проведення ярмарків вакансій для студентів;
- консультації ІТ компаній стосовно розроблюваних в університеті навчальних планів;
- презентації та тренінги компаній в університеті для всіх бажаючих студентів;
- проєкти для студентів під керівництвом досвідчених професіоналів з компаній;
- регулярні співбесіди студентів у компаніях;
- стажування студентів у компаніях;
- спонсорування університету компаніями.

Велику роль у провадженні STEM-освіти в ЧДТУ грають проєкт Deanoffice та лабораторія Інжинірингової школи Noosphere.

Проєкт "Deanoffice" спрямований на розробку інформаційно-аналітичної системи для університету силами, насамперед, студентів за підтримки викладачів і досвідчених фахівців з ІТ-компаній. Ця розробка почалась у 2018 р. в рамках роботи науково-технічного гуртка «Сучасні технології створення інформаційних систем» і продовжилась в рамках НДР і ДКР № 0118U002315 «Розробка інформаційно-аналітичної системи підтримки освітньої діяльності структурних підрозділів ЗВО». До роботи було залучено широке коло студентів комп'ютерних спеціальностей ЧДТУ. Студенти залучалися до всіх видів робіт у життєвому циклі інформаційної системи: аналіз предметної галузі, вироблення вимог, моделювання, проєктування, розробка, тестування і супроводження. За час роботи над системою в розробці взяло участь близько 55 студентів спеціальностей: інженерія програмного забезпечення, комп'ютерні науки, системний аналіз і кібербезпека. Проєкт підтримують провідні ІТ компанії м. Черкаси: SPD Ukraine, Master of Code, Interlink та eKreative, які надають організаційну та консультаційну підтримку на всіх етапах розробки. Як наслідок, студенти отримують постійні технічні консультації від ІТ професіоналів, а також результати

аналізу виконаної з їхнього боку роботи. Крім того, комунікація з ІТ компаніями позитивно впливає на мотивацію студентів до навчання і дає їм можливість краще зрозуміти вимоги працедавців та підготуватися до майбутньої професійної діяльності в ІТ-галузі [14, 15].

Інжинірингова школа Noosphere – це мережа науково-технічних лабораторій в різних закладах вищої освіти України, відкритих та обладнаних громадською організацією «Асоціація Noosphere». Інжинірингова школа Noosphere ставить своєю задачею створення ефективної платформи для startup-діяльності молодих спеціалістів в Україні та інтегрує наукові підходи у бізнес-середовище. Лабораторії Інжинірингової школи Noosphere – це осередки інженерної творчості, де студенти та молоді вчені України можуть розвивати свої інноваційні ідеї на основі ефективної взаємодії студентів, менторів, технічних експертів та бізнес-практиків [16].

Разом з тим, STEM-освіта в ЧДТУ не є інтегрованою в освітні програми, а проводиться як позакласна робота.

Проектна пропозиція Еразмус+ з розвитку STEM-освіти в Україні. Метою проєкту можна визначити впровадження, перевірку та валідацію STEM-освіти в навчальних програмах у ЗВО Казахстану та України через співпрацю з промисловістю.

Задача полягає в тому, щоб шляхом співпраці з компаніями та іншими зацікавленими сторонами розробити усталену дуальну програму навчання на основі STEM з міжнародною орієнтацією в закладах України та Казахстану (програму буде розроблено в результаті співпраці з установами з Сербії, Німеччини та Литви) і стати лідером STEM-освіти в своїх регіонах. Проєкт має забезпечити основу для підвищення людського та інфраструктурного потенціалу, необхідного для досягнення зазначеної мети, шляхом підготовки викладачів, придбання програмного забезпечення та обладнання, співпраці між університетами, а також співпраці з неакадемічними партнерами та компаніями для передачі знань та досвіду. Добре підготовлені фахівці в галузі застосування STEM мають велике значення для економічного та соціального розвитку держав.

Проєкт планується реалізувати в трьох університетах Казахстану (Костанайський інженерно-економічний університет імені М. Дулатова, Карагандинський державний

технічний університет, Казахська академія праці та соціальних відносин) і в трьох університетах України (Національний авіаційний університет, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Черкаський державний технологічний університет) за допомоги трьох університетів з програмних країн Еразмус+ та через співпрацю з компаніями Казахстану та України. Усі освітні програми, які планується вдосконалити в результаті реалізації проєкту, є технічними, на освітньому рівні бакалавра або магістра. Для успішного впровадження програми STEM в рамках проєкту планується розробити всю необхідну документацію – від навчальних програм до навчально-методичних матеріалів з практичним навчанням академічного персоналу та представників галузі, залучених до освітнього процесу.

Основною перевагою розвитку STEM-освіти в університетах Казахстану та України є покращення освітнього процесу шляхом надання студентам можливостей за допомогою навчальних програм на основі STEM, які зосереджені на застосуванні різноманітних бізнес-ситуацій та практичних прикладів із реального середовища. Платформа STEM базується на ідеї навчання студентів за п'ятьма конкретними дисциплінами – природознавством, технологією, інженерією, мистецтвом і математикою – з міждисциплінарним і практичним підходом. Для посилення спроможності підприємств бути залученими до навчального процесу університетів, які беруть участь у дуальній освіті, проєкт дасть можливість навчання фахівців протягом усього життя (програми НВЖ або "lifetime learning").

Розвиток програм рівня бакалавра або магістра дуального навчання на основі STEM-освіти та програми НВЖ здійснюватиметься шляхом тісної співпраці з закладами вищої освіти з програмних країн Еразмус+ під координуванням University of Novi Sad (Сербія).

Найкращою у світі й дуже успішною вважається дуальна освіта в Німеччині. Зокрема, Technische Universität Berlin має декілька дуальних освітніх програм у техніко-технологічних галузях, тоді як University of Novi Sad брав участь у проєкті впровадження подвійної освіти в Сербії і має навчальну програму та досвідчених викладачів у галузях ІТ, інженерії, виробництва. У цьому контексті основна роль закордонних університетів

спрямована на передачу знань у технічній сфері дуальної STEM-освіти, підготовку викладачів за програмами навчання на базі STEM, а також на підготовку навчальних планів та методології.

Серед запланованого в проєкті є створення більш універсальних освітніх траєкторій (навчальних планів) через дуальну STEM-освіту та покращення зв'язку між закладами вищої освіти і компаніями в Казахстані та Україні. Дуальне навчання в Казахстані та Україні дасть змогу студентам отримати більш відповідні знання та навички, об'єднавши п'ять конкретних дисциплін – науку, технологію, інженерію, мистецтво та математику – у цілісну парадигму навчання, що ґрунтується на застосуванні в реальному світі. Як наслідок, це надасть їм компетенції, які більше відповідають потребам компаній та реальній ситуації, і, отже, вони отримають конкурентні переваги під час влаштування на роботу. Це підвищить не тільки мотивацію студентів до навчання, а й зацікавленість компаній пропонувати стажування та стипендії студентам, які практикують подвійну освіту STEM.

Навчання на базі STEM дасть студентам можливість заповнити розрив між університетською освітою та вимогами бізнесу. Це підвищить компетенції студентів та їх конкурентоспроможність на ринку праці, а також компетентності викладачів. Крім того, дуальна освіта принесе кращу та інтенсивнішу співпрацю між промисловістю та вищою освітою і сприятиме підвищенню інноваційного потенціалу. Отже, студенти в дуальній освіті стануть каналом передавання знань та ідей від компаній до академічних кіл, і навпаки.

Реалізація проєкту дасть студентам змогу отримати численні навички (наукові, технологічні, інженерно-математичні) та знання. Реалізуючи проєкт, студенти зможуть створити базу практичних знань для входу в світ бізнесу після закінчення навчання, створити власний бізнес або стати частиною існуючої бізнес-системи. Крім того, частину успішно розроблених навичок і знань STEM-освіти планується розвинути в спеціалізовані курси, які будуть запропоновані клієнтам і компаніям на існуючому ринку праці Казахстану та України. ЗВО з понад 20 країн ЄС успішно впроваджують STEM і вже використовують позитив-

ні результати, а ця кількість та їхня взаємодія постійно збільшуються.

Результати досліджень. Дослідження стану STEM-освіти в світі та в Україні, а також прикладів застосування STEM-підходу в освітній діяльності ЧДТУ дали можливість визначити конкретні напрями роботи в проєкті:

1) сприяння розробці та коригуванню навчальних програм на основі концепції STEM відповідно до потреб промислових компаній у навчальному процесі за технологією дуальної освіти. Програми дуального навчання слугуватимуть прикладом успішної інтеграції STEM-освіти в навчальний план і мотивуватимуть інші заклади вищої освіти в Казахстані, Україні та регіоні розвивати подібні програми;

2) удосконалення компетентностей студентів за допомогою програм STEM та НВЖ шляхом отримання практичних знань відповідно до вимог ринку праці та реальних життєвих ситуацій;

3) залучення професіоналів з галузі до визначення конкретних потреб у рамках дуальної технології навчання. Це найкращий спосіб гармонізувати інтереси компаній, студентів та закладів вищої освіти;

4) передача та впровадження передового досвіду з університетів Німеччини, Сербії, Литви, які мають багаторічний досвід у дуальних програмах вищої освіти;

5) розробка посібника з дуальної методології STEM, в якому особливу увагу буде приділено комунікації між ЗВО та компаніями, комунікації між викладачами та студентами, а також ролі професіоналів у навчальному процесі;

6) розробка методології для модифікації та перебудови існуючих навчальних планів бакалавра та магістра в технічній галузі для впровадження в практичну інтегровану дуальну парадигму. Ця методологія допоможе іншим ЗВО інтегрувати дуальну освіту у свої навчальні програми;

7) забезпечення безперервного використання результатів, пропонуючи технологію дуальної STEM-освіти іншим навчальним закладам і підприємствам. Результати проєкту повинні буди стійкими і тривати після завершення проєкту, слугуючи прикладом і мотивацією для інших ЗВО впроваджувати дуальну освіту в свої навчальні програми;

8) поширення результатів проєкту та стимулювання створення більшої кількості

дуальних програм STEM у Казахстані та Україні. Проект використовуватиме різноманітні засоби комунікації та розповсюдження, такі як семінари, конференції, вичерпні та привабливі друковані та відеоматеріали, виступи на телебаченні та радіо, регулярні прес-релізи, інформаційні бюлетені, веб-сайт, розповсюдження через ЗМІ, соціальні мережі тощо. Проект підтримуватиме свій веб-сайт, щоб усі бенефіціари завжди могли бути проінформовані про актуальні заходи та результати проекту. Веб-сайт проекту працюватиме щонайменше п'ять років після його завершення, а інформація на сайті буде доступна англійською, казахською та українською мовами. Дуальні програми на базі STEM освітніх рівнів бакалавра та магістра з усіма його елементами (навчальний план, викладачі, студентська інформація тощо) матимуть власні веб-сторінки;

9) створення основи для майбутньої дуальної STEM-освіти та програм НВЖ.

Обговорення результатів. Роль ЧДТУ в проекті полягає в створенні та зміцненні трикутника знань в університеті та розширенні компетентностей студентів у сфері STEM, а також у розвитку регіонального та міжнародного партнерства. Основним завданням ЧДТУ в цьому проекті є вивчення та узагальнення передового європейського досвіду формування та зміцнення трикутника знань, а також визначення шляхів його впровадження в Україні, розробка на основі отриманих результатів та знань власних процедур і механізмів за такими напрямками: посилення процесів передачі технологій між персоналом і нарощування технічного потенціалу; створення STEM-культури в університеті та регіоні шляхом запровадження діяльності STEM у навчальних програмах та поза їх межі; підвищення ролі університетів у регіональному розвитку в Україні. ЧДТУ планує бути провідною організацією в першому робочому пакеті за такими напрямками діяльності:

- 1) аналіз/перегляд поточних навчальних планів у цільовій сфері;
- 2) розвиток результатів навчання та компетентностей;
- 3) спільна IT-платформа для розробки навчальних програм;
- 4) розробка та реалізація програми підвищення кваліфікації вчителів загальноосвітньої школи, спрямованої на STEM-освіту;

- 5) оновлення освітніх програм «Аналіз даних (DATA SCIENCE) та комп'ютерна статистика», «Інженерія програмного забезпечення», «Комп'ютерні науки та прикладне програмування», «Комп'ютерні системи і мережі», «Системне програмування», «Робототехнічні системи та автоматизація» з використанням методології STEM.

ЧДТУ також братиме участь у всіх інших робочих пакетах.

Висновки. Аналіз стану та розвитку STEM-освіти в США, Європі та Україні дає можливість стверджувати, що питання STEM-освіти наразі є надзвичайно актуальним. З одного боку, економіка має велику потребу у фахівцях STEM-напрямів, а з другого – STEM-освіта надає випускникам гарні перспективи в пошуку роботи та побудові кар'єри. У розвинених країнах пройдено певний шлях і напрацьовано певний багаторічний досвід організації STEM-освіти. В Україні сьогодні розвитку STEM-освіти також приділяється значна увага. Напрацьовано розгалужену нормативно-правову базу, методичні матеріали.

Реалізація проекту за рахунок співпраці з вітчизняними та закордонними ЗВО, компаніями та іншими зацікавленими сторонами дасть змогу розробити усталену дуальну програму навчання на основі STEM з міжнародною орієнтацією в закладах України та Казахстану.

Проект повинен забезпечити основу для підвищення людського та інфраструктурного потенціалу, необхідного для досягнення його мети, шляхом підготовки викладачів, придбання програмного забезпечення та обладнання, співпраці між університетами, а також співпраці з неакадемічними партнерами та компаніями для передачі знань і досвіду.

Список використаних джерел

- [1] Інститут модернізації змісту освіти, "STEM-освіта", 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://imzo.gov.ua/stem-osvita>. Дата звернення: Лист. 5, 2021.
- [2] Elaine J. Hom, "What is STEM education?", *livescience.com*, Feb. 12, 2014. [Online]. Available: <https://www.livescience.com/43296-what-is-stem-education.html>. Accessed on: Oct. 28, 2021.

- [3] U.S. Department of Education, "Science, technology, engineering, and math, including computer science", 2021. [Online]. Available: <https://www.ed.gov/stem#funding-opps>. Accessed on: Oct. 28, 2021.
- [4] U.S. Department of Education, "Progress report on the implementation of the federal stem education strategic plan", 2021. [Online]. Available: <https://www.ed.gov/sites/default/files/documents/stem/2020-stem-progress-report.pdf>. Accessed on: Nov. 2, 2021.
- [5] University Nebraska Omaha, "STEM academics", 2021. [Online]. Available: <https://www.unomaha.edu/academics/academic-focus-areas/stem.php>. Accessed on: Nov. 4, 2021.
- [6] Horizon 2020, "Science education", 2021. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/science-education>. Accessed on: Oct. 21, 2021.
- [7] European Parliament, "Encouraging STEM studies. Labour market situation and comparison of practices targeted at young people in different member states", March 2015. [Online]. Available: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/542199/IPOL_STU\(2015\)542199_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/542199/IPOL_STU(2015)542199_EN.pdf). Accessed on: Oct. 21, 2021.
- [8] EU STEM Coalition, "EU's main network of national STEM platforms", 2021. [Online]. Available: <https://www.stemcoalition.eu>. Accessed on: Oct. 21, 2021.
- [9] Верховна Рада України, Законодавство України, "Розпорядження Кабінету Міністрів України "Про схвалення Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018-2020 роки та затвердження плану заходів щодо її реалізації" від 17 січ. 2018 р. № 67-р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-%D1%80#Text>. Дата звернення: Лист. 2, 2021.
- [10] Верховна Рада України, Законодавство України, "Розпорядження Кабінету Міністрів України "Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері реформування загальної середньої освіти "Нова українська школа" на період до 2029 року" від 14 груд. 2016 р. № 988-р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/988-2016-%D1%80#n8>. Дата звернення: Лист. 2, 2021.
- [11] Верховна Рада України, Законодавство України, "Розпорядження Кабінету Міністрів України "Про схвалення Концепції розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти)" від 5 серп. 2020 р. № 960-р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/960-2020-%D1%80#Text>. Дата звернення: Лист. 2, 2021.
- [12] Верховна Рада України, Законодавство України, "Розпорядження Кабінету Міністрів України "Про затвердження плану заходів щодо реалізації Концепції розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти) до 2027 року" від 13 січ. 2021 р. № 131-р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/131-2021-%D1%80#Text>. Дата звернення: Лист. 3, 2021.
- [13] Hryhoriy Zaspas, and Olena Danchenko, "Cooperation with IT companies at Cherkasy State Technological University", in *Proc. 20th EAEIE Annual Conf. Innovation in Education for Electrical and Information Engineering*. Valencia, Spain, 2009. [CD-ROM].
- [14] Ю. В. Триус, Г. О. Заспа, О. С. Кожем'якін, та А. В. Аширова, "Інформаційно-аналітична система підтримки освітньої діяльності структурних підрозділів закладів вищої освіти", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 27-38, 2020.
- [15] Г. О. Заспа, А. В. Аширова, О. С. Кожем'якін, та Ю. В. Триус, "Моделювання та проектування інформаційно-аналітичної системи підтримки освітньої діяльності університету", на *V Міжнар. наук.-практ. конф. Інформаційні технології в освіті, науці і техніці (ІТОНТ-2020)*: тези доп. Черкаси, 2020.
- [16] Інжинірингова школа Noosphere, "Підтримуємо студентів і молодих фахівців України у створенні інноваційних продуктів і стартапів", 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://noosphereengineering.com>. Дата звернення: Лист. 1, 2021.

References

- [1] Institute for Educational Content Modernization, "STEM education", 2021. [Online]. Available: <https://imzo.gov.ua/stem-osvita>. Accessed on: Nov. 5, 2021. [in Ukrainian].
- [2] Elaine J. Hom, "What is STEM education?", *livescience.com*, Feb. 12, 2014. [Online]. Available: <https://www.livescience.com/43296-what-is-stem-education.html>. Accessed on: Oct. 28, 2021.
- [3] U.S. Department of Education, "Science, technology, engineering, and math, including computer science", 2021. [Online]. Available: <https://www.ed.gov/stem#funding-ops>. Accessed on: Oct. 28, 2021.
- [4] U.S. Department of Education, "Progress report on the implementation of the federal stem education strategic plan", 2021. [Online]. Available: <https://www.ed.gov/sites/default/files/documents/stem/2020-stem-progress-report.pdf>. Accessed on: Nov. 2, 2021.
- [5] University Nebraska Omaha, "STEM academics", 2021. [Online]. Available: <https://www.unomaha.edu/academics/academic-focus-areas/stem.php>. Accessed on: Nov. 4, 2021.
- [6] Horizon 2020, "Science education", 2021. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/science-education>. Accessed on: Oct. 21, 2021.
- [7] European Parliament, "Encouraging STEM studies. Labour market situation and comparison of practices targeted at young people in different member states", March 2015. [Online]. Available: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/542199/IPOL_STU\(2015\)542199_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/542199/IPOL_STU(2015)542199_EN.pdf). Accessed on: Oct. 21, 2021.
- [8] EU STEM Coalition, "EU's main network of national STEM platforms", 2021. [Online]. Available: <https://www.stemcoalition.eu>. Accessed on: Oct. 21, 2021.
- [9] Verkhovna Rada of Ukraine, Legislation of Ukraine, "Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On approval of the Concept of development of the digital economy and society of Ukraine for 2018-2020 and approval of the action plan for its implementation" dated on Jan. 17, 2018, no. 67-p. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-%D1%80#Text>. Accessed on: Nov. 2, 2021 [in Ukrainian].
- [10] Verkhovna Rada of Ukraine, Legislation of Ukraine, "Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On approval of the Concept of implementation of state policy in the field of reforming general secondary education "New Ukrainian School" until 2029" dated on Dec. 14, 2016, no. 988-p. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/988-2016-%D1%80#n8>. Accessed on: Nov. 2, 2021 [in Ukrainian].
- [11] Verkhovna Rada of Ukraine, Legislation of Ukraine, "Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On approval of the Concept of development of natural and mathematical education (STEM-education)" dated on Aug. 5, 2020, no. 960-p. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/960-2020-%D1%80#Text>. Accessed on: Nov. 2, 2021 [in Ukrainian].
- [12] Verkhovna Rada of Ukraine, Legislation of Ukraine, "Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On approval of the action plan for the implementation of the Concept of development of natural and mathematical education (STEM-education) until 2027" dated on Jan. 13, 2021, no. 131-p. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/131-2021-%D1%80#Text>. Accessed on: Nov. 3, 2021 [in Ukrainian].
- [13] Hryhoriy Zaspа, and Olena Danchenko, "Cooperation with IT companies at Cherkasy State Technological University", in *Proc. 20th EAEEIE Annual Conf. Innovation in Education for Electrical and Information Engineering*. Valencia, Spain, 2009. [CD-ROM].
- [14] Yu. V. Tryus, H. O. Zaspа, O. S. Kozhemiakin, and A. V. Ashyrova, "Information and analytical system for educational activities support of structural divisions of higher education institutions", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu*, no. 4, pp. 27-38, 2020 [in Ukrainian].
- [15] H. O. Zaspа, A. V. Ashyrova, O. S. Kozhemiakin, and Yu. V. Tryus, "Modeling

and design of information and analytical system for support of university educational activities", in *Proc. V Int. Sci. and Pract. Conf. Information technologies in education, science and technology (ITEST-2020)*. Cherkasy, 2020 [in Ukrainian].

[16] Noosphere Engineering School, "Supporting students and young professionals of Ukraine in creating innovative products and startups", 2021. [Online]. Available: <https://noosphereengineering.com>. Accessed on: Nov. 1, 2021. [in Ukrainian].

E. V. Faure, Dr. Tech. Sc., Professor,

e-mail: e.faure@chdtu.edu.ua

H. O. Zaspа, Ph. D.,

e-mail: g.zaspa@chdtu.edu.ua

S. V. Sysoienko, Ph. D.

e-mail: s.sysoienko@chdtu.edu.ua

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

IMPLEMENTATION OF STEM EDUCATION IN EDUCATIONAL PROGRAMS OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS THROUGH COOPERATION WITH ENTERPRISES AND COMPANIES

The aim of the article is to formulate the basis for the project proposal under the European Union's Erasmus + grant program "STEM education in higher education institutions of Kazakhstan and Ukraine". Tasks to be solved within the research: to study the state of STEM education in the world and in Ukraine; to study examples of application of STEM approach in Cherkasy State Technological University; on the basis of the study and experience at the university to formulate proposals for the development of STEM education in Ukraine, which can be included in the Erasmus + grant application project.

Analysis of the state and development of STEM education in the United States, Europe and Ukraine makes it possible to say that the issue of STEM education is extremely relevant today. Economics is in great need of STEM specialists, on the one hand, and STEM education provides graduates with good prospects in finding a job and building a career, on the other hand. In developed countries, a certain path has been traversed and some long-term experience in organizing STEM education has been gained. In Ukraine, much attention is also paid to the development of STEM education. A sufficiently extensive regulatory framework and methodological materials have been developed.

Cherkasy State Technological University, as part of a consortium of universities from Europe, Ukraine and Kazakhstan, is participating in the preparation of a grant application for funding for a project under the EU-Erasmus + program. The project aims to develop a well-established dual STEM-based curriculum with international orientation in Ukraine and Kazakhstan through cooperation with companies and other stakeholders (the program will be based on cooperation with institutions from Serbia, Germany and Lithuania) and become a leader of STEM education in their regions. The project provides a basis for enhancing the human and infrastructural capacity needed to achieve this goal by training teachers, purchasing software and equipment, collaborating between universities, and collaborating with non-academic partners and companies and transferring knowledge and experience. It is planned to be implemented on the basis of three universities in Ukraine and Kazakhstan. The development of bachelor's or master's degree programs based on STEM education and lifelong learning programs will be carried out by transferring knowledge from higher education institutions from Erasmus + program countries (Germany, Serbia, Germany) to Ukrainian and Kazakh colleagues.

Keywords: Erasmus +, higher education, international cooperation, dual education, exact sciences.sci-

[0000-0001-9473-2285] С. М. Мащеп¹,

e-mail: s.matsepa@chdtu.edu.ua

[0000-0002-6708-040X] Г. В. Канашевич¹, д-р техн. наук, професор,

[0000-0002-7670-0375] Ю. І. Коваленко¹, канд. техн. наук,

[0000-0002-6843-4345] Р. В. Цинда²,

[0000-0002-7547-5081] І. С. Жайворонок¹

¹ Черкаський державний технологічний університет МОН України
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

² Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний Центр МВС України
вул. Пастерівська, 104, м. Черкаси, 18009, Україна

ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ МІКРООБРОБКИ

В роботі наведено результати електронно-променевої мікрообробки оптичних поверхонь елементної бази інформаційних систем, що доводять покращення їх якісних характеристик (зменшення мікрошорсткості та мікронапруження у поверхневому шарі матеріалу, структурної та хімічної стабілізації у дефектному і тріщиноподібному шарах, керована зміна адгезійними властивостями поверхні матеріалу тощо). Розглянуто структурні та хімічні перетворення, які виникають на поверхні та у приповерхневому шарі оптичного матеріалу внаслідок такої мікрообробки. Встановлено технологічні режими електронно-променевої мікрообробки оптичного скла, при яких відбувається якісне покращення поверхонь оптичних елементів, що приводить до підвищення експлуатаційних показників та показників надійності цих елементів. Показано перспективу використання методу електронно-променевої мікрообробки оптичних елементів при виготовленні, удосконаленні та оновленні елементної бази сучасних інформаційних систем.

Ключові слова: інформаційна система, оптичне скло, оптична поверхня, оптичний мікроелемент, електронно-променева мікрообробка.

Постановка проблеми. Інформаційні системи (ІС) на теперішній час відіграють особливу роль в існуванні людства і є однією з базових умов для подальшого розвитку і успіху кожної держави світу у напрямку економічного й інтелектуального зростання [1]. Основними засобами реалізації ІС на практиці є їх апаратне забезпечення.

Найбільш перспективними та широко використовуваними на сьогодні є ІС, принцип дії яких ґрунтується на отриманні, обробці та передачі оптичного сигналу [2]. В той же час сфери застосування та функціональні можливості таких ІС визначаються розмірами, номенклатурою та кількістю оптичних елементів, що входять до складу таких систем, характеристиками оптичного середовища, а також типом сигналу, що передається в цьому середовищі (безперервний оптичний потік або імпульс).

Водночас суттєвий вплив на точність та надійність таких ІС, окрім характеристик джерела оптичного випромінювання (як правило, це мініатюрні напівпровідникові генератори когерентного (лазерного) випромінювання), чинять також оптичні елементи цих систем (волоконно-оптичні кабелі, хвильоводи, розгалужувачі, заломлювачі, дзеркала, коліматори тощо), дотримання високої якості та точності виконання яких дозволяє значно підвищити термін експлуатації цих ІС, зменшити час на передавання та обробку інформації і, як наслідок, зменшити їх вартість, чим збільшується конкурентна привабливість таких ІС [3].

Як матеріал оптичних елементів більшості сучасних ІС використовується оптичне силікатне скло сортів «крон», «флінт» та кварцове скло [4]. Використання саме такого матеріалу пов'язано з його задовільними

оптичними, механічними та теплофізичними характеристиками, що, разом зі здатністю до гнучкого модифікування його оптико-механічних властивостей та відносно невеликою собівартістю виготовлення, забезпечило його широке застосування [5]. Цей факт також підтверджується численними інноваційними розробками, пов'язаними з розширенням номенклатури оптичних елементів ІС зі скла, а також удосконаленням поверхневих властивостей цих елементів, що дозволяє використовувати останні не лише в класичних інформаційних системах, а й в оптичних мікро- та наносистемах [6].

За даними роботи [7], показано, що, незважаючи на відпрацьовану та усталену традиційну технологію виготовлення елементів ІС з оптичного скла, більш перспективною щодо подальшого удосконалення їх оптичних характеристик є технологія електронно-променевої мікрообробки оптичних матеріалів.

У той же час у роботах, присвячених технології стрічкової поверхневої електронно-променевої обробки оптичних матеріалів, дослідженням якої займалися провідні вчені Дудко Г. В. [8], [9], Лісоченко В. М. [9], Канашевич Г. В. [10-12], Ващенко В. А. [12-14], не наводяться дані щодо отримання за цією технологією мікроелементів, якість поверхні яких відповідала б вимогам сучасних ІС.

В роботі [15] представлено нові уявлення про фізичні явища, які супроводжують процес електронно-променевої обробки оптичного і технічного скла. Використані автором закони та розроблені положення значно розширили технологічні можливості електронного потоку як інструменту до рівня його застосування у мікрообробці.

Таким чином, покращення якісних характеристик оптичних поверхонь елементів пристроїв інформаційних систем методом електронно-променевої мікрообробки є питанням актуальним, вивченню якого присвячена ця наукова робота.

Мета роботи. Доведення ефективності методу електронно-променевої мікрообробки в процесі виготовлення, удосконалення та оновлення елементної бази інформаційних систем шляхом зменшення залишкової мікрошорсткості та геометричної рівномірності і хімічної однорідності поверхневого шару оптичних елементів.

Обладнання та інструментальна база процесу електронно-променевої мікрообробки. Як основне технологічне обладнання використовується електронно-променева установка (ЕПУ), виготовлена на базі вакуумної установки УВН-71. Застосований на ЕПУ механізм переміщення забезпечує рух зразків у робочому об'ємі вакуумної камери зі швидкістю $V_{nom} = 0-20$ см/с [16].

Як джерело стрічкового електронного потоку застосовано електронно-променеву гармату (ЕПГ) Пірса, яка забезпечує формування такого потоку довжиною $l = 60$ мм та шириною $h = 1,5-2,0$ мм [17].

Основні технічні характеристики ЕПГ Пірса такі: прискорююча напруга $U_{np} = 1-10$ кВ $\pm 2\%$, струм потоку $I_{nom} = 50-300$ мА, його питома потужність 10^1 Вт/см² $\leq P_{nom} \leq 10^5$ Вт/см².

Як дослідні об'єкти, що підлягали мікрообробці та подальшому дослідженню, обиралися прямокутні оптичні пластини у кількості 10 штук з розмірами 20×20 мм.

Математичний розрахунок енергетичного розподілу електронного потоку по оптичній поверхні. Як відомо [18], вихідні оптичні властивості та стан поверхні досліджуваних об'єктів регламентуються умовами виготовлення, а їх технологічні та експлуатаційні характеристики залежать від стану поверхневого шару (ПШ). Саме рівень дефектності ПШ (тріщинуватість, хімічна неоднорідність та інше) обумовлює рівень поверхневої енергії, від якого залежать якість стану поверхні та дотримання експлуатаційних вимог до самих виробів [19]. Так, на рисунку 1 представлено загальну схему мікрообробки оптичної пластини товщиною H стрічковим електронним потоком шириною l . За технологією електронно-променевої мікрообробки електронна стрічка рівномірно рухається по поверхні пластини зі швидкістю V_{nom} (рисунк 1, а), а після повного її проходження відбувається регульоване охолодження зразка, в процесі якого йде формування поверхні пластини, а також ПШ товщиною h_{np} (рисунк 1, б) з властивостями, що є відмінними від основного матеріалу.

Просторово-часова структура стрічки відповідає нормальному розподілу (максимальну енергію мають електрони на осі стрічки, мінімальну – ті, які формують край стрічки).

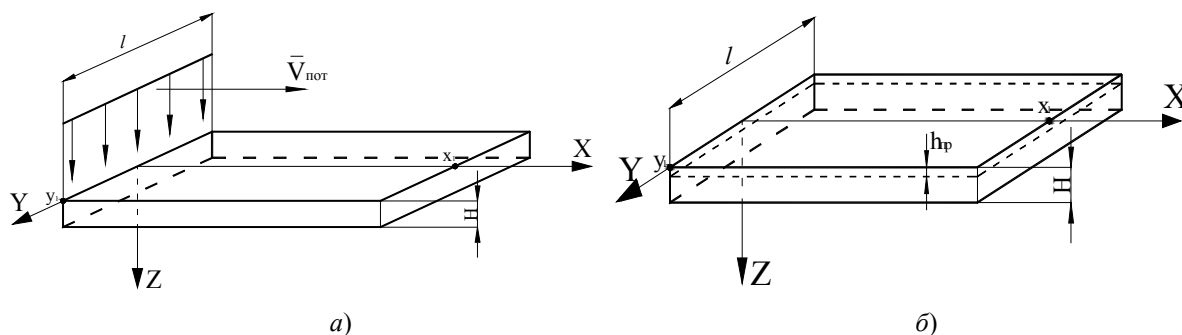


Рисунок 1 – Схема мікрообробки стрічковим електронним потоком плоскопаралельної оптичної пластини (а) та розташування модифікованого ПШ (вказано пунктиром) (б)
(позначення до рисунка наведені у тексті)

Нормальний розподіл щільності потоку змінюється в часі, а його характер можна виразити математично:

$$F_n = F(x, y, z, t),$$

де x, y, z – просторові координати,
 t – час.

В процесі математичного моделювання необхідно враховувати глибину проникнення електронного потоку в ПШ оптичного матеріалу. Так, у випадку проникнення електронів у ПШ на глибину, більшу за 10 мкм, необхідно використовувати об'ємне джерело теплоти. При цьому зміна температури відбувається по глибині z матеріалу. Якщо необхідно елект-

ронним потоком вплинути лише на дефектний шар (на глибину до 2 мкм), використовується поверхневе джерело теплоти за координатами x, y .

Розрахунок температур на поверхні пластини і по її глибині проводиться на основі побудованої математичної моделі рухомого джерела теплоти гаусового типу (враховуючи коефіцієнт зосередженості) для напівобмеженого тіла.

Тому в основу розрахунку покладено рівняння теплопровідності для напівобмеженого тіла з такими початковими та граничними умовами:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad -\infty < x < +\infty; \quad -\infty < y < +\infty; \quad 0 \leq z < +\infty; \quad T(x, y, z, 0) = T_0;$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = F_n(x_0 - V_{\text{пот}} \cdot t, y, 0, t) - L_n(x, y, 0, t, T_{z=0});$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_0} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_1} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_0} = \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = 0,$$

де $F_n(x_0 - V_{\text{пот}} \cdot t, y, 0, t)$ – функція розподілу інтенсивності електронного потоку на поверхні матеріалу за координатами x, y, z та часом t ;

$L_n(x, y, 0, t, T_{z=0})$ – розподіл потоку, обумовлений леткістю матеріалу з поверхні розплаву у вакуум за координатами x, y, z та часом t ;

T, K – температура в момент часу t ;

T_0, K – температура попереднього нагріву матеріалу;

$a^2 (m^2/c)$ – коефіцієнт температуропровідності матеріалу;

$\lambda (W/cm^2 K)$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

Враховуючи явище леткості матеріалу скла під впливом високих температур (1200-1500 °C), розподіл температури по глибині оброблюваної поверхні з часом описується таким чином:

$$T(z, t) = T_0 + \frac{a}{\lambda \sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{F_{n1}(\tau) - L_n(0, \tau, T_{z=0})}{\sqrt{t - \tau}} e^{-\frac{z^2}{4a^2(t-\tau)}} d\tau,$$

де $L_n(0, \tau, T_{z=0}) = 15 \cdot L \cdot 10^{\frac{p_1 - p_2}{T_{z=0}(\tau - \delta)}}$ – розподіл випаровування теплового потоку з поверхні матеріалу у вакуум, обумовлений леткістю розплаву.

Підготовка об'єктів до електронно-променевої мікрообробки. Перед електронно-променевою мікрообробкою оптичні поверхні зразків протираються ватним тампоном, змоченим в етиловому спирті з додаванням поліриту «Крокус», і залишаються до повного висихання. Висушені зразки витираються ватним сухим тампоном до повного видалення часток поліриту з їх поверхні. Далі пластини розміщуються у технологічний об'єм електронно-променевої установки, де підлягають іонному очищенню, при якому поверхня зразків звільняється від залишків миючих речовин, травника й абразивних включень, які потрапили у ПШ на стадіях механічного шліфування і полірування.

Далі, в результаті електронно-променевої мікрообробки, оптичний виріб нагрівається до температур $(T_g-400) \dots (T_g-80)^\circ\text{C}$ у вакуумі з залишковим тиском, не більшим за 10^{-4} Па, витримується за таких умов протягом 5-20 хв, після чого піддається обробці стрічковим електронним потоком питомої потужності $P_{\text{пит}} = 10^1 - 0,5 \cdot 10^2$ Вт/см² зі швидкістю 0,1-5 см/с. Далі оптичний об'єкт знову витримується протягом 10-30 хв за температури $T_g-80^\circ\text{C}$ та остаточно охолоджується у вакуумі протягом часу, не меншого за 50 хв.

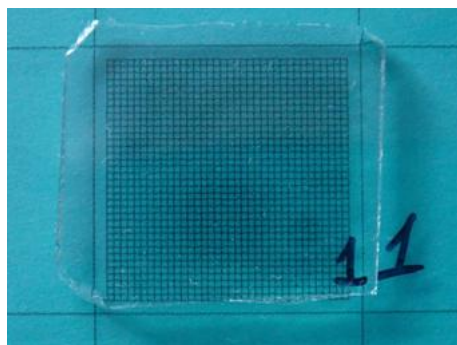
За таких умов продукти співполірування (речовини, які заповнюють дефектний шар: H^+ , H_2O , H_3O^+ , SiOH , Na , K , Na^+ , K^+ , NaOH , KOH , Si-O , $(\text{Si-O-Si})_m$, $(\text{Si-O-Si})_m$ – уламки скла) дисоціюють на слабко зв'язані хімічні елементи та сполуки: H_2 , N^+ , O_2 , C , CO_2 , N_2 , H_2O та інші і десорбують у вакуум, а структура дефектного шару перебудовується.

Подальша витримка за температури $T_g-80^\circ\text{C}$, $T_g-90^\circ\text{C}$, $T_g-100^\circ\text{C}$ протягом 10-30 хв та заключне охолодження скла протягом понад 50 хв забезпечують енергетичну рівновагу речовин, які залишилися у дефектному шарі, та рівномірне розподілення допустимих мікронапружень, внесених у дефектний шар перебудовою структури.

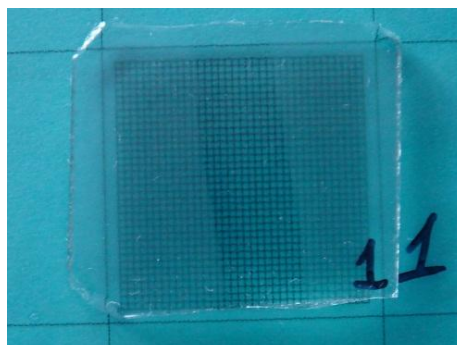
Обговорення отриманих результатів.

Рівень термічного впливу електронного потоку на матеріал (нагрів, проплавлення, випаровування) визначається, з одного боку, теплофізичними параметрами матеріалу α , λ , з другого боку – загальною потужністю електронного потоку $P_{\text{ном}} = I_{\text{ном}} \times U_{\text{ном}}$, його питомою потужністю $P_{\text{пит}} = P_{\text{ном}} / S$ та часом t дії на матеріал.

На рисунку 2 зображено результат змочування оптичної поверхні скла, необробленого електронним потоком (а) та обробленого електронним потоком через маску (б), що вказує на суттєве зміння поверхневої енергії пластини і покращення її адгезійної властивості [20], [21].



а)



б)

Рисунок 2 – Поверхня оптичного скла без слідів змочування (а) та зі слідами змочування через маску (б)

Дослідження мікрогеометрії поверхні оптичних об'єктів до та після електронно-променевої мікрообробки проводились методом атомно-силової мікроскопії на приладі «NT-206V». Дослідження на цьому приладі

проводилися за нормальних умов ($P = 1$ атм., $T = 18^\circ\text{C}$, вологість – 68 %). Зразок розміщався на предметному столику атомно-силового мікроскопа, де проводилося їх сканування в статичному режимі. При цьому були використані

ні кремнієві зонди «Ultrasharp CSC38» (виробник: «Mikromasch», Німеччина). Вибір необхідної ділянки на поверхні зразка проводився системою мікропозиціонування і вбудованим оптичним довгофокусуючим мікроскопом Logitech (виробник: «Logitech Inc», США).

В результаті проведених досліджень було отримане розподілення мікронерівнос-

тей та латеральних сил на ділянках поверхні 13x13 мкм, вивчення яких показало наступне.

Встановлено, що середньоарифметичне та середньостатистичне значення мікронерівностей поверхонь зразків, що не підлягали електронно-променевої мікрообробці, становили, відповідно: $Ra = 126$ нм та $Rq = 145$ нм (рисунк 3).

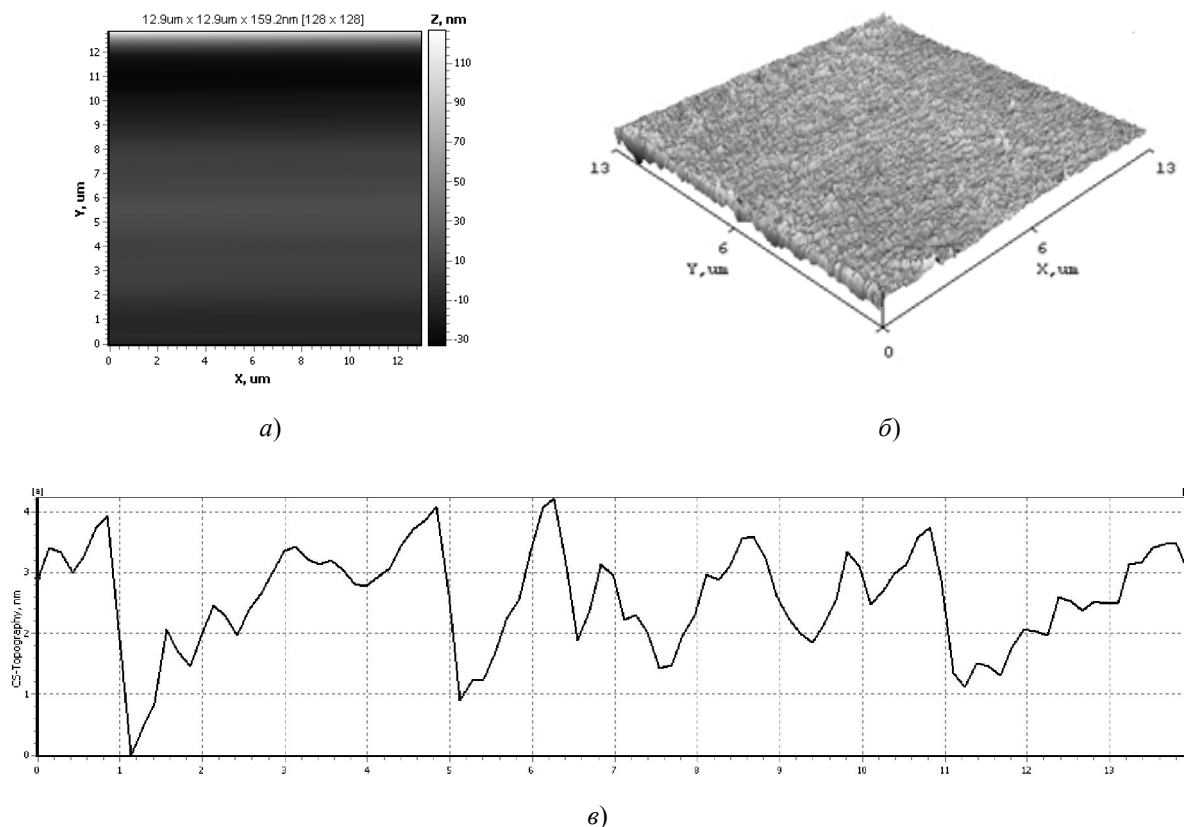


Рисунок 3 – Топограма (а), мікрорельєф (б) та профілограма (в) ділянки поверхні оптичного об'єкта, що не підлягав електронно-променевої мікрообробці. NT-206V

В той же час, після мікрообробки поверхні таких об'єктів низькоенергетичним електронним потоком спостерігалася значне зменшення (у 2,6-2,9 разу) залишкових мікронерівностей: $Ra = 46$ нм, $Rq = 55$ нм (рисунк 4).

Таке зменшення залишкових мікронерівностей поверхонь зразків елементної бази інформаційних систем внаслідок низькоенергетичного електронно-променевого оброблення стрічковим електронним потоком, на думку авторів, пов'язане з проплавленням поверхневого шару скла (на глибину від кількох мікрометрів до кількох десятків мікрометрів) та

його окварцюванням. Це, в свою чергу, веде до вирівнювання поверхні та очищення її хімічного складу.

Також було встановлено [22], що, окрім зменшення мікрорельєфу поверхні оптичних зразків, оброблених електронною стрічкою, відбувається покращення хімічної однорідності та зменшення термомеханічних напружень у поверхневому шарі скла. Це виникає при поступовій витримці за заданої температури та подальшому охолодженні оптичного скла після електронно-променевої мікрообробки [23].

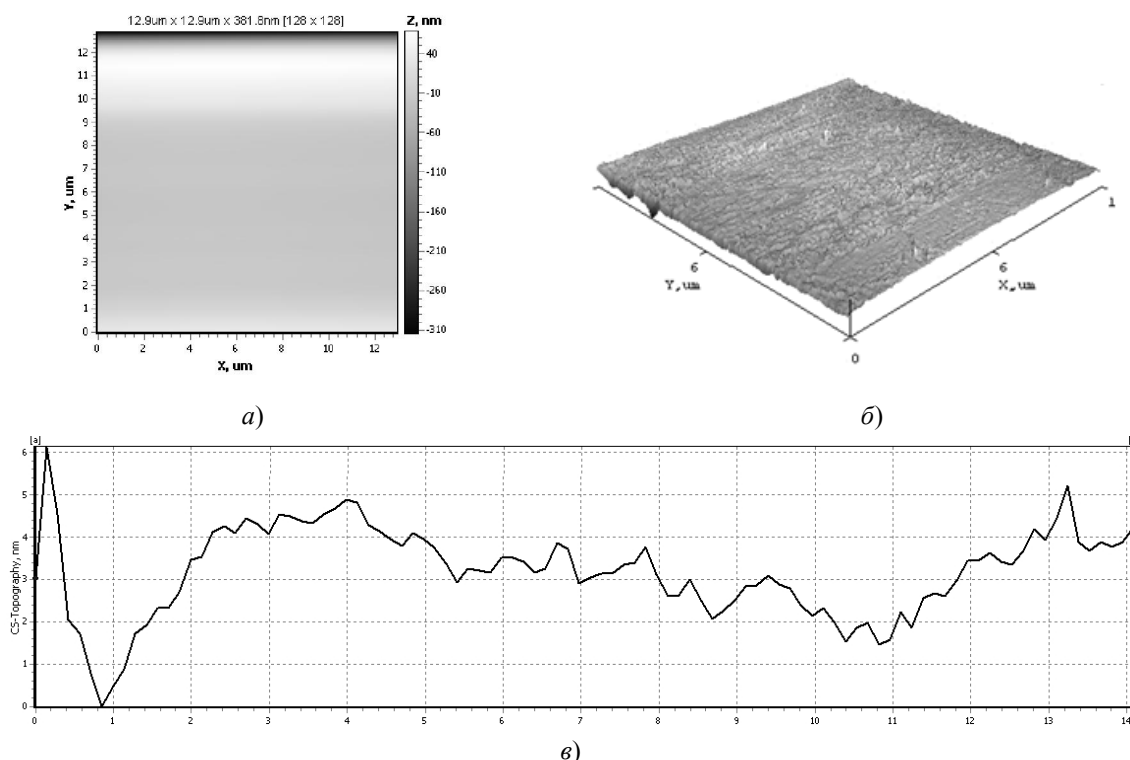


Рисунок 4 – Топограма (а), мікрорельєф (б) та профілограма (в) ділянки поверхні оптичного об'єкта після електронно-променевої мікрообробки. NT-206V

Висновки. Таким чином, доведено ефективність методу електронно-променевої мікрообробки в процесі виготовлення, удосконалення та оновлення елементної бази інформаційних систем, а його наукова новизна полягає в наступному:

1. Вперше встановлено, що мікрообробка стрічковим електронним потоком поверхні оптичних елементів можлива за умов дотримання цим потоком ширини до 2,0 мм та питомої потужності $10^1 \text{ Вт/см}^2 \leq P_{\text{пит}} \leq 10^5 \text{ Вт/см}^2$.

2. Показано, що представлений метод мікрообробки забезпечує зменшення залишкової мікрошорсткості поверхні оптичних елементів у 2,6-2,9 разу та покращує структурну і хімічну однорідність поверхневого шару оптичних елементів.

Практична цінність запропонованого методу електронно-променевої мікрообробки оптичних матеріалів полягає у розширенні можливостей наявних технологій мікроелектроніки щодо виготовлення, вдосконалення та оновлення елементної бази сучасних інформаційних систем. Це, в цілому, веде до покращення техніко-експлуатаційних характеристик таких систем та значного підвищення їх ефективності (так,

час надійної експлуатації оптичних елементів ІС може бути збільшений у 1,3-1,5 разу).

Подальшими перспективними дослідженнями в цьому напрямі є визначення технічних характеристик металізованих поверхонь оптичних елементів інформаційних систем з метою розроблення регресійної моделі, що дозволить спрогнозувати оптимальний час надійної експлуатації таких систем.

Список використаних джерел

- [1] E. Oswaldo, D&M. G. Perez, and J. E. Lascano, "Literature review about intention mining in information systems", *Journal of Computer Information Systems*, vol. 61 (4), pp. 295-304, 2021. doi: org/10.1080/08874417.2019.1633569.
- [2] G. W. Reynolds, and R. M. Stair, *Principles of Information Systems. A Managerial Approach*. 9th ed. Florida, USA: Florida State University, 2010.
- [3] B. Elliott, "Front matter", in *Optical Communication*. New York, USA: AIP Publishing Melville, 2021, Fm1, pp. i-x. doi: org/10.1063/9780735423077frontmatter.

- [4] Л. І. Муравський, Я. В. Бобицький, та Г. І. Гаськевич, *Оптичні інформаційні системи*. Львів, Україна: СПОЛОМ, 2011.
- [5] J. Hildebrand, K. Hecht, J. Bliedtner, and H. Müller, "Advanced analysis of laser beam polishing of quartz glass surfaces", *Physics Procedia*, vol. 39, pp. 277-285, 2012. doi: org/10.1016/j.phpro.2012.10.039.
- [6] E. A. B. Saleh, and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2013. Print.
- [7] М. П. Бочок, Н. П. Будко, В. А. Ващенко, Г. В. Канашевич, та Д. І. Котельников, *Спеціальні методи обробки оптичного скла*. Чернігів, Україна: ЧДТУ, 215, 2001.
- [8] Г. В. Дудко, С. К. Кулов, Ю. А. Розе, и Н. Г. Максимова, "Исследование электронно-лучевых процессов в создании базовых технологий ЭЛЭФП", *Электронная промышленность*, № 1, с. 41-45, 1991.
- [9] Г. В. Дудко, и В. Н. Лисоченко, "Проблема формирования особо чистых и бездефектных поверхностей", в *Материалы краткосрочного семинара*. Ленинград, 1985, с. 13-16.
- [10] Г. М. Дубровська, Г. В. Канашевич, та М. О. Бондаренко, "Структурні перетворення у поверхневому шарі оптичного скла та фотопластинах від дії низькоенергетичного електронного потоку", на *Науч.-техн. конф. Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении*. Одесса, 2-4 июня 2004, с. 60-64.
- [11] G. V. Kanashevich, "Micro-treatment of surfaces of plates made of optical glass with a low-power electronic stream of a band form" in *7th World Congress on Recovery, Recycling and Reintegration & China International 3R Exhibition*. Beijing, China, 25-29 Sept. 2005, 7.
- [12] Г. В. Канашевич, В. А. Ващенко, та М. О. Бондаренко, "Перспективи використання електронного променя в технологіях інтегральної оптики", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 189-193, 2000.
- [13] В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, и Д. И. Котельников, *Электронная обработка материалов*, т. 44, № 6, 2004.
- [14] I. V. Yatsenko, V. P. Maslov, V. S. Antonyuk, V. A. Vashchenko, O. V. Kirichenko, and K. M. Yatsenko, "Electronic beam technology in optoelectronic instrumentation: high-quality curved surfaces and microprofile creation in different geometric shapes". *Journal of Nano- and Electronic Physics*. vol. 13 (4), 04034 (5 p.), 2021.
- [15] Г. В. Канашевич, "Технологічні основи керування якістю поверхневого шару оптичних матеріалів при електронно-променевому мікрообробленні", дис. д-ра техн. наук: 05.03.07, Черкас. держ. технолог. ун-т, Черкаси, 2009, с. 336.
- [16] М. П. Рудь, Г. В. Канашевич, В. П. Бойко, та Ю. І. Коваленко. "Впровадження комп'ютеризованої системи керування в процес електронної обробки оптичних матеріалів", на *VII ежегод. междунар. пром. конф. Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях*. Славское-Киев, 12-16 февр. 2007, с. 460.
- [17] М. П. Рудь, М. О. Бондаренко, Ю. І. Коваленко, та І. В. Яценко, "Дослідження та формування стрічкового електронного потоку для мікрообробки поверхонь матеріалів", *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, № 2, с. 58-63, 2012.
- [18] V. A. Vashchenko, I. V. Yazenko, Yu. I. Kovalenko et al., "Effect of electron-beam treatment of sensor glass substrates for SPR devices on their metrological characteristics", *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*, vol. 22 (4), pp. 444-451, 2019. doi: org/10.15407/spqeo22.04.444.
- [19] ISO 10110-1:2019. Optics and photonics – Preparation of drawings for optical elements and systems, Parts 1-17, 2019.
- [20] Г. В. Канашевич, "Фізичні явища і механізми, за якими змінюється поверхня і поверхневий шар оптичного матеріалу від дії електронного потоку", *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*, № 1, с. 184-189, 2014.
- [21] М. В. Голуб, С. М. Мацепа, Г. В. Канашевич, О. С. Алексєєва, Є. В. Хижняк, та П. П. Дмитренко, "Металізація технічного скла з використанням електронно-променевого методу мікрообробки поверхні", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 34-38, 2018.

- [22] Yu. Kovalenko, V. Antonyuk, and Ih. Zhavoronok, "Investigation of the influence of basic technical parameters of ribbon electron flow on the microrelief of the optical glass surface", *Machines. Technologies. Materials: Int. J. for Science, Technics and Innovations for the Industry*, no. 3, pp. 106-109, 2020.
- [23] Г. В. Канашевич, "Термоелектричний вплив низькоенергетичного електронного потоку на дефектний шар оптичного скла", *Вісник НТУУ "КПІ". Серія: Приладобудування*, т. 45, с. 123-130, 2013.
- ### References
- [1] E. Oswaldo, D&M. G. Perez, and J. E. Lascano, "Literature review about intention mining in information systems", *Journal of Computer Information Systems*, vol. 61 (4), pp. 295-304, 2021. doi: org/10.1080/08874417.2019.1633569.
- [2] G. W. Reynolds, and R. M. Stair, *Principles of Information Systems. A Managerial Approach*. 9th ed. Florida, USA: Florida State University, 2010.
- [3] B. Elliott, "Front matter", in *Optical Communication*. New York, USA: AIP Publishing Melville, 2021, Fm1, pp. i-x. doi: org/10.1063/9780735423077frontmatter.
- [4] L. I. Muravskiy, Ya. V. Bobyskiy, and H. I. Haskevych, *Optical information systems*. Lviv, Ukraine: SPOLOM, 2011 [in Ukrainian].
- [5] J. Hildebrand, K. Hecht, J. Bliedtner, and H. Müller, "Advanced analysis of laser beam polishing of quartz glass surfaces", *Physics Procedia*, vol. 39, pp. 277-285, 2012. doi: org/10.1016/j.phpro.2012.10.039.
- [6] E. A. B. Saleh, and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2013. Print.
- [7] M. P. Bochok, N. P. Budko, V. A. Vashchenko, G. V. Kanashevich, and D. I. Kotelnikov, *Special methods of optical glass processing*. Chernihiv, Ukraine: ChDTU, 215, 2001 [in Ukrainian].
- [8] G. V. Dudko, S. K. Kulov, Yu. A. Roze, and N. G. Maksimova, "Study of electron-beam processes in the creation of basic technologies for EBEFP", *Elektronnaya promyshlennost'*, no. 1, pp. 41-45, 1991 [in Russian].
- [9] G. V. Dudko, and V. N. Lisochenko, "The problem of forming extra-clean and defect-free surfaces", in *Materials of the short-term seminar*. Leningrad, 1985, pp. 13-16 [in Russian].
- [10] H. M. Dubrovskaya, H. V. Kanashevych, and M. O. Bondarenko, "Structural transformations in the surface layer of optical glass and photoplates from the action of low-energy electron flow", in *Proc. sci-tech. conf. New and non-traditional technologies in resource and energy saving*. Odessa, June 2-4, 2004, pp. 60-64 [in Ukrainian].
- [11] G. V. Kanashevich, "Micro-treatment of surfaces of plates made of optical glass with a low-power electronic stream of a band form" in *7th World Congress on Recovery, Recycling and Reintegration & China International 3R Exhibition*. Beijing, China, 25-29 Sept. 2005, 7.
- [12] H. V. Kanashevych, V. A. Vashchenko, and M. O. Bondarenko, "Prospects for the use of electron beam in integrated optics technologies". *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universytetu*, no. 2, pp. 189-193, 2000 [in Ukrainian].
- [13] V. A. Vashchenko, O. V. Kirichenko, and D. I. Kotelnikov, *Elektronnaya obrabotka materialov*, vol. 44, no. 6, 2004 [in Russian].
- [14] I. V. Yatsenko, V. P. Maslov, V. S. Antonyuk, V. A. Vashchenko, O. V. Kirichenko, and K. M. Yatsenko, "Electronic beam technology in optoelectronic instrumentation: high-quality curved surfaces and microprofile creation in different geometric shapes". *Journal of Nano- and Electronic Physics*. vol. 13 (4), 04034 (5 p.), 2021.
- [15] G. V. Kanashevich, "Technological bases of quality control of the surface layer of optical materials in electron beam micromachining", D.S. thesis: 05.03.07, Cherkasy State Tech. Univ., Cherkasy, Ukraine, 2009, p. 336 [in Ukrainian].
- [16] M. P. Rud, H. V. Kanashevych, V. P. Boiko, and Yu. I. Kovalenko, "Introduction of a computerized control system in the process of electronic processing of optical materials", on *7th Annual Int. Industrial Conf. The effectiveness of the implementation of scientific, resource and industrial potential in modern*

- conditions, Slavskoye-Kiev, Febr. 12-16, 2007, p. 460 [in Ukrainian].
- [17] M. P. Rud, M. O. Bondarenko, Yu. I. Kovalenko, and I. V. Iatsenko, "Research and formation of tape electron flow for microtreatment of material surfaces", *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, no. 2, pp. 58-63, 2012 [in Ukrainian].
- [18] V. A. Vashchenko, I. V. Yazenko, Yu. I. Kovalenko et al., "Effect of electron-beam treatment of sensor glass substrates for SPR devices on their metrological characteristics", *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*, vol. 22 (4), pp. 444-451, 2019. doi: org/10.15407/spqeo22.04.444.
- [19] ISO 10110-1:2019. Optics and photonics – Preparation of drawings for optical elements and systems, Parts 1-17, 2019.
- [20] H. V. Kanashevych, "Physical phenomena and mechanisms by which the surface and surface layer of optical material changes from the action of electron flow", *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu Povitrianykh Syl*, no. 1, pp. 184–189, 2014 [in Ukrainian].
- [21] M. V. Holub, S. M. Matsepa, H. V. Kanashevych, O. S. Aleksieieva, Ye. V. Khyzhniak, and P. P. Dmytrenko, "Metallization of technical glass using electron-beam method of surface microprocessing", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu*, no. 2, pp. 34-38, 2018 [in Ukrainian].
- [22] Yu. Kovalenko, V. Antonyuk, and Ih. Zhaivoronok, "Investigation of the influence of basic technical parameters of ribbon electron flow on the microrelief of the optical glass surface", *Machines. Technologies. Materials: Int. J. for Science, Technics and Innovations for the Industry*, no. 3, pp. 106-109, 2020.
- [23] H. V. Kanashevych, "Thermoelectric effect of low-energy electron flow on a defective layer of optical glass", *Visnyk NTUU "KPI". Seriya: "Pryladobuduvannia"*, vol. 45, pp. 123-130, 2013 [in Ukrainian].

S. M. Matsepa¹,

e-mail: s.matsepa@chdtu.edu.ua

H. V. Kanashevych¹, Dr.Tech.Sc., Professor,

Yu. I. Kovalenko¹, D.Ph.,

R. V. Tsynda²,

I. S. Zhaivoronok¹

¹ Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

² Cherkasy Scientific Research Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine
Pasterivska st., 104, Cherkasy, 18009, Ukraine

IMPROVEMENT OF THE QUALITY OF OPTICAL SURFACES OF THE ELEMENT BASE OF INFORMATION SYSTEMS BY THE METHOD OF ELECTRON-BEAM MICROPROCESSING

The article presents the results of electron-beam microprocessing of optical surfaces of the element base of information systems, proving the improvement of their quality characteristics (reducing the microroughness and microstress in the surface layer of the material, structural and chemical stabilization in defective and fractured layers, controlled change in adhesive properties of the material surface, etc.).

An electron beam unit is used as the main technological equipment, which has been made on the basis of the vacuum spraying unit (VSU-71). As a source of tape electron flow, Pierce's electron beam gun, which provides the formation of such a stream of 60 mm length, 1.5-4.0 mm width and has a specific power of $10^1 \text{ W/cm}^2 \leq R_{pit} \leq 10^5 \text{ W/cm}^2$, has been used.

Structural and chemical transformations that occur on the surface and in the near-surface layer of optical material due to such microprocessing are considered. Technological modes of electron-beam microprocessing of optical glass at which there is a qualitative improvement of surfaces of

optical elements is established, which leads to increased performance and reliability of these elements. The result of wetting the optical surface of untreated and electronically treated glass through the mask is presented, which indicates a significant change in the surface energy of the plate and improve its adhesive properties.

As a result of research it has been found that the use of electron beam microprocessing reduces the residual microroughness of the surface optical elements 2.6-2.9 times and improves the structural and chemical homogeneity of the surface layer of optical elements. It has been also found that in addition to reducing the microrelief of the surface of optical samples treated with electronic tape there is an improvement in chemical homogeneity and a decrease in thermomechanical stresses in the surface layer of glass. This occurs during gradual exposure to a given temperature and subsequent cooling of the optical glass after electron beam microprocessing. The prospect of using the method of electron-beam microprocessing of optical elements in the manufacture, improvement and updating of the element base of modern information systems is shown.

Keywords: *information system, optical glass, optical surface, optical microelement, electron beam microprocessing.*

УДК 535.135

[0000-0001-6816-0391] **В. М. Боровицький**, *д-р техн. наук, професор*,
e-mail: v.borovytsky@yahoo.com

[0000-0001-7213-9368] **В. І. Микитенко**, *д-р техн. наук, професор*,
e-mail: v.mikitenko@nil-psf.kpi.ua

[0000-0002-8517-6675] **О. Є. Гудзь**, *аспірант*
e-mail: alexevgood@gmail.com

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
пр-т Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

УЗАГАЛЬНЕНИЙ МЕТОД ДЕМОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ТРИВИМІРНИХ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ЙОГО ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

У роботі запропоновано комплексний метод демодуляції, який можна використовувати для отримання тривимірних цифрових зображень. Цей метод забезпечує знаходження контрасту гармонійної просторової модуляції освітлення при довільних значеннях її фазових кутів. Робота містить текст двох функцій мовою Python, у яких запропонований метод демодуляції застосовується для отримання тривимірних цифрових зображень. Перевагою запропонованого методу є те, що він може використовуватися з економічними пристроями, які формують гармонійну просторову модуляцію освітлення та можуть встановлюватися на більшості оптичних мікроскопів без придбання комерційного програмного забезпечення.

Ключові слова: цифрова обробка зображень, тривимірне цифрове зображення, просторова модуляція освітлення, оптичний мікроскоп, демодуляція.

Вступ. Однією з важливих переваг сучасної оптичної мікроскопії є можливість отримання тривимірних зображень з субмікронною роздільною здатністю у різних оптичних діапазонах [1]. Так, конфокальні лазерні скануючі мікроскопи використовують принцип механічного сканування сфокусованим лазерним променем у тривимірному просторі, де розташований зразок для спостереження. Такі мікроскопи дозволяють безконтактно отримувати тривимірні зображення живих клітин при спостереженні флюоресценції органічних молекул, поверхонь різних матеріалів та деталей з високою роздільною здатністю [2]. На жаль, висока вартість таких мікроскопів, яка у більшості випадків знаходиться у межах 50 000–250 000 Євро, суттєво обмежує доступ до них українських дослідників.

Приблизно 25 років тому науковою групою проф. Тоні Вільсона було запропоновано метод отримання тривимірних зображень в оптичних мікроскопах із застосуванням просторової модуляції освітлення (ПМО) [3]. Значну роль у розвитку цього метода відіграло дослідження наукової групи Арведа Вейгеля, в якому було доведено, що цей метод забезпечує майже таку просторову роздільну здатність, як у конфокальному лазерному скануючому мікроскопі [4]. Відомо, що у

площину предмета оптичного мікроскопа можна спроектувати зображення періодичної структури, тобто створити гармонічну ПМО [5-9]. У результаті цього максимальний контраст освітлення буде лише у тих областях об'єкта спостереження, які знаходяться дуже близько до площини предмета оптичної системи мікроскопа. При малих відхиленнях поверхні об'єкта від площини предмета контраст модуляції різко знижується. Тобто контраст модуляції при правильному виборі частоти модуляції дуже чутливий до дефокусування. Тому з'являється така можливість побудови тривимірних зображень:

- в оптичному мікроскопі формується гармонічна просторова модуляція освітлення у площині предмета;
- об'єкт спостереження переміщується вздовж оптичної осі відносно площини предмета з кроком, меншим ніж глибина різко зображувального простору;
- формується набір цифрових зображень з ПМО;
- зображення з ПМО обробляються, знаходяться в області з максимальним контрастом ПМО та з них формується тривимірне зображення поверхні чи тривимірної структури об'єкта спостереження.

Головною перевагою такого методу отримання тривимірних зображень є можливість використання звичайних оптичних мікроскопів з цифровими камерами та моторизованими приводами фокусування. ПМО створюється спеціальним пристроєм, який вставляється на місце регульованої польової діафрагми освітлювального каналу мікроскопа [10, 11]. Головною перевагою такого методу є можливість отримання тривимірних зображень з роздільною здатністю, яка наближається до роздільної здатності конфокального лазерного мікроскопа, зокрема кольорових зображень з витратами, набагато меншими ніж вартість конфокального лазерного мікроскопа. Так, вартість пристроїв ПМО та програмного забезпечення для отримання тривимірних зображень, які виробляють компанії Zeiss або Optigrid, перевищує 10 000–15 000 Євро. Така висока ціна зумовлена тим, що пристрій ПМО повинен забезпечувати дуже точний фазовий зсув ПМО для отримання значень фази ПМО, які у більшості випадків дорівнюють 0, 120 та 240 градусів.

Автори вважають, що вартість пристроїв ПМО можна суттєво зменшити шляхом використання пристроїв для менш точних зсувів ПМО і застосування безкоштовного програмного забезпечення з відкритим доступом. Це дозволить суттєво зменшити вартість пристроїв ПМО і тим самим дасть великий кількості користувачів можливість отримувати тривимірні зображення. Однак для цього треба мати математичний апарат, бажано у вигляді аналітичних виразів, який дозволяє обчислювати контраст ПМО при довільних значеннях фазових кутів.

Метою роботи є розробка математичного апарату для демодуляції – розрахунку контрасту ПМО – при довільних значеннях фазових кутів та відповідного програмного забезпечення для отримання тривимірних цифрових зображень.

Рішення задачі комплексної демодуляції. Максимальний контраст забезпечує одновимірна ПМО. Тому буде розглядатися випадок одновимірної гармонійної ПМО вздовж осі x , яка має певні постійні складову, амплітуду, просторову частоту та початкову фазу і описується функцією $\cos()$. Для знаходження контрасту ПМО опишемо одновимірну ПМО як комплексну функцію [12]:

$$\begin{aligned} U(x) &= U_0 + \left(\frac{\Delta U}{2}\right) \cdot \cos(2\pi \cdot \nu_x \cdot x + \varphi_0) = \\ &= U_0 + \left(\frac{\Delta U}{2}\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ \exp(j \cdot (2\pi \cdot \nu_x \cdot x + \varphi_0)) + \right. \\ &\quad \left. + \exp(-j \cdot (2\pi \cdot \nu_x \cdot x + \varphi_0)) \right\} = \\ &= U_0 + \left(\frac{\Delta U}{2}\right) \cdot \left\{ \frac{\exp(2\pi \cdot j \cdot \nu_x \cdot x) \cdot \exp(j \cdot \varphi_0)}{2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\exp(-2\pi \cdot j \cdot \nu_x \cdot x) \cdot \exp(-j \cdot \varphi_0)}{2} \right\} = \\ &= U_0 + \left(\frac{\Delta U \cdot \exp(2\pi \cdot j \cdot \nu_x \cdot x)}{4}\right) \cdot \exp(j \cdot \varphi_0) + \\ &\quad + \left(\frac{\Delta U \cdot \exp(-2\pi \cdot j \cdot \nu_x \cdot x)}{4}\right) \cdot \exp(-j \cdot \varphi_0) = \\ &= U_0 + c \cdot \exp(j \cdot \varphi_0) + c^* \cdot \exp(-j \cdot \varphi_0) \end{aligned} \quad (1)$$

де $U(x)$ – функція, що описує одновимірний гармонійний сигнал; U_0 – постійна або фонові складова; ΔU – контраст ПМО, який дорівнює різниці між максимальним та мінімальним значеннями гармонійної ПМО; ν_x – просторова частота ПМО; $*$ – символ комплексно узгодженого числа; j – константа $j^2 = -1$; x – лінійна координата; φ_0 – початкова фаза ПМО; c , c^* – комплексні складові гармонічного сигналу:

$$\begin{aligned} c &= \frac{\Delta U}{4} \cdot \exp(2\pi \cdot j \cdot \nu_x \cdot x) \\ c^* &= \frac{\Delta U}{4} \cdot \exp(-2\pi \cdot j \cdot \nu_x \cdot x) \end{aligned}$$

Вираз (1) дозволяє записати формулу для визначення контрасту ПМО

$$\begin{aligned} \Delta U &= 4 \cdot \sqrt{c \cdot c^*} = \\ &= 4 \cdot \sqrt{\frac{\Delta U}{4} \cdot \exp(2\pi \cdot j \cdot \nu_x \cdot x) \cdot \frac{\Delta U}{4} \cdot \exp(-2\pi \cdot j \cdot \nu_x \cdot x)} = \\ &= 4 \cdot \sqrt{\frac{\Delta U^2}{16} \cdot \exp(0)} = \sqrt{\Delta U^2} \end{aligned} \quad (2)$$

Однак при обчисленні контрасту ПМО (2) виникає одна проблема: одне значення $U(x)$ можна зчитати з цифрового зображення, але три величини – U_0 , c та c^* – є невідомими. Для того щоб їх знати, треба мати три цифрові зображення з ПМО, які мають різні фази ПМО. Тоді можна для кожного пікселя тривимірного цифрового зображення знайти

складові c , c^* та обчислити контраст ПМО. Інакше кажучи, треба скласти лінійну систему трьох рівнянь, знайти її корені (U_0 , c , c^*) та обчислити контраст ΔU . Для спрощення математичних виразів будемо використовувати фазові кути ПМО відносно фазового кута першого цифрового зображення з ПМО:

$$\begin{cases} U_1(x) = U_0 + c \cdot \exp(0) + c^* \cdot \exp(-0) = U_0 + c + c^* \\ U_2(x) = U_0 + c \cdot \exp(j \cdot \varphi_2) + c^* \cdot \exp(-j \cdot \varphi_2) \\ U_3(x) = U_0 + c \cdot \exp(j \cdot \varphi_3) + c^* \cdot \exp(-j \cdot \varphi_3) \end{cases} \quad (3)$$

де $U_1(x)$, $U_2(x)$, $U_3(x)$ – амплітуда трьох цифрових зображень з ПМО, які мають фазові кути ПМО (0 , φ_2 , φ_3) у точці x , відповідно.

Систему трьох лінійних рівнянь (3) можна переписати у матричній формі [12]

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U_1(x) \\ U_2(x) \\ U_3(x) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \exp(j \cdot \varphi_2) & \exp(-j \cdot \varphi_2) \\ 1 & \exp(j \cdot \varphi_3) & \exp(-j \cdot \varphi_3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_0 \\ c \\ c^* \end{bmatrix} = \quad (4) \\ &= \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} U_0 \\ c \\ c^* \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Для знаходження рішення треба обчислити зворотну матрицю M^{-1} (4)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U_0 \\ c \\ c^* \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \exp(j \cdot \varphi_2) & \exp(-j \cdot \varphi_2) \\ 1 & \exp(j \cdot \varphi_3) & \exp(-j \cdot \varphi_3) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} U_1(x) \\ U_2(x) \\ U_3(x) \end{bmatrix} = \quad (5) \\ &= M^{-1} \cdot \begin{bmatrix} U_1(x) \\ U_2(x) \\ U_3(x) \end{bmatrix} = M^{-1} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

де M^{-1} – зворотна матриця, яка залежить від фазових кутів φ_2 , φ_3 :

$$\begin{aligned} M^{-1} &= M^{-1}(\varphi_2, \varphi_3) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \exp(j \cdot \varphi_2) & \exp(-j \cdot \varphi_2) \\ 1 & \exp(j \cdot \varphi_3) & \exp(-j \cdot \varphi_3) \end{bmatrix}^{-1} = \\ &= \frac{1}{D} \cdot \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & m_{2,3} \\ m_{3,1} & m_{3,2} & m_{3,3} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$m_{x,y}$ – коефіцієнти зворотної матриці M^{-1} :

$$\begin{aligned} m_{1,1} &= \exp(j \cdot \varphi_2) \cdot \exp(-j \cdot \varphi_3) - \\ &- \exp(-j \cdot \varphi_2) \cdot \exp(j \cdot \varphi_3) = \\ &= \exp(j \cdot (\varphi_2 - \varphi_3)) - \\ &- \exp(-j \cdot (\varphi_2 - \varphi_3)) = \\ &= 2 \cdot j \cdot \sin(\varphi_3 - \varphi_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{1,2} &= \exp(-j \cdot \varphi_2) - \exp(-j \cdot \varphi_3) \\ m_{1,3} &= -\exp(j \cdot \varphi_2) + \exp(j \cdot \varphi_3) \\ m_{2,1} &= \exp(j \cdot \varphi_3) - \exp(-j \cdot \varphi_3) = \\ &= 2 \cdot j \cdot \sin(\varphi_3) \\ m_{2,2} &= \exp(-j \cdot \varphi_3) - 1 \\ m_{2,3} &= 1 - \exp(j \cdot \varphi_3) \\ m_{3,1} &= -\exp(j \cdot \varphi_2) + \exp(-j \cdot \varphi_2) = \\ &= -2 \cdot j \cdot \sin(\varphi_2) \\ m_{3,2} &= 1 - \exp(-j \cdot \varphi_2) \\ m_{3,3} &= \exp(j \cdot \varphi_2) - 1 \end{aligned}$$

D – визначник зворотної матриці M^{-1} , який залежить від фазових кутів φ_2 , φ_3 :

$$\begin{aligned} D &= D(\varphi_2, \varphi_3) = \{ \exp(j \cdot \varphi_2) \cdot \exp(-j \cdot \varphi_3) - \\ &- \exp(-j \cdot \varphi_2) \cdot \exp(j \cdot \varphi_3) + \exp(j \cdot \varphi_3) - \exp(-j \cdot \varphi_3) - \\ &- \exp(j \cdot \varphi_2) + \exp(-j \cdot \varphi_2) \}^{-1} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot j \cdot (\sin(\varphi_2 - \varphi_3) - \sin(\varphi_2) + \sin(\varphi_3))} \end{aligned}$$

Звернено увагу на те, що визначник матриці M буде відрізнятися від нуля тільки при виконанні умов $\varphi_2 \neq 0$, $\varphi_2 \neq 0$, $\varphi_2 \neq \varphi_3$.

Виконаємо математичні перетворення матриці M^{-1} (5) та вирішимо систему лінійних рівнянь (4) для обчислення контрасту ПМО:

$$\begin{aligned} M^{-1} &= M^{-1}(\varphi_2, \varphi_3) = \\ &= \frac{\begin{bmatrix} 2 \cdot j \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi_3) & 2 \cdot j \cdot \sin(\varphi_3) & -2 \cdot j \cdot \sin(\varphi_2) \\ \exp(-j \cdot \varphi_2) - \exp(-j \cdot \varphi_3) & \exp(-j \cdot \varphi_3) - 1 & 1 - \exp(-j \cdot \varphi_2) \\ -\exp(j \cdot \varphi_2) + \exp(j \cdot \varphi_3) & 1 - \exp(j \cdot \varphi_3) & \exp(j \cdot \varphi_2) - 1 \end{bmatrix}}{2 \cdot j \cdot (\sin(\varphi_2 - \varphi_3) - \sin(\varphi_2) + \sin(\varphi_3))} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_0 &= \frac{1}{\sin(\varphi_2 - \varphi_3) - \sin(\varphi_2) + \sin(\varphi_3)} \cdot \\ &\cdot (\sin(\varphi_2 - \varphi_3) \cdot U_1 + \sin(\varphi_3) \cdot U_2 - \sin(\varphi_2) \cdot U_3) \\ c &= \frac{1}{2 \cdot j \cdot (\sin(\varphi_2 - \varphi_3) + \sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_3))} \cdot \\ &\cdot \{ (\exp(-j \cdot \varphi_2) - \exp(-j \cdot \varphi_3)) \cdot U_1 + \\ &+ (\exp(-j \cdot \varphi_3) - 1) \cdot U_2 + \\ &+ (1 - \exp(-j \cdot \varphi_2)) \cdot U_3 \} \\ c^* &= \frac{1}{2 \cdot j \cdot (\sin(\varphi_2 - \varphi_3) + \sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_3))} \cdot \\ &\cdot \{ (-\exp(j \cdot \varphi_2) + \exp(-j \cdot \varphi_3)) \cdot U_1 + \\ &+ (1 - \exp(j \cdot \varphi_3)) \cdot U_2 + \\ &+ (\exp(j \cdot \varphi_2) - 1) \cdot U_3 \} \end{aligned}$$

$$c \cdot c^* = \frac{-1}{4 \cdot (\sin(\varphi_2 - \varphi_3) - \sin(\varphi_2) + \sin(\varphi_3))^2} \cdot$$

$$\cdot 4 \cdot \{ (\exp(-j \cdot \varphi_2) - \exp(-j \cdot \varphi_3)) \cdot U_1 \cdot$$

$$\cdot (-\exp(j \cdot \varphi_2) + \exp(-j \cdot \varphi_3)) \cdot U_1 +$$

$$+ (\exp(-j \cdot \varphi_3) - 1) \cdot U_2 \cdot$$

$$\cdot (-\exp(j \cdot \varphi_2) + \exp(-j \cdot \varphi_3)) \cdot U_1 +$$

$$+ (1 - \exp(-j \cdot \varphi_2)) \cdot U_3 \cdot$$

$$\cdot (-\exp(j \cdot \varphi_2) + \exp(-j \cdot \varphi_3)) \cdot U_1 +$$

$$+ (\exp(-j \cdot \varphi_2) - \exp(-j \cdot \varphi_3)) \cdot$$

$$\cdot U_1 \cdot (1 - \exp(j \cdot \varphi_3)) \cdot U_2 +$$

$$+ (\exp(-j \cdot \varphi_3) - 1) \cdot$$

$$\cdot U_2 \cdot (1 - \exp(j \cdot \varphi_3)) \cdot U_2 +$$

$$+ (1 - \exp(-j \cdot \varphi_2)) \cdot U_3 \cdot$$

$$\cdot (1 - \exp(j \cdot \varphi_3)) \cdot U_2 +$$

$$+ (\exp(-j \cdot \varphi_2) - \exp(-j \cdot \varphi_3)) \cdot U_1 \cdot$$

$$\cdot (\exp(j \cdot \varphi_2) - 1) \cdot U_3 +$$

$$+ (\exp(-j \cdot \varphi_3) - 1) \cdot U_2 \cdot$$

$$\cdot (\exp(j \cdot \varphi_2) - 1) \cdot U_3 +$$

$$+ (1 - \exp(-j \cdot \varphi_2)) \cdot$$

$$\cdot U_3 \cdot (\exp(j \cdot \varphi_2) - 1) \cdot U_3 \}$$

$$c \cdot c^* = \frac{1}{(\sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2 - \varphi_3))^2} \cdot$$

$$\cdot \{ (1 - \cos(\varphi_2 - \varphi_3)) \cdot U_1^2 +$$

$$+ (1 - \cos(\varphi_2)) \cdot U_2^2 +$$

$$+ (1 - \cos(\varphi_3)) \cdot U_3^2 -$$

$$- (1 + (\cos(\varphi_2) - \cos(\varphi_2)) - \cos(\varphi_2 - \varphi_3)) \cdot$$

$$\cdot U_1 \cdot U_2 -$$

$$- (1 - (\cos(\varphi_2) - \cos(\varphi_2)) - \cos(\varphi_2 - \varphi_3)) \cdot$$

$$\cdot U_1 \cdot U_3 -$$

$$(1 - (\cos(\varphi_2) + \cos(\varphi_2)) + \cos(\varphi_2 - \varphi_3)) \cdot$$

$$\cdot U_2 \cdot U_3 \}$$

$$\Delta U = 4 \cdot \sqrt{c \cdot c^*} = \frac{4}{\sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_3) - \sin(\varphi_2 - \varphi_3)} \cdot$$

$$\cdot \{ (1 - \cos(\varphi_2 - \varphi_3)) \cdot U_1^2 +$$

$$+ (1 - \cos(\varphi_2)) \cdot U_2^2 +$$

$$+ (1 - \cos(\varphi_3)) \cdot U_3^2 -$$

$$- (1 + (\cos(\varphi_2) - \cos(\varphi_3)) - \cos(\varphi_2 - \varphi_3)) \cdot$$

$$\cdot U_1 \cdot U_2 -$$

$$- (1 - (\cos(\varphi_2) - \cos(\varphi_3)) - \cos(\varphi_2 - \varphi_3)) \cdot$$

$$\cdot U_1 \cdot U_3 -$$

$$- (1 - (\cos(\varphi_2) + \cos(\varphi_3)) + \cos(\varphi_2 - \varphi_3)) \cdot$$

$$\cdot U_2 \cdot U_3 \}^{0.5}$$

Таким чином, за допомогою математичного апарату (1)-(6) мета роботи досягнута – отримано аналітичний вираз для обчислення контрасту ПМО при довільних значеннях фазових кутів. Для перевірки отриманої формули (6) контраст ПМО при використанні фаз $\varphi_2 = 2\pi/3$ та $\varphi_3 = 4\pi/3$:

(7)

$$\Delta U = \frac{4}{\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) - \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \frac{4\pi}{3}\right)} \cdot$$

$$\cdot \left\{ \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \frac{4\pi}{3}\right)\right) \cdot U_1^2 + \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)\right) \cdot U_2^2 + \right.$$

$$\left. + \left(1 - \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right)\right) \cdot U_3^2 - \right.$$

$$- \left(1 + \left(\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right)\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \frac{4\pi}{3}\right)\right) \cdot$$

$$\cdot U_1 \cdot U_2 -$$

$$- \left(1 - \left(\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right)\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \frac{4\pi}{3}\right)\right) \cdot$$

$$\cdot U_1 \cdot U_3 -$$

$$- \left(1 - \left(\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right)\right) + \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \frac{4\pi}{3}\right)\right) \cdot$$

$$\cdot U_2 \cdot U_3 \}^{0.5}$$

$$\Delta U = 4 \cdot \frac{1}{3 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}} \cdot \left\{ \frac{3}{2} U_1^2 + \frac{3}{2} U_2^2 + \frac{3}{2} U_3^2 - \right.$$

$$\left. - \frac{3}{2} U_1 \cdot U_2 - \frac{3}{2} U_1 \cdot U_3 - \frac{3}{2} U_2 \cdot U_3 \right\}^{0.5} =$$

$$= 4 \cdot \frac{2}{3 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \{ 2 \cdot (U_1^2 + U_2^2 + U_3^2) -$$

$$- 2 \cdot (U_1 \cdot U_2 + U_1 \cdot U_3 + U_2 \cdot U_3) \}^{0.5} =$$

$$= \frac{4}{3} \cdot \sqrt{(U_1 - U_2)^2 + (U_1 - U_3)^2 + (U_2 - U_3)^2}$$

Компанія Zeiss рекомендує застосовувати таку формулу для оцінювання контрасту

ПМО при використанні фаз $\varphi_2 = 2\pi/3$ та $\varphi_3 = 4\pi/3$ [4,6]:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(U_1 - U_2)^2 + (U_1 - U_3)^2 + (U_2 - U_3)^2} \quad (8)$$

Звернемо увагу, що при використанні фазових кутів $\varphi_2 = 120^\circ = 2\pi/3$ та $\varphi_3 = 240^\circ = 4\pi/3$ отримана формула (7) дає результат, пропорційний формулі (8), яка застосовується у сучасних пристроях Zeiss Arotome [4-6]. Це доводить коректність рішення задачі обчислення контрасту ПМО (1)-(6).

Застосування комплексної демодуляції для отримання тривимірних зображень. Розглянемо побудову оптичного мікроскопа для отримання тривимірних зображень (рисунк 1). Цей мікроскоп містить один чи два освітлювальні канали для спостереження зразків у відбитому або (та) прохідному світлі з зображувальним каналом, у якому оптична система формує збільшене зображення зразка у площині матричного фотоприймача цифрової камери. Для автоматизації сканування зразка мікроскоп повинен мати моторизований привід фокусування з комп'ютерним керуванням, який забезпечує переміщення зразка вздовж оптичної осі зображувального каналу з похибками, у декілька разів меншими ніж глибина різко-зображувального простору мікрооб'єктива [1, 3]. Для формування гармонічної ПМО застосовується пристрій з комп'ютерним керуванням, який дозволяє формувати та переміщувати зображення періодичної структури у площині предмета оптичної системи зображувального каналу так, щоб забезпечити певні значення фазових кутів φ_2 та φ_3 (рисунк 1). На відміну від відомих рішень [4-11], запропонований метод демодуляції (1)-(6) дозволяє обробляти зображення з ПМО з довільними фазовими кутами φ_2 та φ_3 за умови, що вони не співпадають та не дорівнюють нулю. Однак рекомендується проектувати пристрій так, щоб фазові кути φ_2 та φ_3 приблизно дорівнювали 120 та 240 кутових градусів. Відсутність вимоги забезпечення певних фазових кутів з високою точністю дозволяє суттєво зменшити вартість пристрою формування ПМО. Треба зазначити, що на переважній більшості сучасних оптичних мікроскопів встановлюються цифрові камери, які підключені до комп'ютерів, та можуть встановлюватися економічні моторизовані приводи фокусування з комп'ютерним керуванням. Тому економічний пристрій формування

ПМО, який вставляється замість блока регулювання польової діафрагми освітлювального каналу, при наявності відповідного програмного забезпечення перетворює звичайний оптичний мікроскоп в аналог конфокального лазерного скануючого мікроскопа [4].

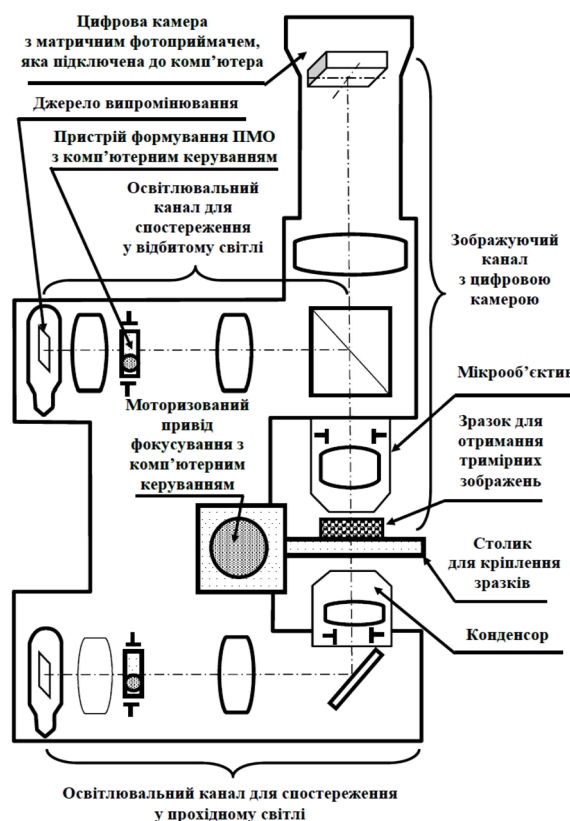


Рисунок 1 – Оптичний мікроскоп для отримання тривимірних зображень з застосуванням ПМО

Програмна реалізація мовою Python.

Запропонований метод комплексної демодуляції може бути реалізований у вигляді програмного забезпечення для отримання тривимірних цифрових зображень.

Функції для здійснення демодуляції при довільних значеннях фаз та формування відповідного тривимірного цифрового зображення описані у прикладі:

```
# -----
#      Complex demodulation
#      for composing 3D images,
#      (C) V.Borovytsky, 2022
# -----
import numpy as np
import math

def Get_Contrast (aU1,aU2,aU3,aph2, aph3):
```

```

s2 = math.sin( aph2 )
s3 = math.sin( aph3 )
s23 = math.sin( aph2 - aph3 )

coeff = 4.0 / ( s2 - s3 - s23 )

c2 = math.cos( aph2 )
c3 = math.cos( aph3 )
c23 = math.cos( aph2 - aph3 )

u11 = ( 1.0 - c23 ) * aU1 * aU1
u22 = ( 1.0 - c2 ) * aU2 * aU2
u33 = ( 1.0 - c3 ) * aU3 * aU3

u12 = (1.0 + ( c2 - c3 ) - c23) * aU1 * aU2
u13 = (1.0 - ( c2 - c3 ) - c23) * aU1 * aU3
u23 = (1.0 - (c2 + c3) + c23) * aU2 * aU3

u = u11 + u22 + u33 - u12 - u13 - u23
wU = coeff * math.sqrt( u )
return wU

def Get_3D_Image(ystack, aph2,aph3,wUmin):

    size_Z = np.size( ystack, 0 )
    size_Y = np.size( ystack, 1 )
    size_X = np.size( ystack, 2 )

    Height_Map=np.zeros( (size_Y,size_X) )
    Contrast_Ma=np.zeros( (size_Y,size_X) )

    step = 3
    rz = range ( 0, int ( size_Z / step ) )
    ry = range ( 0, size_Y )
    rx = range ( 0, size_X )

    for z in rz:
        for y in ry:
            for x in rx:
                zz = step * z

                u1 = ystack [ zz, y, x ]
                u2 = ystack [ zz + 1, y, x ]
                u3 = ystack [ zz + 2, y, x ]
                wU=Get_Contrast (u1,u2,u3, \
                                aph2, aph3)

                if wU >= wUmin:
                    if wU > Contrast_Map[ y, x ]:
                        Height_Map[y,x]=int (z+1)
                        Contrast_Map[y, x]=int (wU)

    return Height_Map, Contrast_Map

```

Обговорення результатів. У прикладі наведені дві відповідні функції, які записані мовою Python. Перша функція `Get_Contrast` дозволяє обчислити контраст ПМО (5), вона має п'ять аргументів – U_1 , U_2 , U_3 , φ_2 , φ_3 – та повертає значення контрасту. Друга функція `Get_3D_Image` формує тривимірне цифрове зображення з відтінками сірого кольору. Вхідною інформацією для цього є масив зображень з ПМО, значення фаз ПМО – φ_2 , φ_3 – та порогове значення контрасту ПМО. Масив зображень складається з певної кількості груп з трьох цифрових зображень з ПМО, які мають фазовий кут ПМО (0, φ_2 , φ_3). Порогове значення контрасту ПМО використовується для того, щоб мінімізувати вплив шумів на формування тривимірних цифрових зображень – якщо контраст ПМО перевищує це порогове значення, тоді він буде аналізуватися для цифрової обробки. Функція повертає два цифрові двомірні масиви – карта висот `Height_Map` та карта значень контрасту ПМО `Contrast_Map`. Карта висот `Height_Map` задає координату z для кожного пікселя (x, y) тривимірного зображення. Карта значень контрасту ПМО `Contrast_Map` визначає яскравість або значення відтінку сірого для кожного пікселя (x, y, z) . Якщо карта висот `Height_Map` містить нульові значення, то це означає, що для відповідних пікселів контраст ПМО не з'ясовано і тому відповідний фрагмент тривимірного зображення буде відсутній. Ці два масиви дозволяють відобразити поверхню складної форми у тривимірному просторі. Наведені дві функції записані у максимально простому вигляді, який добре ілюструє застосування запропонованого методу демодуляції (1)-(5). Ці функції можна оптимізувати шляхом використання бібліотек функцій для паралельних обчислень. Також ці функції можна переробити для побудови кольорових тривимірних зображень.

Висновки. Науковою новизною роботи є запропонований комплексний метод демодуляції та аналітичний вираз для обчислення контрасту гармонійної ПМО при довільних значеннях фазових кутів ПМО та отримання виразу для обчислення контрасту в аналітичній формі. Цей метод може бути застосованим у програмному забезпеченні для отримання тривимірних цифрових зображень. Робота містить текст двох найбільш важливих функцій мовою Python для отримання тривимірних зображень. Практичною цінністю роботи є те,

що він робить можливим застосування економічних пристроїв ПМО для отримання тривимірних зображень на більшості оптичних мікроскопів без придбання комерційного програмного забезпечення. Подальшими перспективами досліджень можуть бути вибір конструкції економічних пристроїв ПМО та дослідження процесу отримання тривимірних цифрових зображень при різних режимах спостереження зразків.

Список використаних джерел

- [1] J. Mertz, *Introduction to Optical Microscopy*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2019.
- [2] J. B. Pawley, *Handbook of Biological Confocal Microscopy*. Boston, MA, US, 2006.
- [3] M. A. A. Neil, R. Juskaitis, and T. Wilson, "Method of obtaining optical sectioning using structured light in a conventional microscope", *Optics Letters*, vol. 22, pp. 1905-1907, 1997.
- [4] A. Weigel, "Resolution in the ApoTome and the confocal laser scanning microscope: comparison", *Journal of Biomedical Optics*, vol. 14 (1), 014022, 2009.
- [5] A. Mazhar, "Structured illumination enhances resolution and contrast in thick tissue fluorescence imaging", *Journal of Biomedical Optics*, vol. 15 (1), 010506, 2010.
- [6] V. Gerstner, F. Hecht, R. Lange, and H. Bloos, "Assembly for increasing the depth discrimination of an optical imaging system", *Patent № US 6 819 415 B2 USA, Int. cl. G01B 9/00, G01B 11/24, G01C 3/08, H01J 3/14, G06K 9/36; assignee: Carl Zeiss Jena GmbH, Jena, Germany. Appl. № 10/089 878; filed Aug. 4, 2001; issued Nov. 16, 2004.*
- [7] L. Schafer, D. Schuster, "Methods and devices for images processing with higher harmonics of an illumination grating", *Patent № US 2008 0069467 USA, Int. cl. G02B 21/00; assignee: Carl Zeiss Imaging Solutions Jena GmbH, Jena, Germany. Appl. № 11/900 532; filed Sept. 12, 2007; issued Mar. 20, 2008.*
- [8] John D. Arbuckle, "Projection device for patterned illumination and microscopy", *Patent № US 2009 0147354 A1 USA, Int. cl. G02B 21/00, G02B 21/06; assignee: Quorum technologies inc. Appl. № 12/ 255 607; filed Oct. 21, 2008; issued Jun. 11, 2009.*
- [9] Hiroaki Nakayama, Yumiko Ouchi, "Structured illumination device and structured illumination microscope device", *Patent № US 2009 0147354 A1 USA, Int. cl. G02B 21/00, G02B 21/06; assignee: Nikon corporation. Appl. № 14/ 996 717; filed Jan. 15, 2016; issued Feb. 20, 2018.*
- [10] ZEISS Apotome 3: Product Info, Carl Zeiss Microscopy GmbH, 07745 Jena, Germany, Feb., 2020. [Online]. Available: https://asset-downloads.zeiss.com/catalogs/download/mic/e3af6c29-7d61-4cee-a563-6095486fb89a/EN_product-info_Apotome3_rel2-0.pdf
- [11] Olympus OptiGrid M: Brochure, Olympus Life Science Europe GmbH, 20034 Hamburg, Germany, Apr., 2009. [Online]. Available: <https://www.lri.se/pdf/olympus/optigridM.pdf>
- [12] В. Т. Воднев, А. Ф. Наумович, и Н. Ф. Наумович, *Основные математические формулы*. Минск: Вышэйшая школа, 1988.
- [13] Z. Bian, C. Guo, S. Jiang et al., "Autofocusing technologies for whole slide imaging and automated microscopy", *Journal of Biophotonics*, vol. 13:e202000227, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/jbio.202000227>
- [14] О. М. Васильєв, *Програмування мовою Python*. Тернопіль: Навчальна книга – Богдан, 2019.
- [15] W. McKinney, *Python for Data Analysis*. Sebastopol, CA, US: O'Reilly Media, Inc., 2013.

References

- [1] J. Mertz, *Introduction to Optical Microscopy*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2019.
- [2] J. B. Pawley, *Handbook of Biological Confocal Microscopy*. Boston, MA, US, 2006.
- [3] M. A. A. Neil, R. Juskaitis, and T. Wilson, "Method of obtaining optical sectioning using structured light in a conventional microscope", *Optics Letters*, vol. 22, pp. 1905-1907, 1997.
- [4] A. Weigel, "Resolution in the ApoTome and the confocal laser scanning microscope: comparison", *Journal of Biomedical Optics*, vol. 14 (1), 014022, 2009.

- [5] A. Mazhar, "Structured illumination enhances resolution and contrast in thick tissue fluorescence imaging", *Journal of Biomedical Optics*, vol. 15 (1), 010506, 2010.
- [6] V. Gerstner, F. Hecht, R. Lange, and H. Bloos, "Assembly for increasing the depth discrimination of an optical imaging system", *Patent № US 6 819 415 B2 USA, Int. cl. G01B 9/00, G01B 11/24, G01C 3/08, H01J 3/14, G06K 9/36; assignee: Carl Zeiss Jena GmbH, Jena, Germany. Appl. № 10/089 878; filed Aug. 4, 2001; issued Nov. 16, 2004.*
- [7] L. Schafer, D. Schuster, "Methods and devices for images processing with higher harmonics of an illumination grating", *Patent № US 2008 0069467 USA, Int. cl. G02B 21/00; assignee: Carl Zeiss Imaging Solutions Jena GmbH, Jena, Germany. Appl. № 11/900 532; filed Sept. 12, 2007; issued Mar. 20, 2008.*
- [8] John D. Arbuckle, "Projection device for patterned illumination and microscopy", *Patent № US 2009 0147354 A1 USA, Int. cl. G02B 21/00, G02B 21/06; assignee: Quorum technologies inc. Appl. № 12/ 255 607; filed Oct. 21, 2008; issued Jun. 11, 2009.*
- [9] Hiroaki Nakayama, Yumiko Ouchi, "Structured illumination device and structured illumination microscope device", *Patent № US 2009 0147354 A1 USA, Int. cl. G02B 21/00, G02B 21/06; assignee: Nikon corporation. Appl. № 14/ 996 717; filed Jan. 15, 2016; issued Feb. 20, 2018.*
- [10] ZEISS Apotome 3: Product Info, Carl Zeiss Microscopy GmbH, 07745 Jena, Germany, Feb., 2020. [Online]. Available: https://asset-downloads.zeiss.com/catalogs/download/mic/e3af6c29-7d61-4cee-a563-6095486fb89a/EN_product-info_Apotome3_rel2-0.pdf
- [11] Olympus OptiGrid M: Brochure, Olympus Life Science Europe GmbH, 20034 Hamburg, Germany, Apr., 2009. [Online]. Available: <https://www.lri.se/pdf/olympus/optigriddM.pdf>
- [12] V. T. Vodniev, A. F. Naumovich, and N. F. Naumovich, *Main mathematical formulas*. Minsk: Vysheishaya shkola, 1988 [in Russian].
- [13] Z. Bian, C. Guo, S. Jiang et al., "Autofocusing technologies for whole slide imaging and automated microscopy", *Journal Biophotonics*, vol. 13:e202000227, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/jbio.202000227>
- [14] O. M. Vasyliiev, *Python programming*. Ternopil, Ukraine: Navchalna knyha – Bohdan, 2019 [in Ukrainian].
- [15] W. McKinney, *Python for Data Analysis*. Sebastopol, CA, US: O'Reilly Media, Inc., 2013.

V. M. Borovytsky, Dr. Tech. Sc., Professor,
e-mail: v.borovytsky@yahoo.com

V. I. Mykytenko, Dr. Tech. Sc., Professor,
e-mail: v.mikitenko@nil-psf.kpi.ua

O. Ye. Hudz, M. Eng.
e-mail: alexevgood@gmail.com

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Peremogy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

GENERALIZED DEMODULATION TECHNIQUE FOR OBTAINING THREE-DIMENSIONAL DIGITAL IMAGES AND ITS SOFTWARE IMPLEMENTATION

The paper proposes the complex technique of demodulation, which can be applied for obtaining three-dimensional digital images in optical microscopes. This technique allows to calculate the contrast of harmonic spatial modulation with arbitrary values of phase angles. The input data is a stack of digital images with harmonic spatial modulation. Three digital images with different phases of modulation obtained in the same focus position are processed to get one data set about the contrast distribution. This data makes possible to compose the three-dimensional images by selection of the

maximal values of the contrast in three-dimensional space. The paper contains the analytical solution of the system with three linear equations that helps to identify the principal parameters of harmonic spatial modulation, including its average value and contrast. As a result, the expression for contrast calculation is present in an analytical form. This expression is valid for any modulation phase angles that do not coincide. The paper contains the Python code of two functions, that illustrate the procedure of obtaining the three-dimensional images. This code demonstrates how to calculate the contrast and how to build the three-dimensional surface image as a composition of the contrast distribution map and the corresponding height map. This code can be improved for composing color three-dimensional surface images, color three-dimensional images in form of the image stacks or by application of the software packages for parallel computing. The advantage of the proposed technique is the possibility of using economic units to form a harmonious spatial modulation. These units can be installed on most optical microscopes with digital cameras and motorized focusing drives without purchasing expensive commercial software. It significantly reduces the price of transforming these optical microscopes into the instrument for obtaining digital three-dimensional images.

Keywords: *digital image processing, three-dimensional digital image, spatial modulation of lighting, optical microscope, demodulation.*

[0000-0002-3276-481X] **К. Є. Хавікова**, аспірантка,

e-mail: karina.havikova@gmail.com

[0000-0002-1404-7278] **А. В. Іванченко**, д-р техн. наук, професор

e-mail: ivanchenkodgtu@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет
Дніпробудівська вул., 2, м. Кам'янське, 51900, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ІЗ УТИЛІЗАЦІЄЮ ОСАДУ НА КОКСОХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Охарактеризовано стічні води коксохімічних підприємств. На ділянці біохімічного очищення ПРАТ «ЮЖКОКС», м. Кам'янське, проведено експеримент із очищенням стоків від політаннів глауконітом. Рекомендовано до впровадження запатентовану конструкцію флотатора з перегородками. Ефективність очищення від фенолів запропонованим способом становить 35,7 %, роданідів – 32,1 %, загального амоніаку – 57,2 %, смолистих речовин – 95,0 %. В лабораторних умовах показано можливість пролонгованої дії глауконіту з катіонним флокулянтном (до чотирьох циклів) з ефективністю вилучення фенолів до 50 % та смолистих речовин – до 95,37 %. Запропоновано механізм очищення стоків глауконітом з катіонним флокулянтном. При утилізації осаду з флотатора встановлено можливість використання технології геотекстильних контейнерів. В результаті досліджень зменшено показник зневоднення шламу з 92 % до 50 % вологості осаду. Проведено фізико-механічні дослідження при використанні глауконітового осаду як добавки до асфальтобетонної суміші в лабораторії ПП «Сегмент», м. Кам'янське. В результаті випробувань встановлено, що асфальтобетонна суміш з додаванням добавки глауконітового осаду відповідає вимогам ДСТУ БВ 27-119:2011 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови».

Ключові слова: коксохімічні стоки, політанти, глауконіт, флокулянт, флотація, осад, геотекстильні контейнери, асфальтобетонна суміш.

Вступ. Одним із важливих екологічних завдань сьогодення є очищення стічних вод від різних забруднювачів – екотоксикантів, одним із яких є фенол та його похідні, які потрапляють у воду зі стоками підприємств органічного синтезу і коксохімічних заводів. Підвищену небезпеку становлять хлорфеноли, які утворюються під час хлорування питної води і служать вихідними речовинами при утворенні діоксинів – групи трициклічних ароматичних сполук, віднесених до розряду найбільш високотоксичних стійких органічних забруднювачів, які мають мутагенні та канцерогенні властивості. Рідкі відходи виробництва, що містять феноли, відносять до II групи небезпеки і підлягають технологічному контролю. Феноли та ароматичні вуглеводні – високотоксичні сполуки, які чинять негативний вплив на живі організми [1].

Стічні води коксохімічного виробництва – небезпечний забруднюючий агент навколишнього середовища. Основним методом очищення стоків на цей момент є біохімічний, і він базується на переведенні розчинених фенолів у мінеральні сполуки за рахунок життєдіяльності мікроорганізмів активного мулу, які їх руйнують. Однак останнім часом концентрація фенолів, смолистих речовин та інших токсикантів на стадії механічного очищення не задовольняє вимогам гранично допустимого скидання (ГДС) [2]. Феноли та смоли не мають природних деструкторів і, передаючись по харчових ланцюгах, стають небезпечними для людини. Біологічне окиснення завищених концентрацій забруднюючих речовин є дуже складним процесом, який призводить до часткової загибелі мікроорганізмів [3]. На більшості діючих коксохімічних

підприємствах технологічний процес очищення промислових стоків проводять на біохімічній установці (БХУ) в дві стадії: механічній та біологічній. Водночас навантаження на споруди БХУ зростає, потрібний ступінь очищення не завжди досягається. Крім того, періодично виникають залпові скиди органічних токсикантів в результаті порушень технологічного процесу в цеху уловлювання хімічних продуктів коксування, що призводить до масової загибелі бактерій та активного мулу, додаткового розбавлення стоків технічною водою та збільшення собівартості очищення води. В результаті цього води, що використовуються для гасіння коксу, містять надмірну кількість токсичних сполук, які випаровуються в атмосферу та забруднюють навколишнє середовище продуктами хімічних перетворень і з дощовими водами потрапляють до водойм [1-3].

Існуючі методи очищення від органічних забруднювачів включають біологічні, фізичні, фізико-хімічні, хімічні та адсорбційні методи. Останні частіше застосовуються на стадіях доочищення і найбільш ефективні при використанні матеріалів з високою адсорбційною активністю. Крім того, адсорбція – досить простий технологічний процес і, на відміну від хімічних і біологічних методів, може бути реалізована при високих швидкостях потоку середовищ, що очищуються [4]. Очищення стічних вод природними сорбентами становить великий інтерес. Із загальної кількості можливих технологічних рішень щодо вилучення токсичних речовин органічного походження перспективним є застосування як сорбційного матеріалу природної глини – глауконіту. Суттєвими перевагами цього мінералу є: значне поширення, дешевизна, доступність, зерниста структура, термостійкість, хороші іонообмінні і фільтраційні властивості, а також можливість шляхом хімічного та структурного модифікування цілеспрямовано змінювати технологічні показники мінералу [5-7]. Застосування глауконіту дозволяє видалити із забруднених вод радіоактивні ізотопи (на 65-98 %), важкі метали Cu^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{3+} , Pb^{3+} , Sb^{3+} (94,8-100 %), Cr^{3+} , As^{3+} (33,6-33,8 %), ефективно очищувати

промислові стоки також від завислих речовин, поверхнево-активних речовин, гербіцидів, пестицидів, фенолів, текстильних барвників тощо. Ще однією особливістю застосування глауконіту є його пролонгована дія та максимально низький відсоток десорбції (2-8 %). Застосування глауконіту прискорює очищення при перевищенні ГДК забруднюючих агентів, захищає мікроорганізми активного мулу від впливу шкідливих речовин [1, 8-11].

Для інтенсифікації вилучення з води речовин механічним методом (флотаційним) на коксохімічних підприємствах застосовують флокуляцію. При додаванні органічних флокулянтів, таких як поліакриламід, агрегація колоїдних і дрібнодисперсних частинок в крупні пластівці відбувається в результаті адсорбції макромолекул флокулянта одночасно на декількох частинках і зв'язування їх полімерними містками. При флокуляції важливу роль відіграє оптимальна витрата флокулянта, тому що при малих і великих кількостях флокулянта може спостерігатися дестабілізація дисперсної системи. При незначній концентрації флокулянта у воді недостатньо макромолекул для зв'язування твердої фази під флокули, а при надмірній – утворюється просторова сітка асоційованих молекул полімеру, що перешкоджає зближенню і агрегації частинок. Переробка утворених осадів з вилученням цінних компонентів дозволяє здійснювати їх утилізацію [12-13].

Хімічний склад глауконіту Адамівського родовища Хмельницької області встановлено на рентгенівському спектрометрі «Elvax», % мас.: SiO_2 – 64,73; TiO_2 – 0,16; Al_2O_3 – 7,72; Fe_2O_3 – 12,54; FeO – 0,54; MnO – 0,01; CaO – 2,92; MgO – 2,16; K_2O – 5,0; Na_2O – 1,79; P_2O_5 – 2,43. Хімічний склад відповідає алюмосилікатному матеріалу з високим вмістом оксидів феруму [1].

Проектна продуктивність БХУ становить 200 м³/год, враховуючи зливові води, – 220 м³/год. Кількість технологічних ліній (черг): за проектом – 2 [14]. Усереднені дані якості вихідних фенольних стічних вод, що надходять на БХУ коксохімічного підприємства, наведено в таблиці 1 [1].

Таблиця 1 – Усереднені дані якості вихідних фенольних стічних вод, що надходять на БХУ коксохімічного підприємства

Показники якості стоків	Одиниці вимірювання	Нормативні значення (проектні)	Фактичні значення
Феноли	мг/дм ³	415	962
Роданіди	мг/дм ³	400	943
Амоніак леткий	мг/дм ³	250	166
Амоніак загальний	мг/дм ³	960	1200
pH	-	8	7,9
Смоли та масла	мг/дм ³	25	300
Гідроген сульфід	мг/дм ³	100	100
Ціаніди	мг/дм ³	30	30
Хлориди	мг/дм ³	1640	1640
Сульфати	мг/дм ³	1480	1480
ХПК	мгО ₂ /дм ³	2500	2900

Технологічну схему очищення стічних вод на ПРАТ «ЮЖКОКС», м. Кам'янське, зображено на рисунку 1 [1, 14].

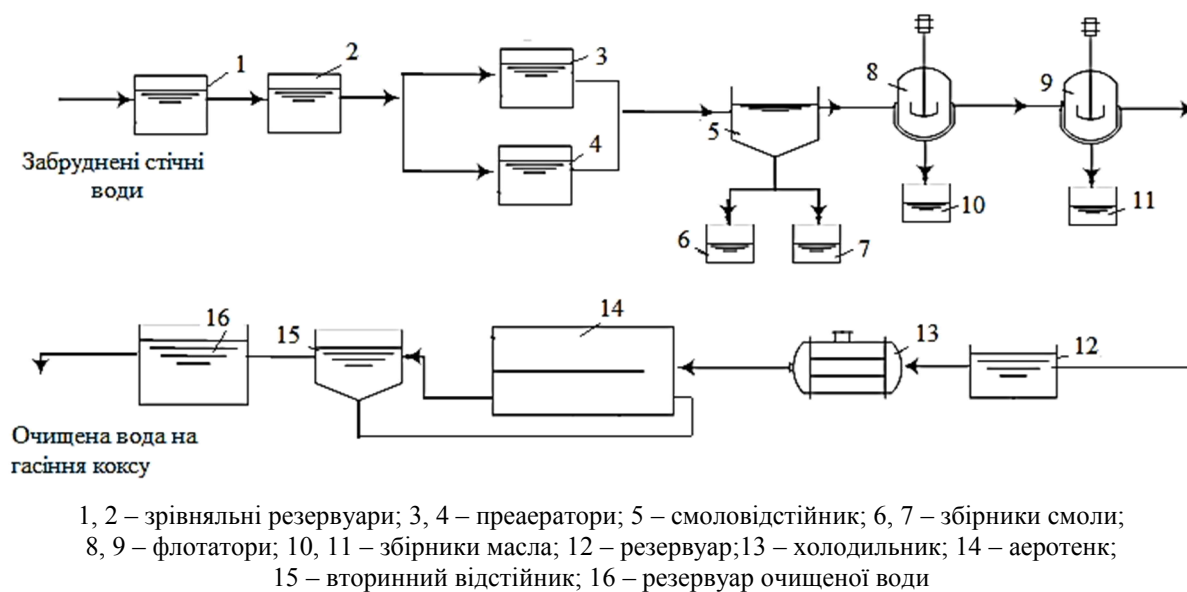


Рисунок 1 – Технологічна схема очищення стічних вод на ПРАТ «ЮЖКОКС»

Застосування флотаційних методів очищення стічних вод, в яких використовують барботажний, пневмомеханічний, електрохімічний та інші способи видалення політантів, знижує ступінь забруднення стоків до ГДК. Флотаційні споруди складаються з камери флотації і допоміжного обладнання. За формою камери флотації бувають прямокутні або круглі, глибиною не більше 3 м. Усередині камери розміщені пристрої розподілу стічної води, що надходить на очищення, та водоповітряної суміші, напрямні перегородки,

пристрої для підтримання сталості положення рівня води в споруді, збору і видалення осаду та флотошлему.

До складу допоміжного устаткування входить установка для насичення води повітрям при надмірному тиску 0,3-0,6 МПа. Частина потоку очищеної води під тиском подається в напірний бак (сатуратор). Туди ж компресором подають повітря. Виділяються бульбашки повітря, які утворюють з забрудненнями флотокомплекси, які спливають на відкриту поверхню флотатора. Спливна маса безпе-

первно видаляється механізмами для згрібання піни в пінозбірник. Застосування флотації на механічній стадії перед повним біологічним очищенням на коксохімічних заводах дозволяє істотно поліпшити показники якості стічної води. Серед інших споруд при очищенні фенольної води, наприклад смолозбірників, флотатори відрізняються більшою ефективністю, меншими розмірами, технологічною гнучкістю і керованістю. Найбільш широко в процесах очищення стічних вод використовується флотація. Вона дозволяє очищати стічні води з концентрацією суспензій до 4-5 г/дм³. Для збільшення ступеня очищення в воду додають флокулянти [15-18].

В процесі очищення стічних вод утворюється осад, що містить більше 95 % води. Осад являє собою суспензію, що виділяється в процесі механічної, біологічної та фізико-хімічної обробки стічних вод.

При механічному зневодненні осаду використовується спеціальне обладнання: фільтр-преси, шнекові дегідратори і центрифуги різної конструкції.

При зневодненні шламу методом центрифугування осад проходить через решітку з малими отворами, надходить в аерований резервуар, далі насосом через подрібнювач направляється в центрифугу. Порошкоподібний флокулянт подається в диспергатор, далі розчин дозріває в баку, а потім розбавляється і дозатором подається на вхід центрифуги. Кек насосами або транспортерами відправляється на вивезення, фугат відкачують на очисну станцію. У центрифугу флокулянт вводять у вхідну трубу або прямо в ротор, щоб уникнути руйнування флокул осаду в момент зіткнення струменя осаду з обертовим об'ємом рідини в роторі [17].

На стрічкових фільтрпресах рідкий підготовлений осад розподіляється на стрічці за рахунок фільтрації вільної води і утворює пастоподібний шар, який затискається при сходженні стрічок. Далі обидві стрічки направляються на фільтруючі перфоровані барабани, на яких під дією сил кручення відбувається віджимання води. Підготовлений таким чином осад віджимається на валках з поступовим зростанням сил тиску.

Камерні фільтрпреси – апарати циклічної дії, що базуються на фільтруванні осаду під тиском через фільтрувальне полотно з порами 10-300 мкм. Камери фільтра можуть

бути підвішені горизонтально або вертикально. Для отримання кеку низької вологості застосовують надувні мембрани, що віджимають осад під великим тиском (до 15-20 бар). У первісному положенні плити розсунуті, поверх камер розташоване промите і підготовлене фільтрувальне полотно. Потім камери зсуваються і герметизуються, і через центральний канал подається осад в простір між камерами. На полотнах утворюється шар намитого осаду, фільтрат по окремих каналах відводиться з міжкамерного простору. Після цього під мембрану підводиться стиснене повітря, мембрана надувається і віджимає осад, затиснутий між фільтруючими полотнами. Далі скидається тиск, камери розсуваються і сформований пласт осаду відривається від полотна і падає на транспортер. Однак механічне зневоднення має низку недоліків: циклічний режим роботи; знижується витрата доданого осаду протягом циклу; високі експлуатаційні витрати (електроенергія, запчастини, техобслуговування); необхідність участі оператора; складність обслуговування системи; підвищені інвестиції.

При компостуванні осадів міських стічних вод в їх складі в значній кількості містяться аеробні термофільні бактерії. Високий вміст органічних речовин в осадах створює сприятливі умови для їх розвитку, швидкість окиснення забруднень збільшується, а оскільки окиснення супроводжується виділенням енергії у вигляді теплоти, то осад поступово розігрівається, внаслідок чого процес аеробної стабілізації посилюється. Масу осаду доводиться перемішувати, оголюючи внутрішні шари і створюючи тим самим умови для продовження аеробного термогенеза. Така проста, але багатоступенева технологія застосовується все рідше.

Економічність процесу спалювання осаду базується на підтримці автотермічного режиму, в якому тепло від спалювання органічної частини осаду покриває втрати на випаровування. Автотермічний режим впроваджується при вологості осаду не більше 75 % і зольності не вище 35 %. Недоліками зазначених установок є висока вартість (порівнянна з вартістю центрифуг) і висока споживана потужність [16].

На коксохімічних підприємствах в процесі біохімічного очищення фенольних стіч-

них вод утворюється осад, що містить смоли, масла і зважені речовини, які утворюються в процесі відстоювання води на стадії механічного очищення. Зневоднення осадів на коксохімічних заводах призначене для отримання кеку вологістю 50-80 % і здійснюється в основному сушінням осадів на мулових майданчиках. Ефективність такого процесу низька через дефіцит земельних ділянок у промислових районах і забруднення повітряного середовища.

Перспективність методу зневоднення осаду за допомогою технології геотекстильних контейнерів полягає в статичному зневодненні, фільтрації рідкої фази осаду через стінки контейнерів з полімерної фільтруючої тканини, які розташовані на спеціально підготовленому дренажному майданчику. Перед подачею в контейнери осад обробляється спеціальними добавками: полімерним флокулянт або коагулянт – для підвищення ефективності фільтрації. На рисунку 2 представлено геотекстильні контейнери з полімерної тканини [17].

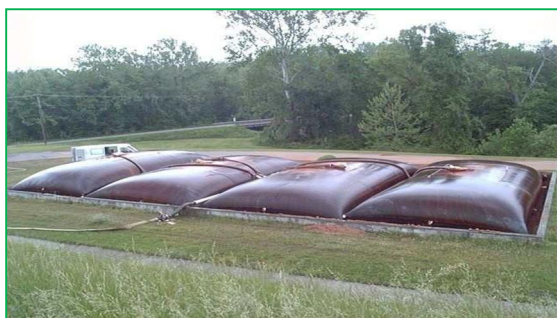


Рисунок 2 – Геотекстильні контейнери з полімерної фільтруючої тканини

Етапи зневоднення за технологією геотекстильних контейнерів:

1. Наповнення суспензією шламу.
2. Зневоднення: фільтрація вільної води через стінки контейнера, значне зменшення обсягу.
3. Консолідація: вихід парової води через стінки; сушка отриманого осаду.

До остаточної консолідації може проводитися кілька сесій «наповнення-зневоднення» (рисунок 3).



Рисунок 3 – Етапи «наповнення-зневоднення» за технологією геотекстильних контейнерів

Таким чином, зневоднення осаду за допомогою геотекстильних контейнерів з подальшим транспортуванням добавки та переробкою її при додаванні до асфальтобетонної суміші має наукову новизну, перспективність утилізації осаду при очищенні коксохімічних стоків від поллютантів з можливістю зниження антропогенного навантаження на навколишнє середовище.

Мета дослідження. Удосконалення технології очищення коксохімічних стоків з подальшою утилізацією осаду на асфальтобетонних підприємствах.

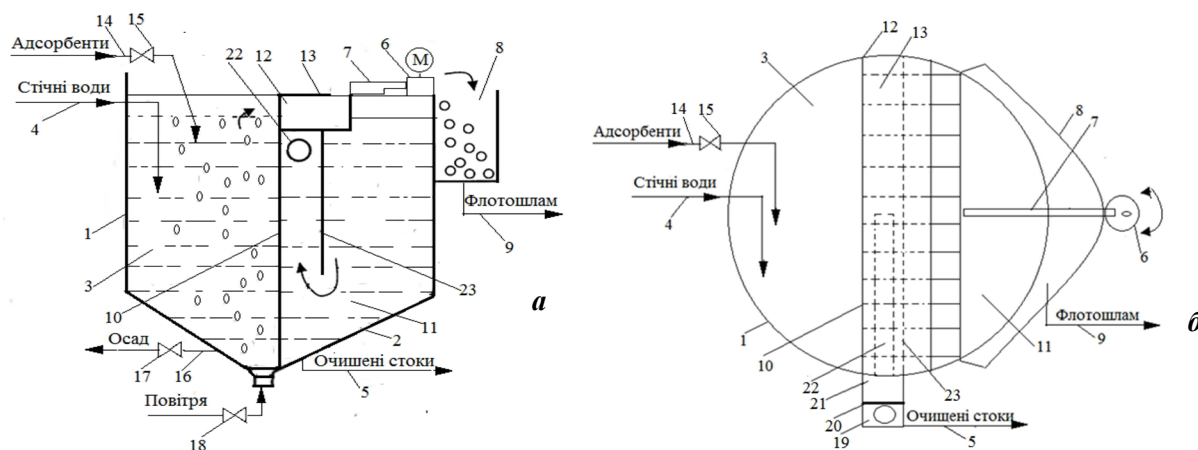
Для цього нами було поставлено наступні задачі:

- визначити ефективність адсорбції коксохімічних стоків від фенолів, роданідів, смолистих речовин та загального амоніаку глауконітом в поєднанні з катіонним флокулянт в промислових умовах;
- отримати дані пролонгованої дії глауконітового мінералу при очищенні коксохімічних стоків від поллютантів до чотирьох циклів по 20 хв в лабораторних дослідженнях;
- запропонувати механізм очищення стоків глауконітом від фенолів в поєднанні з катіонним флокулянт;
- запропонувати технологію утилізації глауконітового осаду за допомогою геотекстильних контейнерів;
- провести випробування в лабораторних умовах глауконітового осаду як добавки до асфальтобетонної суміші.

Виклад основного матеріалу. Очищена вода, яка надходить на флотацію, пройшовши смоловідстійники, містить залишкову кількість частинок смол, масел та інших зважених речовин, що знаходяться в дисперсному стані. Ці частинки не осідають і не спливають через малі розміри. Тому для підвищення ефективності процесу флотації нами запропоновано удосконалити технологію адсорбційного очищення промислових стоків від полутантів глауконітовою глиною Адамівського родовища (Хмельницької області) в поєднанні з 0,1 %

розчином катіонного флокулянта поліакриламід. Рекомендовано до впровадження запатентовану конструкцію флотатора з перегородками [19]. В результаті у флотаторі утворюються укрупнені часточки, сфлотовані дрібними бульбашками повітря, які, спливаючи, виносяться на поверхню з піною, що обертотним скребком згрібається в лоток, з якого потрапляє в збірники смоли і масел.

На рисунку 4 зображено схему флотатора в перерізі (а) та вид зверху (б).



1 – циліндричний корпус, 2 – днище, 3 – центральна флотаційна камера, 4 – впускна труба, 5 – зливна труба, 6 – скребок, 7 – лопать, 8 – приймальний карман, 9 – труба для відведення пінної маси, 10 – розділова перегородка, 11 – камера сепарації, 12 – розподільник потоку, виконаний в вигляді блоку прямокутних каналів, 13 – обмежувальна пластина, 14 – вхідний патрубков, 15 – дозатор для подачі адсорбенту, 16 – вихідний трубопровід, 17 – регулюючий клапан для відведення осаду, 18 – нагнітач повітря, 19 – зливний карман, 20 – гребінчаста перегородка, 21 – вільний простір, 22 – трубопровід для виведення очищених стоків, 23 – занурювальна перегородка

Рисунок 4 – Схема флотатора в перерізі (а) та вид зверху (б)

Методика та загальні етапи експериментів. Визначення амоній-іонів, роданідів та фенолів у рідких відходах здійснювали фотокolorиметричним методом на спектрофотометрі КФК-2. Масову концентрацію смолистих речовин визначали при довжині хвилі 400 нм із застосуванням петролейного ефіру як екстрагенту (межа виявлення – 3 мг/дм³). Вміст фенолу та його гомологів оцінювали зазначеним методом з 4-аміноантипірином у присутності калій гексацианоферрату при рН 10,3±0,2 при довжині хвилі 540 нм. Межа виявлення – 0,05 мг/дм³. Масову концентрацію роданід-іонів (SCN⁻) вимірювали із використанням ферум (III) хлориду при довжині хвилі 440 нм за відомою методикою. Межа

виявлення – 0,2-0,4 мг/дм³. Загальний амоніак у зразках стічних вод встановлювали з реактивом Несслера при рН 10,3±0,2 при довжині хвилі 420 нм за відомою методикою. Межа виявлення – 0,05 мг/дм³ [20].

Як флокулянт застосовано товарний катіонний Extraflock P 70 на основі поліакриламід виробництва ВАТ ПХЗ «Коагулянт» (ТУ У 24.1-19155069-014-2011).

На БХУ ПРАТ «ЮЖКОКС», м. Кам'янське, нами проведено експеримент із очищенням коксохімічних стоків у промислових умовах та завезено глауконіт Адамівського родовища (Хмельницької області) у кількості 440 кг на 220 м³ стічних вод з розрахунку 2 г адсорбенту на 1 дм³ фенольної води, яка

подається в напірний флотатор. Тривалість очищення становила 20 хв, кількість циклів – шість. За один цикл оброблено 37 м^3 стоків.

Експеримент полягав у наступному: очищена вода, що надходить на флотацію, пройшовши смолівідстійники, містить залишкову кількість фенолів, роданідів, амоніаку, часточок смол і масел, які знаходяться в дисперсному стані. Тому для підвищення ефективності процесу флотації на всас насосів через інжектор подається повітря, дозується флокулянт згідно із затвердженими нормами (поліакриламід з розрахунку 1 г чистого продукту на 1 м^3 стічної води, готується $0,1 \%$ концентрації і дозується: 40% у преаератори та по 30% у флотатори). Фенольна вода з флокулянтном і повітрям в напірних баках перемішується, стискається до 4 кгс/см^2 і надходить у нижню частину флотатора через форсунки водорозподільного пристрою, а до флотаційної камери дозується 440 кг мінерального глауконіту з розрахунку 2 г на 1 дм^3 об'єму напірного флотатора.

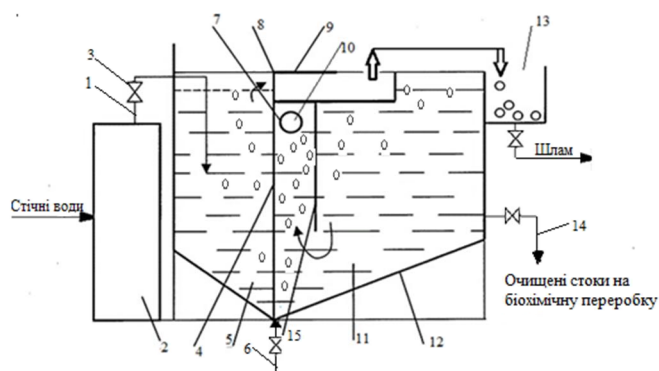
В результаті у флотаторі утворюються укрупнені часточки, сфлотовані дрібними бульбашками повітря, які, спливаючи, виносяться на поверхню з піною, що обертовим скребком згрібається в лоток, з якого потрапляє в збірники смоли і масел.

Вихідні дані. Випробування проводили при температурі фенольної стічної води 20°C , початковому вмісті фенолів – 510 мг/дм^3 , роданідів – 475 мг/дм^3 , загального амоніаку – 1192 мг/дм^3 і смолистих речовин – 300 мг/дм^3 . Через 20 хв відбирали проби сфлотованої рідини для визначення залишкової концентрації поллютантів. Дані випробування зображено на рисунку 5.

Для проведення наступного експерименту з пролонгованої дії глауконітового мінералу зібрано лабораторну установку (рисунк 6). З флотатора відібрано рідкі відходи, що взаємодіяли з природним глауконітом в поєднанні з $0,1 \%$ катіонним флокулянтном дозами 2 г/дм^3 при додаванні нової порції коксохімічних стоків до чотирьох циклів по 20 хв.

Коксохімічні стоки через трубопровід 1 надходять до флотаційної камери 5. Водночас флотаційна камера має вхідний патрубок, оснащений дозатором для подачі адсорбентів та флокулянтів через дозувальний пристрій 3.

Шламовий карман 13 виконано кільцевим ззовні циліндричного корпусу і укомплектовано трубою для відведення пінної маси. В центральній флотаційній камері 5 розміщена розділова перегородка, яка відокремлює від неї камеру сепарації 11, в якій на виході із центральної флотаційної камери 5 встановлений розподільник потоку 8, що примикає до верхньої частини розділової перегородки і виконаний у вигляді блоку прямокутних каналів, закритого зверху обмежувальною пластиною 9. В днищі флотаційної камери 5 встановлений нагнітач повітря 6, а днище камери сепарації 11 має зливний карман 14, в якому встановлена гребінчаста перегородка з утворенням вільного простору між нею і стінкою камери сепарації 11 [13].



- 1, 7, 14, 16 – трубопроводи; 2 – бак стічної води;
3 – вентиль; 4 – розподільча перегородка;
5 – камера флотації; 6 – нагнітач повітря; 8 – розподільник потоку; 9 – обмежувальна пластина;
10 – вікно; 11 – камера сепарації; 12 – флотатор;
13 – шламовий карман; 14 – зливний карман;
15 – завантажувальна перегородка

Рисунок 6 – Установка для флотаційного очищення

Вихідні дані. Дослідження проводили при температурі фенольної стічної води 20°C , початковому вмісті фенолів – $221,47 \text{ мг/дм}^3$, смолистих речовин – 205 мг/дм^3 . Через кожні 20 хв відбирали проби сфлотованої рідини для визначення залишкової концентрації фенолів, смол та масел. Результати експериментальних випробувань наведено у таблиці 2.

Запропонований механізм очищення від поллютантів зображено на рисунку 7.

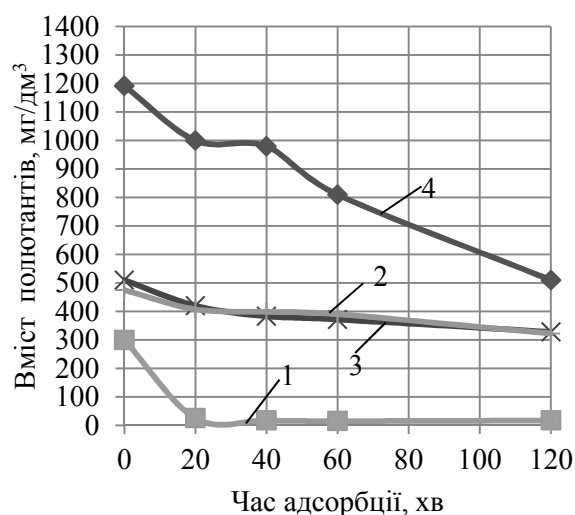
В роботі зі зневодненням осаду початкова вологість його у фенольній воді становила 92% . Після зневоднення за технологією гео-

текстильних контейнерів осад мав тверду або желеподібну консистенцію, придатну для вантаження і транспортування. На рисунках 8 і 9 представлено осад до фільтрації та фільтрацію в геотекстильному мішку протягом 10 днів. Вологість становила до 50 % (рисунок 10).

Зневоднений осад досліджено на підприємстві ПП «Сегмент» при додаванні його як добавки до асфальтобетонної суміші згідно з ДСТУ БВ 27-319:2016 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань».

Результати досліджень і їх обговорення. Дослідження відібраних проб сфлотованої рідини для визначення залишкової концентрації поллютантів із промислових рідких відходів підприємства ПРАТ «ЮЖКОКС» в інтервалі часу 20-120 хв показали ефективність очищення від фенолів – 35,7 %, роданідів – 32,1 %, загального амоніаку – 57,2 %, смоли і масла – 95,0 %. Дані випробування зображено на рисунку 5.

Як бачимо з рисунка 5, при проведенні експерименту досягнуто ГДК фенолів (не більше 415 мг/дм³, роданідів (не більше 400 мг/дм³), загального амоніаку (не більше 960 мг/дм³) та смолистих речовин (не більше 25 мг/дм³) перед стадією біологічного очищення.



1 – смолисті речовини, 2 – роданіди,
3 – феноли, 4 – загальний амоніак

Рисунок 5 – Залежність залишкової концентрації фенолів, роданідів, смолистих речовин та загального амоніаку від тривалості контактування глауконіту витратою 2 г/дм³ із рідкими відходами

Наступні дослідження для визначення залишкової концентрації фенолів, смол та масел зі сфлотованої рідини в результаті пролонгованої дії адсорбентів глауконіту та катіонного флокулянта проводили з додаванням нових порцій рідких відходів до чотирьох циклів по 20 хв. Результати експериментальних випробувань представлено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати випробування методу очищення стічних вод від фенолів та смолистих речовин із використанням глауконітової глини з катіонним флокулянтном

Доза		Інтервал часу, хв	Вихідний вміст, мг/дм ³		Залишковий вміст, мг/дм ³		Ефективність очищення, %	
глауконіту, г/дм ³	флокулянта, %		фенолів	смол і масел	фенолів	смол і масел	фенолів	смол і масел
2	30	20	221,47	205	156,88	16	29,16	92,2
2	30	20	221,47	205	129,19	18,5	41,67	90,98
2	30	20	221,47	205	110,74	9,5	50	95,37
2	30	20	221,47	205	110,74	12	50	94,15

Отримані дані з таблиці 2 показують, що при флотації фенольної стічної води із застосуванням глауконіту з катіонним флокулянтном спостерігається ефективне очищення від фенолів та смол і масел. При проведенні процесу досягнуто ГДК фенолів перед стадією біохімічного очищення з ефективністю вилучення до 50 % та смолистих речовин – до

95,37 % після повторного застосування глауконітового мінералу з додаванням нових порцій коксохімічних стоків з циклічністю по 20 хв.

Передбачуваний економічний ефект від впровадження становить 503 872,3 грн/рік і досягається за рахунок розміру відшкодування збитків, заподіяних державі внаслідок пе-

ревищення скидів фенолів та інших забруднюючих речовин з промисловими стічними водами.

Запропонований механізм очищення стоків глауконітом в поєднанні з катіонним флокулянтм зображено на рисунку 7.

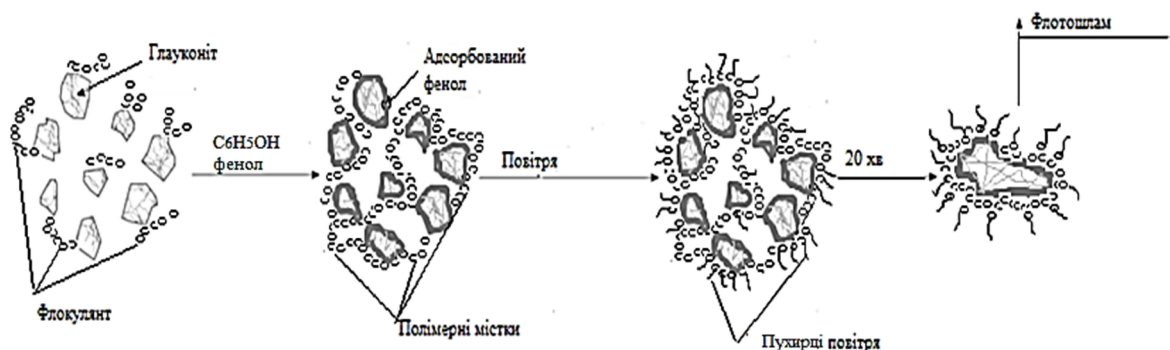


Рисунок 7 – Запропонований механізм очищення стоків глауконітом від фенолів в поєднанні з катіонним флокулянтм

З рисунка 7 зроблено припущення з механізму вилучення фенолів у процесі очищення фенольних стоків, яке полягає в тому, що частина внутрішньо-молекулярних сил глауконітового мінералу не врівноважена взаємодією з розташованими в порожнині таких шарів іонами хімічних речовин, що містяться в рідких відходах органічного походження. В результаті вони скупчуються на активних поверхнях пластиночок, складових загального кристалу, а площа активної поверхні значно збільшується, в результаті відбувається адсорбція колоїдних часточок поллютантів і повільне спливання їх на поверхню рідини з флотошламом.

Флокулянт підвищує швидкість осадження пластівців, з'єднуючи своїми полімерними містками молекули сорбенту між собою, спостерігається укрупнення (злиття) дисперсних частинок. В результаті відмічено помітне освітлення фенольної води. Рекомендована оптимальна доза глауконітової глини – 2 г/дм³ з додаванням регламентованого 0,1 % розчину поліакриламідю з розрахунку 30 % від об'єму флотатора (0,2 кг/м³). Експериментально встановлено, що таке співвідношення доз адсорбентів є найбільш економічно доцільним з точки зору технологічного впровадження.

В експерименті зі зневодненням осаду на рисунках 8 і 9 представлено глауконітовий осад до фільтрації та фільтрацію в геотекстильному мішку протягом 10 днів.



Рисунок 8 – Осад до фільтрації



Рисунок 9 – Фільтрація в геотекстильному мішку протягом 10 днів

В роботі знижено вологість глауконітового осаду з 92 % до 50 % (рисунок 10).

Зневоднений осад досліджено на підприємстві ПП «Сегмент» при додаванні його як добавки до асфальтобетонної суміші згідно з ДСТУ БВ 27-319:2016 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань». Результати експериментів наведено в таблицях 3-5.

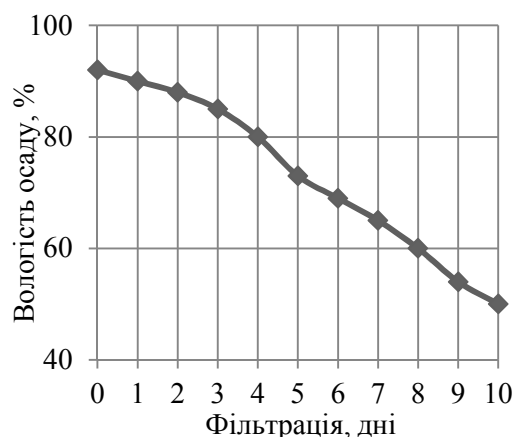


Рисунок 10 – Крива залежності вологості осаду від фільтрації в геотекстильному мішку

Таблиця 3 – Фактичні значення показників випробування зразків з добавкою глауконітового осаду в асфальтобетонну суміш типу Б, марки ІІ, БНД 60/90

Найменування показників	Норма за НД	Результати випробувань	Відповідність з добавкою
Розміри зразків фактичні, мм	71,4x71,4	71,4x71,4	71,4x71,4
Середня густина, г/см ³	не нормується	2,21	2,21
Водонасичення, %, не більше	3,5	1,9	2,1
Коефіцієнт ущільнення, не менше	0,98	1,00	1,00
Межа міцності при стиску, МПа			
За температурою: 20°C, не менше	2,6	3,1	2,8
50°C, не менше	1,3	1,4	1,3
Орієнтовний вміст в'язучого, % за масою мінеральної частини	5,5–7,0	6,0	6,0

Таблиця 4 – Фактичні значення показників випробування зразків з добавкою глауконітового осаду в асфальтобетонну суміш типу Б, марки І, БНД 60/90

Найменування показників	Норма за НД	Результати випробувань	Відповідність з добавкою
Розміри зразків фактичні, мм	71,4x71,4	71,4x71,4	71,4x71,4
Середня густина, г/см ³	не нормується	2,22	2,22
Водонасичення, %, не більше	3,5	1,9	2,01
Коефіцієнт водостійкості, не менше	0,88/0,84	0,85	0,84
Межа міцності при стиску, МПа			
За температурою: 20°C, не менше	2,8	3,1	2,9
50°C, не менше	1,4	1,4	1,45
Орієнтовний вміст в'язучого, % за масою мінеральної частини	5,5–7,0	6,0	6,0

Таблиця 5 – Фактичні значення показників випробування зразків з добавкою глауконітового осаду в асфальтобетон дрібнозернистий, щільний піщаний типу Г, марки ІІ, БНД 60/90

Найменування показників	Норма за НД	Відповідність з добавкою
Середня густина, г/см ³	не нормується	2,2
Водонасичення, % за об'ємом, не більше	3,5	3,3
Коефіцієнт ущільнення, не менше	0,98	1,0
Границя міцності при стиску, МПа		
За температурою: 20°C, не менше	2,6	2,61
50°C, не менше	1,5	1,51
Орієнтовний вміст в'язучого, % за масою мінеральної частини	0,86–0,82	0,85

Як видно з таблиць 3-5, при отриманні фактичних значень показників випробування зразків з добавкою глауконітового осаду в асфальтобетонну суміш типу Б, марки ІІ; типу Б марки І; типу Г, марки ІІ, БНД 60/90 результати випробувань відповідають вимогам нормативної документації.

Висновки. Рекомендована оптимальна доза глауконітової глини – 2 г/дм^3 з додаванням регламентованого 0,1 % розчину поліакриламідів з розрахунку 30 % від об'єму флотатора ($0,2 \text{ кг/м}^3$). Експериментально встановлено, що таке співвідношення доз адсорбентів є найбільш економічно доцільним з точки зору технологічного впровадження. В результаті комплексного очищення промислових рідких відходів підприємства ПРАТ «ЮЖ-КОКС» в інтервалі часу 20-120 хв ефективність очистки від фенолів становила 35,7 %, роданідів – 32,1 %, загального амоніаку – 57,2 %, смоли і масла – 95,0 %.

Таким чином, удосконалена технологія дозволяє не перевищувати нормативні вимоги до поллютантів та не призводить до масової загибелі бактерій і активного мулу. Пролонгована дія сорбенту дає можливість скорочувати циклічність процесу за допомогою запатентованої флотаційної установки до 18 циклів на добу з передбачуваним економічним ефектом. При проведенні процесу досягнуто ГДК фенолів перед стадією біохімічного очищення з ефективністю вилучення до 50 % та смолистих речовин – до 95,37 %.

Запропоновано механізм очищення поллютантів глауконітовим мінералом в поєднанні з флокулянтами, за допомогою якого відбуваються процеси адсорбції, флокуляції та флотації у флотаторі з перегородками, зі зниженням концентрації поллютантів та помітним освітленням води.

В роботі зі зневодненням осаду знижено його вологу з 92 % до 50 % за допомогою технології геотекстильних контейнерів.

Глауконітовий осад випробувано як добавку до асфальтобетонної суміші та встановлено фізико-механічні показники, які показали, що асфальтобетонна суміш з добавкою відповідає вимогам ДСТУ БВ 27-119:2011 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови» та може бути рекомендована до промислового впровадження на асфальтобетонних заводах.

Список використаних джерел

- [1] К. Є. Хавікова, та А. В. Іванченко, "Удосконалення технології очищення стічних вод коксохімічного виробництва із використанням глауконіту", на *VII Міжнар. наук.-практ. конф. Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти*, (25-26 листоп. 2021 р.). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021, с. 199-203.
- [2] А. В. Іванченко, О. А. Дупенко, и Н. Д. Волошин, "Воздействие карбамида на биологическое удаление фенолов из сточных вод коксохимического предприятия". *Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті*, № 1 (16), с. 50-58, 2015.
- [3] К. Є. Хавікова, А. В. Іванченко, Н. П. Макаренко, та В. Ю. Кузьменко, "Дослідження технології адсорбційного вилучення фенолів та роданідів з рідких відходів коксохімічного виробництва", *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*, т. 31 (70), № 2, с. 24-28, 2020.
doi: 10.32838/2663-5941/2020.2-2/.
- [4] А. В. Іванченко, та К. Є. Хавікова, "Дослідження процесу вилучення фенолів та смолистих речовин з промислових рідких відходів коксохімічного підприємства методом адсорбції", *Екологічна безпека КНУ ім. М. Остроградського*, № 2, с. 32-38, 2018.
- [5] К. Є. Хавікова, та А. В. Іванченко, "Обгрунтування екологічно безпечного методу переробки фенольних стічних вод", на *III Всеукр. наук.-практ. конф. Актуальні проблеми сучасної хімії*, (24 трав. 2019 р.) Миколаїв: НУК ім. адм. Макарова, 2019, с. 218-222.
- [6] I. Klymenko, D. Yelatontsev, A. Ivanchenko, O. Dupenko, and N. Voloshyn, "Developing of effective treatment technology of the phenolic wastewater", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 10 (81), pp. 29-34, 2016.
doi: 10.15587/1729-4061.2016.72410.
- [7] Л. Н. Исаева, Ю. В. Тамаркина, Д. В. Бован, и В. А. Кучеренко, "Адсорбция фенола активными углями, полученными термоллизом бурого угля с гидроксидом калия", *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 1, pp. 25-32, 2009.

- [8] Н. С. Голубева, О. В. Беляева, Н. В. Гора, и Е. С. Великанова, "Кинетика извлечения фенола из водных сред углеродными сорбентами", *Техника и технология пищевых производств*, № 2, с. 4, 2012.
- [9] E. Yakub, S. E. Agarry, F. Omoruwou et al., "Comparative study of the batch adsorption kinetics and mass transfer in phenol-sand and phenol-clay adsorption systems", *Particulate Science and Technology*, no. 1, pp. 1-11, 2019.
doi: <https://doi.org/10.1080/02726351.2019.1616862>.
- [10] A. Mandal, B. B. Dey, and S. K. Das, "Thermodynamics, kinetics, and isotherms for phenol removal from wastewater using red mud", *Water Practice and Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 705-722, 2020.
doi: <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.056>.
- [11] A. Gładysz-Płaska, "Application of modified clay for removal of phenol and PO_4^{3-} ions from aqueous solutions", *Adsorption Science Technology*, vol. 35, no. 7-8, pp. 692-699, 2017.
doi: [10.1177/0263617417704774](https://doi.org/10.1177/0263617417704774).
- [12] А. П. Карманов, и И. Н. Полина, *Технология очистки сточных вод*: учеб. пособ. Сыктывкар, Россия: СЛИ, 2015. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>.
- [13] А. В. Иванченко, К. Є. Хавікова, та М. Д. Волошин, "Седиментаційний аналіз дисперсної фази при очищенні фенольних стічних вод коксохімічного виробництва глауконітом", *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, вип. 2 (37), с. 93-100, 2020.
doi: [10.31319/2519-2884.37.2020.17](https://doi.org/10.31319/2519-2884.37.2020.17).
- [14] Технологический регламент биохимической очистки сточных вод в цехе по энерго- и водообеспечению. ПАО ЄВРАЗ "БАГЛЕЙ КОКС". Днепродзержинск, 2013.
- [15] М. О. Мчедлов-Петросян, В. І. Лебідь, О. М. Глазкова та ін., *Колоїдна хімія*. Харків, Україна: Фоліо, 2005.
- [16] Л. Ф. Долина, и П. Б. Машихина, *Осадки сточных и питьевых вод: проблемы и решения*. ДНУЖТ: Континент, 2014.
- [17] К. Є. Хавікова, та А. В. Иванченко, "Зневоднення шламів коксохімічних підприємств за допомогою технології Геотуб", in *Proc. 8th Int. Sci. and Pract. Conf. Fundamental and applied research in the modern world*, (March 17-19, 2021). Boston, USA: BoScience Publisher, 2021, pp. 968-977.
- [18] A. Ivanchenko, K. Khavikova, and A. Trukilo, "Mathematical modeling of the processes of wastewater purification from phenols and rhodanides using glauconite", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 4, pp. 111-116, 2020.
doi: [10.33271/nvngu/2020-4/111](https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/111).
- [19] А. В. Иванченко, та К. Є. Хавікова, "Флотатор", *пат. 144400 Україна. МПК B03D 1/14, C12M 1/09. № у 2021 00597*; заявл. 12.02.2021; опубл. 02.06.2021, Бюл. № 22.
- [20] В. М. Карасов, и Е. К. Дербышева, *Очистка сточных вод коксохимических предприятий*. Екатеринбург, Россия: Полиграфист, 2003.

References

- [1] K. Ye. Khavikova, and A. V. Ivanchenko, "Improvement of the technology of treatment of coke production wastewater using glauconite", in *Proc. VII Int. Sci. and Pract. Conf. Clean water. Fundamental, applied and industrial aspects*, (Nov. 25-26, 2021). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2021, pp. 199-203 [in Ukrainian].
- [2] A. V. Ivanchenko, O. A. Dupenko, and N. D. Voloshin, "The effect of urea on the biological removal of phenols from the wastewater of a coke plant", *Voda i vodo-ochysni tekhnologii. Naukovo-tekhnichni visti*, no. 1 (16), pp. 50-58, 2015 [in Russian].
- [3] K. Ye. Khavikova, A. V. Ivanchenko, N. P. Makarchenko, and V. Yu. Kuzmenko, "Research of technology of adsorption extraction of phenols and rhodanides from liquid wastes of coke production", *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho*, vol. 31 (70), no. 2, pp. 24-28, 2020 04 [in Ukrainian].
doi: [10.32838/2663-5941/2020.2-2/](https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-2/).
- [4] A. V. Ivanchenko, and K. Ye. Khavikova, "Investigation of the process of extraction of phenols and resinous substances from industrial liquid waste of a coke plant by adsorption", *Ekolohichna bezpeka KNU im. M. Ostrohradskoho*, no. 2, pp. 32-38, 2018 [in Ukrainian].
doi: [10.30929/2073-5057.2018.2.32-38](https://doi.org/10.30929/2073-5057.2018.2.32-38).

- [5] K. Ye. Khavikova, and A. V. Ivanchenko, "Substantiation of ecologically safe method of phenolic wastewater treatment", in *Proc. III All-Ukr. Sci. and Pract. Conf. Actual problems of modern chemistry*, (May 24, 2019). Mykolaiv: NUK im. adm. Makarova, 2019, pp. 218-222 [in Ukrainian].
- [6] I. Klymenko, D. Yelatontsev, A. Ivanchenko, O. Dupenko, and N. Voloshyn, "Developing of effective treatment technology of the phenolic wastewater", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 10 (81), pp. 29-34, 2016. doi: 10.15587/1729-4061.2016.72410.
- [7] L. N. Isaeva, Yu. V. Tamarkina, D. V. Bovan, and V. A. Kucherenko, "Phenol adsorption by activated carbons obtained by thermolysis of brown coal with potassium hydroxide", *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 1, pp. 25-32, 2009 [in Russian].
- [8] N. S. Golubeva, O. V. Belyaeva, N. V. Gora, and E. S. Velikanova, "Kinetics of phenol extraction from aqueous media by carbon sorbents", *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*, no. 2, p. 4, 2012 [in Russian].
- [9] E. Yakub, S. E. Agarry, F. Omoruwou et al., "Comparative study of the batch adsorption kinetics and mass transfer in phenol-sand and phenol-clay adsorption systems", *Particulate Science and Technology*, no. 1, pp. 1-11, 2019. doi: 10.1080/02726351.2019.1616862.
- [10] A. Mandal, B. B. Dey, and S. K. Das, "Thermodynamics, kinetics, and isotherms for phenol removal from wastewater using red mud", *Water Practice and Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 705-722, 2020. doi: 10.2166/wpt.2020.056.
- [11] A. Gładysz-Płaska, "Application of modified clay for removal of phenol and PO_4^{3-} ions from aqueous solutions", *Adsorption Science Technology*, vol. 35, no. 7-8, pp. 692-699, 2017. doi: 10.1177/0263617417704774.
- [12] A. P. Karmanov, and I. N. Polina, *Technology of waste water treatment*: textbook. Syktyvkar, Russia: SLI, 2015. [Online]. Available: <http://lib.sfi.komi.com>. [in Russian].
- [13] A. V. Ivanchenko, K. Ye. Khavikova, and M. D. Voloshyn, "Sedimentation analysis of the dispersed phase in the treatment of phenolic wastewater from coke production by glauconite", *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky*, iss. 2 (37), pp. 93-100, 2020 [in Ukrainian]. doi: 10.31319/2519-2884.37.2020.17.
- [14] Technological regulations for biochemical wastewater treatment in the workshop for energy and water supply. PJSC EURAZ "BAGLEY KOKS". Dneprodzerzhinsk, 2013 [in Russian].
- [15] M. O. Mchedlov-Petrosyan, V. I. Lebid, O. M. Glazkova et al., *Colloidal chemistry*. Kharkiv, Ukraine: Folio, 2005 [in Ukrainian].
- [16] L. F. Dolina, and P. B. Mashikhina, *Sewage and drinking water sludge: problems and solutions*. DNUZhT: Continent, 2014 [in Russian].
- [17] K. Ye. Khavikova, and A. V. Ivanchenko, "Dewatering of sludge from coke plants using Geotub technology", in *Proc. 8th Int. Sci. and Pract. Conf. Fundamental and applied research in the modern world*, (March 17-19, 2021). Boston, USA: BoScience Publisher, 2021, pp. 968-977.
- [18] A. Ivanchenko, K. Khavikova, and A. Trukilo, "Mathematical modeling of the processes of wastewater purification from phenols and rhodanides using glauconite", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 4, pp. 111-116, 2020. doi: 10.33271/nvngu/2020-4/111.
- [19] A. V. Ivanchenko, and K. Ye. Khavikova "Flotator", pat. 144400 Ukraine. IPC B03D 1/14, C12M 1/09. No. u 2021 00597; appl. 12.02.2021; publ. 02.06.2021, Bull. no. 22 [in Ukrainian].
- [20] V. M. Kagasov, and E. K. Derbysheva, *Wastewater treatment of coke-chemical enterprises*. Yekaterinburg, Russia: Poligrafist, 2003 [in Russian].

K. Ye. Khavikova, *Postgraduate Student*,
e-mail: karina.havikova@gmail.com

A. V. Ivanchenko, *Dr. Tech. Sc., Professor*
e-mail: ivanchenkodgtu@gmail.com

Dniprovsky State Technical University
Dniprobudivska st. 2, Kamyanske, 51918, Ukraine

IMPROVEMENT OF WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGY WITH SEDIMENT DISPOSAL AT COKE-CHEMICAL ENTERPRISES

Wastewater generated at coke plants and harmful effects of pollutants on the environment are characterized. The main methods of sludge dewatering and prospects of the flotation method are listed. An experiment with industrial wastewater treatment from phenols, rhodanides, total ammonia and resinous substances with the natural mineral glauconite in combination with a 0.1% solution of cationic flocculant has been conducted at biochemical purification section of PJSC "YUZHKOCS", Kamyanske. The patented design of the flotator with partitions is recommended for implementation. The purification efficiency from phenols has been 35.7%, rhodanides – 32.1%, total ammonia – 57.2%, resins and oils – 95.0%. Laboratory studies have shown a prolonged effect of glauconite in combination with cationic flocculant with the addition of new portions of liquid waste up to 4 cycles in the removal of phenols and resinous substances. During the process, the MPC of phenols has been achieved before the stage of biological purification with the efficiency of extraction up to 50% and resinous substances – up to 95.37%. The mechanism of sewage treatment by glauconite in combination with cationic flocculant is offered. When disposing of sludge from a flotation plant, the possibility of using geotextile container technology to reduce the impact of high concentrations of pollutants in coke effluents has been established. As a result of researches the indicator of humidity of a deposit at dehydration of slime by means of technology of geotextile containers and reduction of its humidity from 92% to 50% is established. Physical and mechanical research has been carried out using glauconite sludge as an additive to the asphalt concrete mixture, physical and economic indicators of tests have been obtained in the laboratory of PE "Segment", Kamyanske. As a result of tests it has been found that the asphalt concrete mixture with the addition of glauconite sludge meets the requirements of DSTU BV 27–119: 2011 "Asphalt mixtures and road and airfield asphalt concrete. Technical conditions" and sludge disposal technology can be recommended for implementation at asphalt concrete plants in the manufacture of road surfaces.

Keywords: coke chemical effluents, pollutants, glauconite, flocculant, flotation, sludge, geotextile containers, asphalt concrete mixture.

[0000-0002-2373-2429] **Є. П. Кириченко¹**,

e-mail: kyrychenkojp@gmail.com

[0000-0001-9137-189] **В. В. Ковалишин²**, *д-р техн. наук, професор*,

e-mail: ldubzh.lviv@dsns.gov.ua

[0000-0003-2277-7972] **В. М. Гвоздь¹**, *канд. техн. наук, професор*,

e-mail: chipb@dsns.gov.ua

[0000-0003-0722-9353] **В. А. Ващенко³**, *д-р техн. наук, професор*,

e-mail: v.vaschenko@chdtu.edu.ua

[0000-0002-0234-8655] **С. О. Колінько³**, *канд. фіз.-мат. наук, доцент*,

e-mail: s.kolinko@chdtu.edu.ua

[0000-0002-2805-572X] **В. В. Цибулін³**

e-mail: tsybulin22@gmail.com

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

Національного університету цивільного захисту України

вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

²Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

вул. Клепарівська, 35, м. Львів, 79007, Україна

³Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ТА РОЗРОБКА МОДЕЛІ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ СУМІШЕЙ МЕТАЛЕВЕ ПАЛЬНЕ + ОКСИД МЕТАЛУ ПРИ ЗОВНІШНІХ ТЕРМІЧНИХ ДІЯХ

Встановлено механізм горіння двокомпонентних сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів, згідно з яким процес перетворення вихідної суміші у продуктах згорання є стаціонарним, одновимірним і протікає у трьох зонах: прогрітий шар у конденсованій фазі суміші; реакційна зона конденсованої фази суміші; зона полум'я (зона тепловиділення газової фази). Розроблено модель горіння сумішей, яка враховує кінетичні характеристики термічного розкладання окиснювача та високотемпературного окиснення, займання та горіння частинок металу у продуктах розкладання, що дає змогу більш точно (відносно похибку знижено до 7... 9 % замість 10...15 % у наявних моделей) визначати критичні діапазони зміни швидкості горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій, перевищення яких призводить до прискорення процесу горіння сумішей та пожежовибухонебезпечного руйнування піротехнічних виробів.

Ключові слова: *пожежна безпека, піротехнічні суміші, термічні дії, процеси горіння, моделі горіння металізованих конденсованих систем.*

Вступ. Нині ущільнені суміші з порошків металевих палив (Mg, Al та ін.) та оксидів металів (CuO, Cu₂O, Sb₂O₃, NiO та ін.) широко використовуються у піротехнічних виробках різного призначення (спалахувальні суміші для освітлювальних і сигнальних патронів та снарядів, трасерів, ІЧ-засобів теплового захисту різних об'єктів, а також стримувальні суміші в артилерійських та бомбових дистанційних трубках та ін.). З кожним роком зростає кількість пожеж та вибухів у процесі обігу досліджуваних виробів (при зберіганні, транспортуванні та застосуванні), що призводить до руйнування об'єктів, травмування та загибелі людей, значних матеріальних збитків [1-8].

Аналіз зазначених випадків показує, що займанню та подальшому пожежовибухонебезпечному руйнуванню виробів передують зовнішні термічні впливи, яким вони піддаються (наприклад, при пожежі у складських приміщеннях, в умовах їх транспортування, при ударних термовпливах в умовах пострілу та польоту виробів при їх запусках та ін.) [9-16]. Це призводить до передчасного займання та вибухонебезпечного розвитку горіння сумішей, що входять до складу виробів, і подальших пожежонебезпечних їх руйнувань. Тому велике практичне значення має попередження вимушених передчасних пожежонебе-

зпечних руйнувань виробів у разі впливу зовнішніх термічних дій.

На сьогодні достатньо докладно досліджено механізм та розроблено моделі горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей (ущільнених сумішей з порошків металевих палих (Mg, Al, алюмінієво-магнієвих сплавів, Ti, Zr та ін.), нітратовмісних окиснювачів (NaNO_3 , $\text{Sr(NO}_3)_2$ та ін.) та добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену та ін.)) [17-27]. Встановлено, що процес горіння зазначених сумішей проходить у трьох найбільш характерних зонах [17-19]: у к-фазі, на поверхні розділу фаз та у зоні полум'я. Показано [20, 21] наявність агломерації (укрупнення в результаті спікання) частинок металів на поверхні горіння, де вони повністю згоряють. Для знаходження теплового потоку з зони полум'я було використано відомий метод теплового потоку, який було уточнено шляхом використання даних по кінетиці термічного розкладання окиснювачів і даних термодинамічних розрахунків температури та складу продуктів згорання сумішей [22, 23]. З допомогою розроблених моделей горіння з похибкою 10...15 % було знайдено залежності швидкості горіння сумішей від технологічних параметрів (співвідношення компонентів, коефіцієнта ущільнення та ін.) та зовнішніх умов (температури нагріву, складу і тиску навколишнього середовища та ін.) [24-26], а також визначено критичні діапазони зміни швидкості горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій, перевищення яких призводить до вибухового прискорення процесу їх горіння та пожежовибухонебезпечного руйнування піротехнічних виробів на їх основі в екстремальних умовах експлуатації [25-27].

Стосовно досліджуваних сумішей металеве палне + оксид металу, нині зазначені вище дослідження для них відсутні.

Мета та задачі досліджень. *Мета роботи:* встановлення механізму горіння двокомпонентних ущільнених сумішей з порошків магнію та алюмінію з оксидами металів та розробка моделі їх горіння для визначення критичних діапазонів зміни швидкості горіння сумішей, враховуючи вплив зовнішніх термічних дій.

Задачами досліджень є:

– аналіз експериментальних даних з метою встановлення фізико-хімічних процесів, що протікають у різних зонах горіння сумішей;

– отримання рівнянь для розрахунку швидкості та температури поверхні горіння сумішей;

– визначення середньої температури поверхні горіння та теплового потоку від частинок металу, що згоряють на поверхні горіння.

Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень. Як зразки сумішей використовувались ущільнені двокомпонентні суміші з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів, які виготовлялись стандартними методами ущільнюючого формування, головним чином, пресуванням [4-6]. При вивченні впливу дисперсності порошків металів та окиснювачів на процес розвитку горіння сумішей використовувались стандартні порошки, які випускаються промисловістю [2-4]. Коефіцієнт ущільнення зразків становив 0,95...0,97, тобто зразки мали гранично допустимі значення K_v та були практично газонепроникними [5, 6]. Для дослідження впливу підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків на процес горіння сумішей зразки мали діаметр $2...3 \cdot 10^{-2}$ м і товщину металевої оболонки $1,5...2,0 \cdot 10^{-3}$ м. Висоти запресувань при вказаних діаметрах становили $3...4 \cdot 10^{-2}$ м. Для моделювання впливу підвищених температур нагріву (до 1000 К) та зовнішніх тисків (до $3 \cdot 10^7$ Па) на швидкість горіння сумішей використовувалося стандартне піротехнічне обладнання [5, 6, 30].

Для проведення досліджень використовувались відомі методи фізико-хімічного аналізу (контактні та безконтактні методи вимірювання температури, швидкісна мікрокіномія процесів горіння, термогравіметричні методи аналізу та ін.), методи математичного моделювання, чисельно-аналітичні методи рішення рівнянь тепло- та масопереносу, рівнянь хімічної кінетики, а також методи математичної статистики з використанням стандартних програм по сучасних чисельних методах [29]. Водночас відносна похибка вимірювань основних характеристик горіння сумішей (температури поверхні горіння, часу згорання частинок металів у продуктах розкладання окиснювача, швидкості горіння сумішей та ін.) у зазначених умовах не перевищувала 7...9 %.

Фізико-хімічні процеси, що проходять у різних зонах горіння сумішей. Проведені дослідження поведінки компонентів сумішей з порошків Mg, Al та оксидів металів (CuO, NiO

та ін.) в умовах підвищених температур нагріву, притаманних процесу горіння піротехнічних сумішей порошків металевих палих з кисневмісними окиснювачами [5, 6], дали змогу встановити, що процес горіння зарядів досліджуваних сумішей у середньому є стаці-

онарним і протікає таким же чином, як у сумішевих твердих ракетних палив (СТРП) [1, 4], у декількох просторово розділених зонах: конденсованій фазі (к-фазі), на поверхні горіння та у газовій фазі (г-фазі – зоні полум'я) (рисунк 1).



Рисунок 1 – Загальна картина процесу горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей порошків магнію (а) та алюмінію (б) з оксидами металів (CuO, NiO та ін.) (суміші стехіометричні; $T_0 = 300$ К; $P = 10^5$ Па) [5, 6]

Так, з даних про термічне розкладання оксидів металів й окиснення порошків магнію та алюмінію в активних кисневмісних середовищах випливає, що при нагріванні зарядів сумішей до температур 1300...1500 К, відповідних значенням температур поверхні горіння сумішей T_n , відбувається повне розкладання окиснювача з виділенням O_2 за таким кінетичним рівнянням:

$$\frac{d\psi_1}{dt} = K_1 \cdot e^{-E_1/RT}, \quad (1)$$

де ψ_1 – відносний ступінь розкладання окиснювача; K_1 , E_1 – кінетичні константи ($E_1 \gg RT$). Умова $E_1 \gg RT$ відповідає тому, що основне поглинання тепла у к-фазі, яке пов'язане з розкладанням окиснювача, практично повністю зосереджене у достатньо вузькому інтервалі температур $\Delta T \cong 2RT_n^2/E_1$, що прилягає до температури поверхні горіння [5, 6].

Згідно з експериментальними даними в окиснювачі, що газифікується, при температурах $T > 1300$ К починається процес окиснення частинок металу. Аналітична обробка кінетичних кривих окиснення частинок металу в газоподібних продуктах розкладання розплаву окиснювача показує, що швидкість зазначеного процесу описується таким рівнянням:

$$\frac{d\psi_2}{dt} = K_2 \cdot C_{O_2}^m \cdot \bar{\rho}_c^n \cdot e^{-E_2/RT} \text{ при } E_2 \gg RT, \quad (2)$$

де ψ_2 – ступінь окиснення металу; K_2 – передекспоненціальний множник (s^{-1}); E_2 – енергія активації (кДж/моль); C_{O_2} , $\bar{\rho}_c$ – відносний масовий вміст O_2 в газоподібних продуктах; відносна густина газового середовища (стосовно нормальних умов) відповідно; m , n – емпіричні константи, що залежать від природи металевих пального. Водночас з умови $E_2 \gg RT$ випливає, що інтенсивне передполум'яне окиснення частинок металевих пального в газоподібних продуктах розкладання окиснювача також протікає у вузькій реакційній зоні к-фазі, де відбувається повна газифікація зазначених компонентів.

Мікрокінозйомка поверхні горіння суміші показує, що спалахування частинок металевих пального відбувається одразу ж після їх виходу на поверхню горіння (рисунк 2). За такої умови поверхню горіння суміші, так само як і у СТРП [1, 4], можна охарактеризувати середньою температурою T_n . Проте експериментальні дані показують, що для горючих сумішей досліджуваного типу визначення вказаної температури T_n є вельми складним. Це пов'язано з тим, що процеси, які протікають на поверхні горіння досліджуваної суміші (на відміну від СТРП), досить складні. Так, наприклад, детальний аналіз показав, що відмінність у температурах частинок металу і продуктів розкладання окиснювача на поверхні горіння може досягати значень 500...700 К. Більше того, навіть частинки порошку металу

на поверхні горіння мають різні температури через нерівність поверхні горіння і різні гідродинамічні та фізичні умови навколо окремих частинок. Ці особливості поверхні горін-

ня і затрудняють точне визначення T_n , тому про експериментально виміряну T_n як про деяку середню величину для всієї поверхні горіння можна говорити лише приблизно.

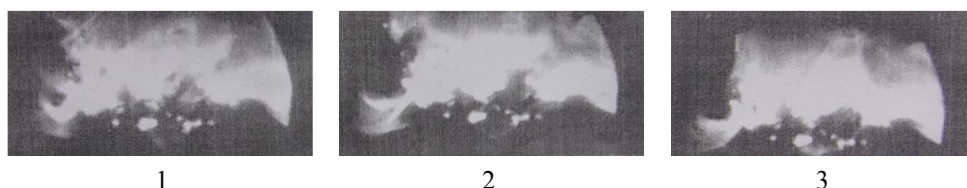


Рисунок 2 – Кінокадри мікрокінозйомки процесу займання частинок металевого пального на поверхні горіння суміші (суміші стехіометричні; $T_0 = 300$ К; $P = 10^5$ Па) [5, 6]

З даних мікрокінозйомки поверхні горіння сумішей також випливає, що практично усі частинки металевого пального спалахують на ній, невелика частина з них (близько кількох процентів від загальної кількості частинок у реакційній зоні к-фазы суміші) виноситься

(диспергує) у зону полум'я, більша частина затримується на поверхні горіння у результаті їх агломерації (рисунок 3), де вони повністю дифузійно згорають у потоці газоподібних продуктів термічного розкладання окиснювача (рисунок 4).

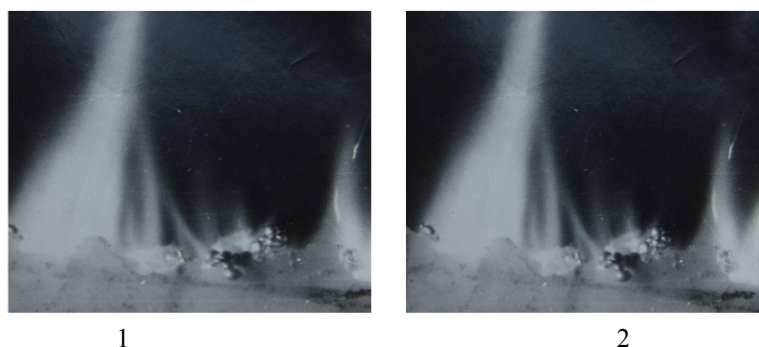
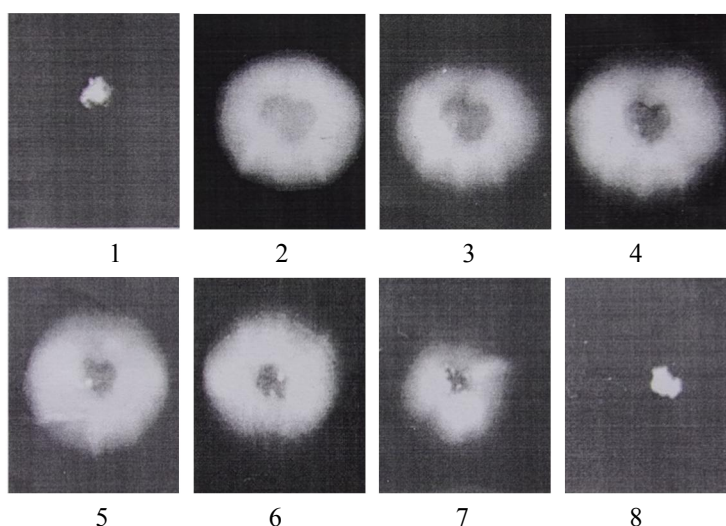


Рисунок 3 – Кінокадри мікрокінозйомки процесу агломерації частинок металевого пального на поверхні горіння суміші (суміші стехіометричні; $T_0 = 300$ К; $P = 10^5$ Па) [5, 6]



1 – знімок сферичної частинки металу до моменту її займання; 2, 3, 4, 5, 6 – знімки, що характеризують стаціонарне вигорання металу з частинки; 7 – знімок, що характеризує нестаціонарне вигорання металу з частинки; 8 – знімок частинки оксиду, що утворюється після згорання частинки металу

Рисунок 4 – Кінокадри мікрокінозйомки процесу дифузійного згорання частинки металевого пального у середовищі газоподібних продуктів розкладання окиснювача ($T_0 = 300$ К; $P = 10^5$ Па) [5, 6]

Результати досліджень. Механізм і математична модель горіння сумішей, рівняння для розрахунку швидкості розвитку їх горіння. На основі аналізу експериментальних відомостей про фізико-хімічні процеси, що протікають у різних зонах горіння досліджуваних сумішей, встановлено механізм їх горіння. Процес перетворення вихідної суміші в продукти згорання є стаціонарним, одновимірним і протікає в наступних трьох найхарактерніших зонах (рисунок 5). Зона I – прогрітий шар у к-фазі суміші. В цій зоні можна знехтувати хімічними перетвореннями. Зона II – реакційна зона к-фазі суміші, в якій тверда суміш перетворюється на газ, відбувається розкладання окиснювача та окиснення частинок металевго пального за реакціями, для яких $E \gg RT$ (E – енергія активації, R – газова стала). Спалахування частинок металу відбувається на поверхні горіння. Поверхня горіння – площина, на якій тверда суміш втрачає властивості конденсованого середовища. Середня температура поверхні – T_n . Більша частина частинок металу, що спалахнули, затримується на поверхні горіння

аж до їх повного згорання, а деякі з них диспергуються у г-фазу. Зона III – зона тепловиділення г-фазі. В цій зоні дисперговані частинки металевго пального згоряють в потоці продуктів розкладання окиснювача. При цьому утворюються продукти згорання з температурою T_c . Тепло, що виділяється, шляхом теплопровідності і радіації передається у к-фазу.

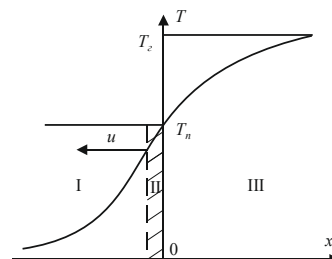


Рисунок 5 – Схематичне зображення розподілу температури поблизу поверхні горіння суміші

Розповсюдження фронту реакції горіння у к-фазі вихідної суміші описується відомою в теорії горіння системою рівнянь [5, 6]:

$$\frac{d}{dx}(\lambda_c \frac{dT}{dx}) - \rho_c c_c \frac{dT}{dx} - H_{ок} \rho_c u \zeta_{ок} \frac{d\psi_1}{dx} + H_m \rho_c \zeta_m u \frac{d\psi_2}{dx} = 0; \quad (3)$$

$$u \frac{d\psi_1}{dx} = K_1 e^{-E_1/(RT)}; \quad (4)$$

$$u \frac{d\psi_2}{dx} = K_2 \cdot C_{O_2}^m \cdot \bar{p}_2^n e^{-E_2/(RT)}; \quad (5)$$

з граничними умовами:

$$T = T_0, \psi_1 = \psi_2 = 0 \text{ при } x \rightarrow -\infty; \quad (6)$$

$$T = T_n, \psi_1 = \psi_{1n}, \psi_2 = \psi_{2n}; \lambda_c \left(\frac{dT}{dx} \right) = q_n + q_k \text{ при } x = 0. \quad (7)$$

Тут ρ_c, c_c, λ_c – густина (кг/м^3), питома теплоємність ($\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$) і коефіцієнт теплопровідності ($\text{Вт/м}\cdot\text{К}$) суміші; $H_{ок}$ – тепловий ефект реакції розкладання окиснювача (Дж/кг); ψ_i, K_i та E_i ($i = \overline{1,2}$) – відносні ступені розкладання окиснювача та окиснення металевго пального (по масі) та їх кінетичні константи (с^{-1} , кДж/моль) відповідно; $\zeta_{ок}, \zeta_m$ – відносні

масові вмісти окиснювача і металевго пального в суміші відповідно; q_n – тепловий потік від частинок металу, що згоряють на поверхні горіння, Вт/м^2 ; q_k – кондуктивний тепловий потік із зони полум'я, Вт/м^2 .

Проінтегрувавши рівняння (4) від $-\infty$ до x , отримуємо

$$\lambda_c \left(\frac{dT}{dx} \right) = \rho_c c_c u (T - T_0) - H_m \rho_c \zeta_m u \left(\psi_2 - \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_m \zeta_m} \psi_1 \right). \quad (8)$$

Помножимо рівняння (4) на $\frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_m \zeta_m}$, потім віднімемо їх з рівняння (5):

$$u \frac{d}{dx} \left(\psi_2 - \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_m \zeta_m} \psi_1 \right) = K_2 \cdot C_{O_2}^m \cdot \bar{p}_2^n e^{-E_2/(RT)} - K_1 \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_m \zeta_m} e^{-E_1/(RT)}. \quad (9)$$

Розділимо (9) на (8):

$$\frac{u}{\lambda_c} \cdot \frac{d}{dT} \left(\psi_2 - \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_m \zeta_m} \psi_1 \right) = \frac{K_2 \cdot C_{O_2}^m \cdot \bar{p}_2^n e^{-E_2/(RT)} - K_1 \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_m \zeta_m} e^{-E_1/(RT)}}{\rho_c c_c u (T - T_0) - H_m \rho_c \zeta_m u \left(\psi_2 - \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_m \zeta_m} \psi_1 \right)}. \quad (10)$$

Для випадку $E_i \gg RT$ ($i = \overline{1,2}$) досліджувані реакції розкладання окиснювача з утворенням газоподібних продуктів та окиснення в них частинок металу протікають в основному у зоні к-фази, що прилягає до поверхні горіння суміші (при температурі T_n). Згідно з методом розкладання експоненти [5, 6]:

$$\frac{E_i}{RT} = \frac{E_i}{R(T_n + \Delta T)} = \frac{E_i}{RT_n} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta T}{T_n}} \cong \frac{E_i}{RT_n} - \frac{E_i}{RT_n^2} \Delta T, \quad (11)$$

де $\Delta T = T - T_n$.

Тоді отримуємо, що

$$e^{-E_i/(RT)} \cong e^{E_i/(RT_n)} \cdot e^{E_i \cdot (T_n - T)/(RT_n^2)}. \quad (12)$$

Підставляючи (12) у (10), отримуємо

$$u \frac{d}{dx} \left(\psi_2 - \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \psi_1 \right) = [K_2 \cdot C_{O_2}^m \cdot \bar{p}_e^n \cdot e^{E_2/(RT_n)} \cdot e^{\frac{E_2 \cdot (T_n - T)}{RT_n^2}} - K_1 \cdot \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \cdot e^{E_1/(RT_n)} \cdot e^{\frac{E_1 \cdot (T_n - T)}{RT_n^2}}] \cdot [\rho_c c_c u (T_n - T_0) - H_M \rho_c u \zeta_M \left(\psi_2 - \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \psi_1 \right)]^{-1}. \quad (13)$$

Рівняння (13) повинне задовольняти граничним умовам:

$$\psi_1 = \psi_2 \text{ при } T = T_0; \quad (14)$$

$$\psi_1 = \psi_{1n}, \psi_2 = \psi_{2n} \text{ при } T = T_n. \quad (15)$$

В результаті інтегрування рівняння (13) з граничними умовами (14) та (15) отримуємо

$$u^2 \left[\rho_c c_c (T_n - T_0) \left(\psi_{2n} - \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \psi_{1n} \right) - \frac{H_M \zeta_M \rho_c}{2} \left(\psi_{2n} - \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \psi_{1n} \right)^2 \right] = \frac{\lambda_c K_2 C_{O_2}^m \bar{p}_e^n R T_n^2}{E_2} e^{-E_2/(RT_n)} \cdot [1 - e^{\frac{E_2 \cdot (T_n - T_0)}{RT_n^2}}] - \frac{\lambda_c K_1 R T_n^2 H_{OK} \zeta_{OK}}{E_1 H_M \zeta_M} \cdot e^{-E_1/(RT_n)} \cdot [1 - e^{\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{RT_n^2}}]. \quad (16)$$

Проведені експериментальні дослідження і теоретичні оцінки [5, 6] показують, що для піротехнічних металізованих сумішей тепловиділенням за рахунок окиснення частинок металевого пального окиснювачем, що газифікується, порівняно з загальним тепловим балансом к-фази вихідної суміші можна,

у першому наближенні, знехтувати (відносна похибка не перевищує 2...4 %), хоча зазначеного тепла повністю вистачає для спалахування частинок металу на поверхні горіння. З урахуванням цього факту вираз (16) набуває вигляду

$$H_{OK} \zeta_{OK} \rho_c u^2 \cdot [c_c (T_n - T_0) \psi_{1n} + \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{2} \psi_{1n}^2] = \frac{\lambda_c K_1 R T_n^2 H_{OK} \zeta_{OK}}{E_1} \cdot e^{-E_1/(RT_n)} \cdot [1 - e^{\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{RT_n^2}}]. \quad (17)$$

При $x = 0$ з рівняння (8) отримуємо, що

$$\psi_{1n} = \frac{q_n + q_k - \rho_c c_c u (T_n - T_0)}{H_{OK} \rho_c u \zeta_{OK}}. \quad (18)$$

Підставивши вираз (18) у (17), отримаємо для швидкості горіння таке рівняння:

$$\rho_c^2 c_c^2 u^2 (T_n - T_0)^2 = (q_n + q_k)^2 + \frac{2 c_c \rho_c K_1 H_{OK} \zeta_{OK} R T_n^2}{E_1} e^{-E_1/(RT_n)} \cdot [1 - e^{\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{RT_n^2}}]. \quad (19)$$

Далі з отриманого спрощеного рівняння (19) випливає, що для розрахунку швидкості горіння сумішей необхідними є параметри T_n , q_n , q_k .

Визначення T_n . Експериментальне визначення T_n є складним і достатньо наближеним [5, 6], а дослідження аналітичного визначення T_n обмежені. Тому, використовуючи

експериментальні дані про кінетику термічного розкладання окиснювачів [5, 6], T_n можна визначити, припускаючи, що при $T = T_n$ відбувається повна газифікація окиснювача. Таким чином, з (17) при $\psi_{1n} \approx 1$, $\psi_{2n} \approx 0$, для визначення T_n отримуємо наступне рівняння:

$$\rho_c^2 u^2 [c_c (T_n - T_0) + \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{2}] = \lambda_c K_1 R T_n^2 \cdot e^{-E_1/(RT_n)} [1 - e^{\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{RT_n^2}}]. \quad (20)$$

Аналіз даних макрозйомки поверхні горіння сумішей [5, 6] показує, що кількість частинок металу, які диспергують у г-фазу, складає не більше 1...3 % від кількості частинок, що затримуються на поверхні аж до їх повного згоряння. Це дозволяє, у першому наближенні, знехтувати тепловим потоком з

г-фази за рахунок теплопровідності q_k порівняно з тепловим потоком від частинок, що згоряють на поверхні горіння q_n .

Таким чином, для розрахунку швидкості та температури поверхні горіння досліджуваних сумішей отримуємо таку замкнуту систему рівнянь:

$$\rho_c^2 u^2 c_c^2 (T_n - T_0)^2 = q_n^2 + \frac{2c_c \rho_c K_1 H_{ок} \zeta_{ок} R T_n^2}{E_1} \cdot \left[1 - e^{-\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{R T_n^2}} \right], \quad (21)$$

$$\rho_c^2 u^2 \left[c_c (T_n - T_0) + \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{2} \right] = \frac{\lambda_c K_1 R T_n^2}{\rho_c} \cdot \left[1 - e^{-\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{R T_n^2}} \right], \quad (22)$$

де $\zeta_{ок} = 1 - \zeta_m$.

Визначення q_n . З метою отримання більш простого аналітичного виразу для q_n були прийняті наступні припущення, що не протирічать отриманим експериментальним даним: з реакційної зони к-фази суміші у зону полум'я диспергують частинки металу з розміром, меншим критичного (для частинок такого розміру температура T_n є температурою займання T_z ($T_n \cong T_z$)), а частинки з розміром, що дорівнює або більше критичного, залишаються на поверхні горіння до їх повного згоряння; задана функція розподілу частинок металу за їх розмірами r_m (r_m – радіус частинки металу) апроксимується нормальним розподілом Гаусса [29], що характеризується деяким середньостатистичним розміром $\bar{r}_m$ і середньоквадратичним відхиленням від середнього σ_{r_m} ; функція розподілу частинок металу за їх розміром r_m не змінюється при переході до реакційної зони к-фази суміші, де вони спалахують.

Нехай у реакційній зоні к-фази суміші є N неоднорідностей. Розподіл вірогідностей розмірів частинок підпорядковується закону Гауса [29]:

$$\Phi(r_m) = \frac{1}{\sigma_{r_m} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{r_m} e^{-\frac{(r_m - \bar{r}_m)^2}{2\sigma_{r_m}^2}} dr_m, \quad (23)$$

де $\Phi(r_m)$ – відношення кількості частинок з розміром, меншим r_m , до загальної кількості частинок.

Густина вірогідності має вигляд

$$\varphi(r_m) = \frac{1}{\sigma_{r_m} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(r_m - \bar{r}_m)^2}{2\sigma_{r_m}^2}}, \quad (24)$$

де $\varphi(r_m)$ – відношення кількості частинок розміром $r_m \pm \Delta r_m / 2$ до загальної кількості частинок.

Розіб'ємо весь спектр частинок з розміром $r_m \leq r_m^*$ (r_m^* – критичний розмір частинок металу, для яких температура T_n є їх температурою займання) на i ($i = 1, 2, \dots$) областей, кожна з яких характеризується кількістю N_i частинок з розміром r_{mi} . Масова швидкість їх горіння

$$\dot{m}_i = \dot{m}(r_{mi}) \cdot N_i, \quad (25)$$

де $\dot{m}(r_{mi})$ – масова швидкість горіння індивідуальної i -тої частинки. Тепловий потік на одиницю площі поверхні горіння за одиницю часу від цих частинок

$$q_{ni} = \frac{\dot{m}(r_{mi}) \cdot N_i H_m}{S}, \quad (26)$$

де H_m – теплота згоряння металу; S – площа поверхні горіння. З визначення густини вірогідності (24) маємо

$$N_i = N \cdot \varphi(r_{mi}) \cdot \Delta r_m. \quad (27)$$

Підставивши N_i у вираз (26), а потім підсумувавши і переходячи до границі, отримуємо

$$q_n = \frac{N H_m}{S} \cdot \int_{r_m^*}^{\infty} \dot{m}(r_m) \varphi(r_m) \cdot dr_m. \quad (28)$$

Для знаходження теплового потоку q_n необхідно, як це видно з (28), визначити кількість неоднорідностей N у реакційній зоні к-фази суміші. Для цього розіб'ємо весь спектр частинок на i областей. Тоді маса N_i частинок у цій області запишеться так:

$$M_i = \frac{4}{3} \rho_m \cdot \pi r_{mi}^3 \cdot N_i. \quad (29)$$

Далі замінімо N_i згідно з (27), тоді отримуємо

$$M_i = \frac{4}{3} N \cdot \rho_m \cdot \pi r_{mi}^3 \cdot \varphi(r_{mi}) \cdot \Delta r_m. \quad (30)$$

Переходячи до границі та проінтегрувавши (30), отримуємо

$$M_i = \frac{4}{3} N \cdot \rho_m \cdot \pi \int_0^{\infty} r_m^3 \cdot \varphi(r_m) \cdot dr_m. \quad (31)$$

Інтеграл у співвідношенні (31) – момент третього порядку, який обчислюється у випадку нормального розподілу на основі відомих моментів першого та другого порядків ($I_1 = 0$; $I_2 = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$) [29]:

$$M_i = \frac{4}{3} N \cdot \rho_m \cdot \pi \bar{r}_m^3 \cdot \left[1 + \frac{3\sigma_{r_m}^2}{\bar{r}_m^2} \right]. \quad (32)$$

З другого боку, маса частинок металу, що зосереджені у реакційній зоні к-фази товщиною $\bar{r}_m$, дорівнює

$$M = \frac{\rho_c \cdot S \cdot \bar{r}_m}{\zeta_m}, \quad (33)$$

де ζ_m – відносний вміст металевго пального у суміші.

Звідси

$$N = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_m} \cdot \frac{S \cdot \zeta_m}{\bar{r}_m^3 \cdot \left[1 + \frac{3\sigma_{r_m}^2}{\bar{r}_m^2} \right]}. \quad (34)$$

Підставляючи (34) у вираз (28), отримаємо

$$q_n = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_m} \cdot \frac{H_m \cdot \zeta_m}{\bar{r}_m^3 \cdot \left[1 + \frac{3\sigma_{r_m}^2}{\bar{r}_m^2} \right]} \cdot \int_{r_m}^{\infty} \dot{m}(r_m) \varphi(r_m) \cdot dr_m. \quad (35)$$

Для знаходження r_m^* скористаємось відомими критичними умовами займання частинки металу у кисневмісних середовищах при температурі T_n [2, 5]:

$$\frac{Q \cdot E_2}{R \cdot T_n^2} \cdot \frac{\rho_m}{\lambda_{zn}} \cdot \frac{K_2 \cdot C_{O_2n}^m \cdot r_m^*}{\bar{\rho}_{zn}^n} \cdot e^{-E_2/R \cdot T_n} = \frac{1}{e}, \quad (36)$$

де Q , E_2 , K_2 – кінетичні та теплові параметри частинки металу у передполум'яному процесі; $C_{O_2n}^m$ – відносна концентрація O_2 у середовищі продуктів розкладання окиснювача при T_n ; λ_{zn} , $\bar{\rho}_{zn}$ – коефіцієнт теплопровідності та відносна густина (стосовно густини при нормальних умовах ($T = 300$ К, $P = 10^5$ Па)) газового середовища при T_n ; m , n – емпіричні константи). Далі з (36) знаходимо

$$r_m^* = \frac{\lambda_{zn} \bar{\rho}_{zn}^n \cdot R \cdot T_n^2}{\rho_m \cdot Q \cdot E_2 \cdot K_2 \cdot C_{O_2n}^m} \cdot e^{\frac{E_2}{R \cdot T_n} - 1}. \quad (37)$$

При цьому швидкість горіння частинки металу у кисневмісних середовищах $\dot{m}(r_m) = \frac{dm(r_m)}{dt}$, що входить у формулу (35), знаходиться з відомого виразу для дифузійного механізму процесу її горіння [2, 5]:

$$\frac{dm(r_m)}{dt} = \frac{4\pi r_m \lambda_{zn}}{c_{Pn}} \cdot Nu_n \cdot \ln \eta_n, \quad (38)$$

$$\text{де } \eta_n = \frac{1 + C_{O_2n} \cdot (H_m/L) + (c_{Pn}/L) \cdot (T_n - T_K)}{(1 + \frac{C_{O_2n}}{\gamma^*}) \cdot (1 - C_{O_2n})^{1/\gamma^*}}; \quad (39)$$

c_{Pn} , λ_{zn} – теплоємність і коефіцієнт теплопровідності газового потоку при $T = T_n$; C_{O_2} – відносна концентрація кисню в газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача (згідно з експериментальними даними по відтоку газоподібних продуктів [5, 6] значення C_{O_2} вважається рівним її значенню при повному розкладанні окиснювача); γ^* – відношення масового потоку кисню до масового потоку пари металу; L , T_K – прихована теплота випаровування і температура кипіння металу; $Nu_n = 2[1 - 0,08(2r \cdot V_n/v_{zn})^{2/3}]$ – критерій Нуссельта [5, 6]; v_{zn} – коефіцієнт кінематичної в'язкості газового потоку при $T = T_n$; V_n – середня швидкість відтоку газоподібних продуктів поблизу поверхні горіння.

Приведемо рівняння (37) та вираз (38) до вигляду, зручного для інтегрування, використовуючи відомі вирази для коефіцієнтів c_{Pn} , λ_{zn} та v_{zn} [2-4]:

$$\lambda_{zn} \approx \lambda_z^0 \cdot \left(\frac{T_n}{T_0^*} \right)^{0,5}, \quad (40)$$

$$c_{Pn} \approx c_P^0 \cdot \left(\frac{T_n}{T_0^*} \right)^{0,5}, \quad (41)$$

$$v_{zn} \approx v_z^0 \cdot \left(\frac{T_n}{T_0^*} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{P_a}{P} \right), \quad (42)$$

де λ_z^0 , c_P^0 , v_z^0 – значення параметрів, які беруться при нормальних умовах ($T_0^* = 290$ К, $P_a = 10^5$ Па).

При цьому V_n знаходиться з рівняння нерозривності на поверхні горіння

$$\rho_{zn} \cdot V_n = \rho_c \cdot u \cdot \zeta_{ок}, \quad (43)$$

де ρ_{zn} – густина газового потоку при температурі $T = T_n$.

Звідси отримуємо

$$V_n = \frac{\rho_c \cdot u \cdot \zeta_{ок}}{\rho_{zn}}, \quad (44)$$

$$\text{де } \rho_{zn} \approx \rho_z^0 \cdot \left(\frac{T_n}{T_0^*} \right) \cdot \left(\frac{P_a}{P} \right). \quad (45)$$

Отримані формули (35), (37)–(45) дають змогу розраховувати тепловий потік q_n залежно від співвідношення компонентів у суміші, дисперсності металевго пального та природи кисневмісного окиснювача, а також зовнішніх умов (температури та тиску навколишнього середовища).

Обговорення результатів. Отримані вище вирази (27), (28), (35), (37)–(45) дають можливість розраховувати швидкість розвитку горіння досліджуваних сумішей u , температуру їх поверхні горіння T_n , а також швид-

кість горіння частинок металу у продуктах розкладання цих сумішей $\frac{dm(r_M)}{dt}$ та тепловий потік з поверхні горіння сумішей q_n . З використанням необхідних значень фізико-хімічних параметрів сумішей та їх компонентів [2-4], стандартного програмного забезпечення [5, 6] було проведено розрахунки залежностей швидкості горіння сумішей від технологічних параметрів, а також параметрів зовнішніх термічних дій (температури нагріву, зовнішнього тиску) (рисунки 6–9). З результатів зіставлення розрахункових залежностей з отриманими експериментальними даними випливає, що між ними спостерігається повний якісний збіг. Кількісні відмін-

ності між розрахунком і експериментом не перевищують 7...9 % (замість 10...15 % у існуючих моделей горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей [5, 6]).

В результаті проведених розрахунків було встановлено критичні діапазони зміни швидкості горіння сумішей, перевищення яких призводить до вибухонебезпечного розвитку процесу їх горіння (таблиця 1):

$$u_i^{**} \leq u \leq u_i^*, i = \overline{1,4}, \quad (46)$$

де індексу “ i ” відповідає конкретна суміш (“1” – суміш Mg + CuO; “2” – суміш Mg + NiO; “3” – суміш Al + CuO; “4” – суміш Al + NiO).

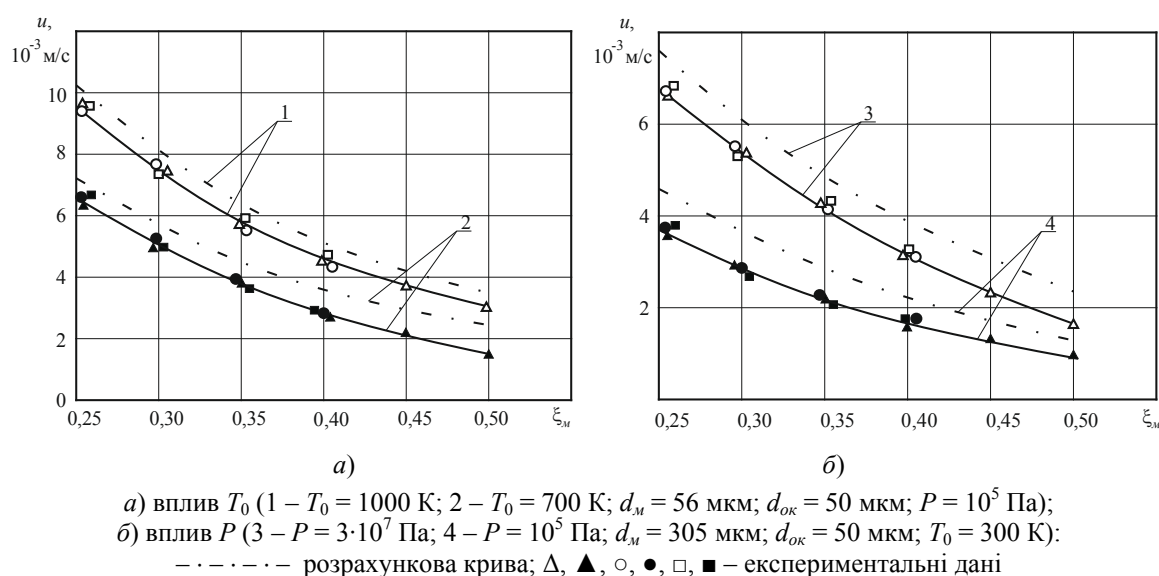


Рисунок 6 – Вплив температури нагріву та зовнішнього тиску на залежність швидкості горіння суміші магній + оксид міді від відносного вмісту металевого пального

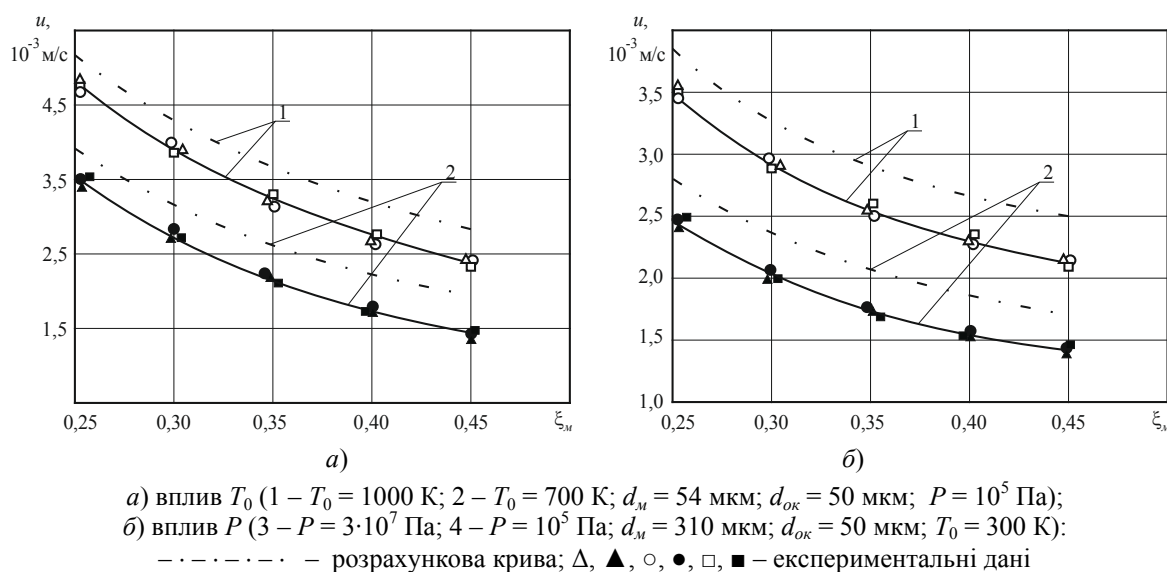
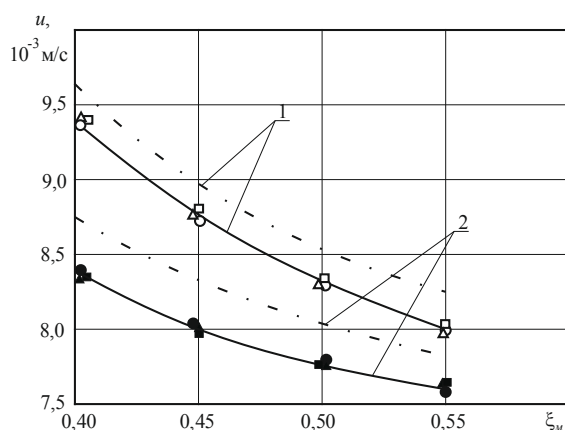


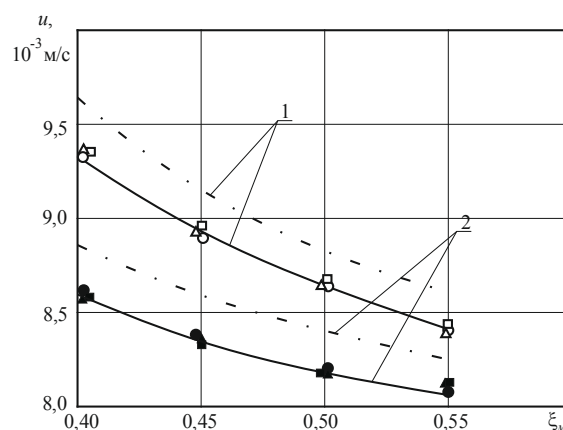
Рисунок 7 – Вплив температури нагріву та зовнішнього тиску на залежність швидкості горіння суміші алюміній + оксид міді від відносного вмісту металевого пального

Таблиця 1 – Розрахункові значення параметрів u_i^* , u_i^{**} ($i=1,4$)

Суміш Параметр	Mg + CuO	Mg + NiO	Al + CuO	Al + NiO
u_1^* , 10^{-3} м/с	0,82			
u_1^{**} , 10^{-3} м/с	4,76			
u_2^* , 10^{-3} м/с		1,19		
u_2^{**} , 10^{-3} м/с		5,73		
u_3^* , 10^{-3} м/с			0,63	
u_3^{**} , 10^{-3} м/с			1,64	
u_4^* , 10^{-3} м/с				0,45
u_4^{**} , 10^{-3} м/с				1,00



а)



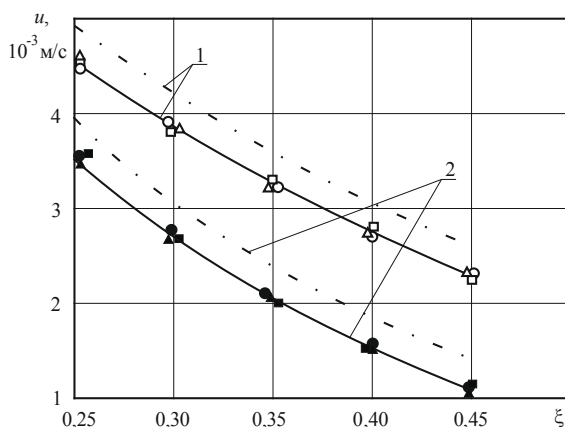
б)

а) вплив T_0 (1 – $T_0 = 1000$ К; 2 – $T_0 = 700$ К; $d_m = 56$ мкм; $d_{ок} = 50$ мкм; $P = 10^5$ Па);

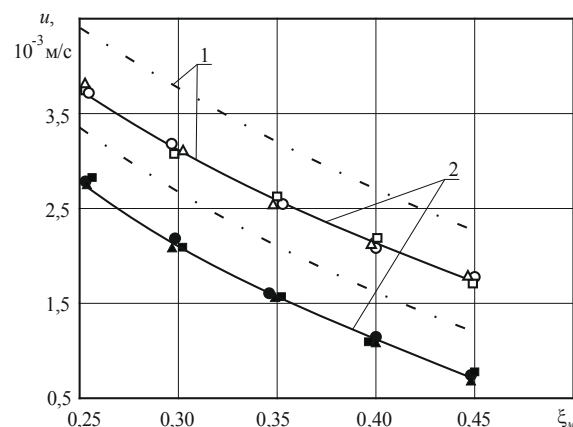
б) вплив P (3 – $P = 3 \cdot 10^7$ Па; 4 – $P = 10^5$ Па; $d_m = 305$ мкм; $d_{ок} = 50$ мкм; $T_0 = 300$ К):

— — — — — розрахункова крива; Δ , $\blacktriangle$, $\circ$, $\bullet$, $\square$, $\blacksquare$ — експериментальні дані

Рисунок 8 – Вплив температури нагріву та зовнішнього тиску на залежність швидкості горіння суміші магній + оксид нікелю від відносного вмісту металевого пального



а)



б)

а) вплив T_0 (1 – $T_0 = 1000$ К; 2 – $T_0 = 700$ К; $d_m = 54$ мкм; $d_{ок} = 50$ мкм; $P = 10^5$ Па);

б) вплив P (3 – $P = 3 \cdot 10^7$ Па; 4 – $P = 10^5$ Па; $d_m = 310$ мкм; $d_{ок} = 50$ мкм; $T_0 = 300$ К):

— — — — — розрахункова крива; Δ , $\blacktriangle$, $\circ$, $\bullet$, $\square$, $\blacksquare$ — експериментальні дані

Рисунок 9 – Вплив температури нагріву та зовнішнього тиску на залежність швидкості горіння суміші алюміній + оксид нікелю від відносного вмісту металевого пального

Таким чином, зовнішні термодії на поверхню корпусів виробів з зарядами досліджуваних сумішей в умовах їх зберігання, транспортування або пострілу та польоту можуть призводити до суттєвого нагрівання їх корпусів, що спричиняє розвиток вибухонебезпечного процесу горіння заряду суміші в замкнутому об'ємі під корпусом виробу в умовах підвищених температур нагріву і тисків зовнішнього середовища, що є основною причиною прискорення процесу його горіння, передчасного спрацьовування виробу та його пожежонебезпечного руйнування. Тому важливо на стадії проектування та стендових випробувань виробів, що моделюють зазначені зовнішні термодії, вміти визначати критичні діапазони зміни швидкості розвитку горіння зарядів сумішей при зовнішніх термічних впливах, перевищення яких призводить до пожежовибухонебезпечного руйнування виробів в екстремальних умовах експлуатації.

Висновки. На основі проведених теоретико-експериментальних досліджень процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій отримано наступні нові результати:

1. Встановлено механізм горіння сумішей, згідно з яким процес перетворення вихідної суміші у продуктах згоряння є стаціонарним, одновимірним і протікає у таких найхарактерніших зонах: зона I – прогрітий шар у к-фазі суміші, де хімічними перетвореннями можна знехтувати; зона II – реакційна зона к-фази суміші, в якій відбувається перетворення твердої суміші на газ, що містить окремі частинки металу, які окиснюються у продуктах розкладання окиснювача; поверхня горіння (поверхня розділу фаз) – площа, на якій суміш втрачає властивості конденсованого середовища, при цьому більша частина частинок металу, що спалахнули, в результаті їх агломерації затримуються на ній до повного згоряння; зона III – зона полум'я (зона тепловиділення г-фази), в якій дисперговані частинки металу згорають у дифузійному режимі у потоці продуктів розкладання окиснювача, утворюючи продукти згоряння.

2. Розроблено модель горіння ущільнених двокомпонентних сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів, яка, на відміну від існуючих моделей піротехнічних нітратно-металевих сумішей, враховує кінетичні характеристики термічного розкладання

окиснювача та високотемпературного окиснення, займання та горіння частинок металу у продуктах розкладання, що дозволяє більш точно (відносна похибка знижено до 7...9 % замість 10...15 % у існуючих моделях) розраховувати залежності швидкості горіння сумішей від підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків для різних значень технологічних параметрів (співвідношення компонентів, дисперсності металевих пального, природи металу та окиснювача та ін.) та визначати її критичні діапазони зміни у цих умовах, перевищення яких призводить до прискорення процесу горіння сумішей та пожежовибухонебезпечного руйнування виробів.

Перспективи подальших досліджень. В результаті передчасного спрацьовування досліджуваних сумішей в умовах зовнішніх термодій утворюються продукти згоряння з великим вмістом високотемпературного конденсату, що призводить до пожежовибухонебезпечного спалахування навколишніх об'єктів. Тому перспективними є термодинамічні розрахунки залежностей вмісту високотемпературного конденсату у продуктах згоряння від технологічних чинників та зовнішніх умов для досліджуваних сумішей.

Список використаних джерел

- [1] А. А. Шидловский, А. И. Сидоров, и Н. А. Силин, *Пиротехника в народном хозяйстве*. Москва, Россия: Машиностроение, 1978.
- [2] Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Л. Я. Кашпоров и др., *Металлические горючие гетерогенных конденсированных систем*. Москва, Россия: Машиностроение, 1976.
- [3] Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Н. И. Зарипов и др., *Окислители гетерогенных конденсированных систем*. Москва, Россия: Машиностроение, 1978.
- [4] Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Л. Я. Кашпоров и др., *Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем*. Москва, Россия: Машиностроение, 1982.
- [5] В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. И. Заика, И. В. Яценко, и В. В. Цыбулин, *Процессы горения металлизированных конденсированных систем*. Киев, Украина: Наукова думка, 2008.
- [6] О. В. Кириченко, П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, та Ю. Г. Лега, *Основи*

- пожежної безпеки піротехнічних нітратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів. Київ, Україна: Наукова думка, 2012.
- [7] А. В. Молодык, "История развития научно-технического направления "Оптические головки самонаведения", на 2-й Укр. наук.-техн. конф. Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: зб. тез доп. Київ: Арсенал, 2016.
- [8] А. В. Молодык, Н. И. Носов, Г. А. Смоляр, и Д. В. Лозбин, "Опыт и перспективы решения теплофизических проблем создания оптико-электронных специзделий ИК-техники", на 2-й Укр. наук.-техн. конф. Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: зб. тез доп. Київ: Арсенал, 2016.
- [9] Л. П. Вогман, и В. В. Лепесий, "Требования пожарной безопасности к пиротехническим изделиям бытового назначения", *Пожаровзрывобезопасность*, № 4, с. 51-57, 1998.
- [10] Л. П. Вогман, В. А. Зуйков, В. Е. Татаров, и В. В. Лепесий, "Разработка рекомендаций по обеспечению пожарной безопасности фейерверочных пиротехнических изделий", *Пожаровзрывобезопасность*, № 3, с. 24-41, 2002.
- [11] ДСТУ 4105 – 2002. *Вироби піротехнічні побутові. Загальні вимоги безпеки*. Затверджено наказом Держстандарту України від 12.06.2002 р., № 356.
- [12] СТО 4. 3. 1 – 2003. *Изделия пиротехнические. Правила безопасности при обращении с пиротехнической продукцией*. Сергиев-Посад: Репид-фейерверк, 2013.
- [13] СТО 4. 3. 2 – 2003. *Изделия пиротехнические. Порядок и правила организации и проведения фейерверков*. Сергиев-Посад: Репид-фейерверк, 2013.
- [14] ДСТУ 4316 – 2004. *Вироби піротехнічні побутового призначення. Вимоги пожежної безпеки і методи випробувань*. Затверджено наказом Держстандарту України від 05.07.2004 р., № 130.
- [15] Г. Н. Кириллов и др., *Требования пожарной безопасности при обращении пиротехнической продукции. Обзорно-аналитический материал*. Москва, Россия: ВНИИПО и ДНД МЧС России, 2010.
- [16] В. А. Маковей, "Основные требования пожарной безопасности при обращении пиротехнической продукции", *Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность*, № 1-3 (6-8), с. 13-21, 2011.
- [17] В. А. Ващенко, "Оптимізація впливу зовнішніх дій на процеси взаємодії хвилі горіння з металізованими конденсованими системами", *Вісті Академії інженерних наук України*, № 1, с. 31-39, 1995.
- [18] В. А. Ващенко, "Проектування оптимальних технологічних режимів взаємодії хвиль горіння з металізованими конденсованими системами", *Вісті Академії інженерних наук України*, № 2, с. 41-48, 1995.
- [19] В. А. Ващенко, *Высокотемпературные технологические процессы взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами*, Москва, Россия: Деп. в ВИНТИ 07.08.96.
- [20] О. В. Кириченко, В. В. Цыбулин, И. В. Яценко, и В. А. Ващенко, "Моделирование пожаровзрывоопасных режимов горения нитратных систем при применении пиротехнических изделий", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 35-41, 2008.
- [21] О. В. Кириченко, "Моделирование предельных, неустойчивых режимов горения пиротехнических нитратных систем с учетом агломерации металлического горючего", *Науковий вісник УкрНДІПБ*, № 1 (17), с. 78-86, 2008.
- [22] О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, та В. В. Цибулін, "Пожежонебезпечні термовпливи на поверхню металевих корпусів піротехнічних виробів в умовах пострілу та польоту", *Проблеми пожежної безпеки*, № 32, с. 98-112, 2012.
- [23] О. В. Кириченко, "Тепловые воздействия на поверхность металлических обтекателей пиротехнических изделий в условиях выстрела и полета", *Пожаровзрывобезопасность*, № 9, с. 6-11, 2013.
- [24] О. В. Кириченко, "Моделирование процесса нагрева металлических оболочек пиротехнических изделий в условиях внешних термовоздействий", *Чрезвычайные ситуации: образование и наука*, № 2, с. 37-45, 2013.
- [25] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, Є. О. Тищенко, та В. В. Цибулін, "Визначення допустимих режимів нагріву

- піротехнічних сумішей при їх експлуатації", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 5-11, 2018.
- [26] О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, та В. А. Ващенко, "Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій", *Internauka*, № 5/5798, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.inter-nauka.com>.
- [27] О. Dibrova, О. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, and V. Melnyk, "Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions", *Technology audit and production reserves*, no. 1/1 (51), pp. 44-49, 2020.
- [28] В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, В. Д. Акиншин, В. В. Цыбулин, и И. В. Яценко, "Комплекс испытательных установок, моделирующих реальные условия применения пиротехнических нитратосодержащих изделий", *Научовий вісник УкрНДІПБ*, № 1 (19), с. 127-137, 2009.
- [29] Г. Корн, Т. Корн, *Справочник по математике для научных работников и инженеров*, Москва, Россия: Наука, 1984.
- [6] О. V. Kirichenko, P. S. Pashkovskiy, V. A. Vashchenko, and Yu. G. Lega, *Fundamentals of fire safety of pyrotechnic nitrate-containing products in the conditions of external thermal influences*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2012 [in Ukrainian].
- [7] A. V. Molodyk, "The history of the development of scientific and technical direction "Optical homing heads", in *2nd Ukr. Sci. and Tech. Conf. Special instrumentation: state and prospects*: coll. of abstracts. Kiev, Ukraine: Arsenal, 2016 [in Russian].
- [8] A. V. Molodyk, N. I. Nosov, G. A. Smolar, and D. V. Lozbin, "Experience and prospects for solving thermo-physical problems of creating optoelectronic special products for infrared technology", in *2nd Ukr. Sci. and Tech. Conf. Special instrumentation: state and prospects*: coll. of abstracts. Kiev, Ukraine: Arsenal, 2016 [in Russian].
- [9] L. P. Vogman, and V. V. Lepesiy, "Fire safety requirements for household pyrotechnic products", *Pozharovzryvobezopasnost*, no. 4, pp. 51-57, 1998 [in Russian].
- [10] L. P. Vogman, V. A. Zuykov, V. E. Tatarov, and V. V. Lepesiy, "Development of recommendations for ensuring fire safety of fireworks pyrotechnic products", *Pozharovzryvobezopasnost*, no. 3, pp. 24-41, 2002 [in Russian].
- [11] DSTU 4105 – 2002. *Household pyrotechnic products. General safety requirements*. Approved by the order of the State Standard of Ukraine of June 12, 2002, no. 356 [in Ukrainian].
- [12] STO 4. 3. 1 – 2003. *Pyrotechnic products. Safety rules for handling pyrotechnic products*. Sergiev-Posad, Russia: Rapid-feyerverk, 2013 [in Russian].
- [13] STO 4. 3. 2 – 2003. *Pyrotechnic products. The procedure and rules for organizing and conducting fireworks*. Sergiev-Posad, Russia: Rapid-feyerverk, 2013 [in Russian].
- [14] DSTU 4316 – 2004. *Pyrotechnic articles for household use. Fire safety requirements and test methods*. Approved by the order of the State Standard of Ukraine of July 5, 2004, no. 130 [in Ukrainian].
- [15] G. N. Kirillov et al., *Fire safety requirements for handling pyrotechnic products. Review and analytical material*. Moscow,

References

- [1] A. A. Shidlovskii, A. I. Sidorov, and N. A. Silin, *Pyrotechnics in the national economy*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1978 [in Russian].
- [2] N. A. Silin, V. A. Vashchenko, L. Ya. Kashporov et al., *Metallic fuels of heterogeneous condensed systems*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1976 [in Russian].
- [3] N. A. Silin, V. A. Vaschenko, N. I. Zaripov et al., *Oxidants of heterogeneous condensed systems*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1978 [in Russian].
- [4] N. A. Silin, V. A. Vaschenko, L. Ya. Kashporov et al., *Combustion of metalized heterogeneous condensed systems*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1982 [in Russian].
- [5] V. A. Vaschenko, O. V. Kirichenko, Yu. G. Lega, P. I. Zaika, I. V. Yatsenko, and V. V. Tsybulin, *Combustion processes of metallized condensed systems*. Kiev, Ukraine: Naukova dumka, 2008 [in Russian].

- Russia: VNIPO i DND MChS Rossii, 2010 [in Russian].
- [16] V. A. Makovei, "Basic requirements of fire safety when handling pyrotechnic products", *Chrezvychnyye situatsii: promyshlennaya i ekologicheskaya bezopasnost*, no. 1-3 (6-8), pp. 13-21, 2011 [in Russian].
- [17] V. A. Vashchenko, "Optimization of the influence of external actions on the processes of interaction of the combustion wave with metallized condensed systems", *Visti Akademiyi inzhenernykh nauk Ukrayiny*, no. 1, pp. 31-39, 1995 [in Ukrainian].
- [18] V. A. Vashchenko, "Design of optimal technological modes of interaction of combustion waves with metallized condensed systems", *Visti Akademiyi inzhenernykh nauk Ukrayiny*, no. 2, pp. 41-48, 1995 [in Ukrainian].
- [19] V. A. Vashchenko, *High-temperature technological processes of interaction of concentrated energy sources with materials*. Moscow, Russia: Deposited at VINITI 08.07.96 [in Russian].
- [20] O. V. Kirichenko, V. V. Tsybulin, I. V. Yatsenko, and V. A. Vashchenko, "Modeling of fire and explosion hazardous modes of combustion of nitrate systems when using pyrotechnic products", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 4, pp. 35-41, 2008 [in Russian].
- [21] O. V. Kirichenko, "Modeling of limiting, unstable combustion modes of pyrotechnic nitrate systems taking into account the agglomeration of metallic fuel", *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, no. 1 (17), pp. 78-86, 2008 [in Russian].
- [22] O. V. Kirichenko, V. A. Vashchenko, and V. V. Tsybulin, "Fire-hazardous thermal effects on the surface of metal housings of pyrotechnic articles in the conditions of fire and flight", *Problemy pozharnoy bezopasnosti*, no. 32, pp. 98-112, 2012 [in Ukrainian].
- [23] O. V. Kirichenko, "Thermal effects on the surface of metal fairings of pyrotechnic products in the conditions of a shot and flight", *Pozharovzryvobezopasnost*, no. 9, pp. 6-11, 2013 [in Russian].
- [24] O. V. Kirichenko, "Modeling of the heating process of metal shells of pyrotechnic products under conditions of external thermal effects", *Chrezvychnyye situatsii: obrazovaniye i nauka*, no. 2, pp. 37-45, 2013 [in Russian].
- [25] O. V. Kirichenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, Ye. O. Tishchenko, and V. V. Tsybulin, "Determination of permissible modes of heating of pyrotechnic mixtures during their operation", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 2, pp. 5-11, 2018 [in Ukrainian].
- [26] O. S. Dibrova, O. V. Kirichenko, R. B. Motrichuk, and V. A. Vashchenko, "Regularities of influence of technological parameters on fire safety of pyrotechnic nitrate-titanium mixtures in the conditions of external thermal actions", *Internauka*, no. 5/5798, 2020. [Online]. Available: <http://www.inter-nauka.com> [in Ukrainian].
- [27] O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, and V. Melnyk, "Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions", *Technology audit and production reserves*, no. 1/1 (51), pp. 44-49, 2020.
- [28] V. A. Vashchenko, O. V. Kirichenko, V. D. Akinshin, V. V. Tsybulin, and I. V. Yatsenko, "A complex of test installations simulating real conditions for the use of pyrotechnic nitrate-containing products", *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, no. 1 (19), pp. 127-137, 2009 [in Russian].
- [29] G. Korn, and T. Korn, *Handbook on mathematics for scientists and engineers*. Moscow, Russia: Nauka, 1984 [in Russian].

E. P. Kirichenko¹,

e-mail: kirychenkojp@gmail.com

V. V. Kovalychin², *Dr. Tech. Sc., Professor*,

e-mail: ldubzh.lviv@dsns.gov.ua

V. M. Gvozdz¹, *Ph. D., Professor*,

e-mail: chipb@dsns.gov.ua

V. A. Vaschenko³, *Dr. Tech. Sc., Professor*,

e-mail: v.vaschenko@chdtu.edu.ua

S. O. Kolinko³, *Ph. D., Associate Professor*,

e-mail: s.kolinko@chdtu.edu.ua

V. V. Tsybulin³

e-mail: tsybulin22@gmail.com

¹Cherkasy Institute of Fire Safety named by Chornobyl Heroes

of National University of Civil Defense of Ukraine

Onoprienko st., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

²Lviv State University of Life Safety,

Kleparivska st., 35, Lviv, 79007, Ukraine

³Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

RESEARCH OF THE MECHANISM AND DEVELOPMENT OF A MODEL FOR THE DEVELOPMENT OF THE PROCESS OF COMBUSTION OF PYROTECHNIC MIXTURES METAL FUEL + OXIDE OF METAL AT EXTERNAL THERMAL ACTIONS

The aim of the work is to establish the mechanism of combustion of two-component compacted mixtures of magnesium and aluminum powders with metal oxides and to develop a model of their combustion to determine critical ranges of combustion rate of mixtures taking into account external thermal influences.

The analysis of experimental data on physical and chemical processes occurring in different combustion zones of the considered mixtures allows to establish the mechanism of their combustion according to which the process of conversion of the initial mixture into combustion products in the first approximation is stationary, one-dimensional and takes place in the following three most characteristic zones. Zone I is a heated layer in the mixture condensed phase, where chemical conversions can be neglected. Zone II is a reaction zone of the condensed phase of the mixture, in which the solid mixture is converted into a gas containing individual metal particles. Within this zone, oxidant decomposition and vigorous oxidation of metal fuel particles take place. The ignition of metal particles occurs on the combustion surface. Most of ignited metal particles, as a result of their agglomeration, are delayed on the combustion surface until their complete combustion. Heat from burning metal particles is transferred to the depth of the condensed phase. Zone III is a zone of heat release of the gas phase. In this zone, dispersed metal fuel particles are burned in the diffusion mode in the stream of oxidant decomposition products. The heat released is transferred to the condensed phase by thermal conductivity and radiation.

A model of combustion of compacted two-component mixtures of magnesium, aluminum and metal oxides has been developed, which, in contrast to existing models of pyrotechnic nitrate-metal mixtures, takes into account kinetic characteristics of thermal decomposition of the oxidant and high-temperature oxidation, ignition and combustion of metal particles in decomposition products. This allows to more accurately calculate (relative error is reduced to 7... 9 % instead of 10... 15 % in existing models) the dependences of the combustion rate of mixtures on elevated heating temperatures and external pressures for different values of technological parameters (ratio of components, dispersion of metal fuel, nature of metal and oxidant, etc.). The model also allows to determine critical ranges of changes in the rate of combustion in these conditions, exceeding of which leads to accelerated mixtures combustion and explosive destruction of products.

Keywords: *fire safety, pyrotechnic mixtures, thermal influences, combustion processes, combustion models of metallized condensed systems.*

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ СУЧАСНИХ МАШИНОБУДІВНИХ І ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

УДК 621.793

[0000-0003-0998-7588] **В. М. Посувайло**¹, канд. техн. наук,

[0000-0002-5302-3623] **М. В. Шовкопляс**²,

[0000-0001-5222-3810] **М. М. Романів**²,

e-mail: romaniv2809@ukr.net

[0000-0001-9670-1570] **В. Ю. Малінін**³

¹Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79060, Україна

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

³Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України
б-р академіка Вернадського, 36, Київ, 03142, Україна

ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОКРИТТЯМИ

У статті проведено аналіз та порівняння найбільш поширених методів поверхневого зміцнення деталей машин покриттями. Відзначено, що шляхом використання захисних покриттів можна вирішувати низку науково-технічних проблем машинобудування, забезпечуючи комплексне раціональне використання властивостей основи деталі та властивостей матеріалу захисного покриття. Мета дослідження – провести аналіз і порівняння сучасних методів поверхневого зміцнення деталей машин металевими електрохімічними хромовими та оксидними покриттями і встановити тенденції їх розвитку. Для проведення досліджень технологій нанесення електрохімічних хромових покриттів на сталь та алюміній і формування оксидних покриттів на алюмінієвих литих та деформованих сплавах у режимі анодування та плазмоелектролітичного оксидування в електроліті застосували системний підхід і використали бібліографічний метод. Під час досліджень використовували електронні ресурси бібліографічних реферативних баз даних: Scopus, Web of Science, Google Scholar. Досліджено технологічні процеси нанесення металевих електрохімічних хромових покриттів на сталь, мідь та алюміній. Розглянуто процеси електролізу в спокійному та проточному електроліті на основі шестивалентного та тривалентного хрому за різних струмових режимів. Вивчено формування оксидних покриттів на алюмінієвих деформованих, литих сплавах та напилених алюмінієвих шарах, а також магнієвих сплавах. Встановлено, що тверде анодування забезпечує одержання оксидних покриттів меншої товщини порівняно з інноваційним методом – плазмоелектролітичним оксидуванням. Описано хімічні, електро- та плазмохімічні реакції під час утворення шарів оксидних покриттів. Проведено порівняння технологічних режимів нанесення та властивостей сформованих покриттів. Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягає у застосуванні системного підходу до аналізу та порівняння сучасних методів формування металевих електрохімічних хромових та оксидних покриттів і визначенні перспектив їх подальшого вдосконалення. Практична значущість – обґрунтовано раціональний вибір металевих та оксидних покриттів для зміцнення деталей машин.

Ключові слова: технологічний процес, катод, анод, електрохімічне хромове покриття, оксидне покриття, анодування, плазмоелектролітичне оксидування, мікротвердість.

Вступ. Сучасні машини та обладнання експлуатуються в екстремальних умовах за дії високих температур, статичних і динамічних навантажень в агресивних середовищах із вмістом твердих абразивних частинок. Перелічені чинники призводять до інтенсивного корозійно-механічного зношування деталей машин, а їх заміна потребує зупинки дорого-

вартісного обладнання на ремонт, що спричиняє додаткові витрати. Тому пріоритетною задачею машинобудування є забезпечення випуску надійної в експлуатації та конкурентоспроможної на внутрішньому й зовнішньому ринках продукції. Використання традиційних конструкційних матеріалів для виготовлення відповідальних деталей машин не за-

безпечує повною мірою високі вимоги до якості їх робочих поверхонь. У процесі експлуатації машин та обладнання зношуються зазвичай лише тонкі поверхневі шари деталей, які знаходяться в контакті у вузлах тертя, що призводить до виходу з ладу виробу за незначної втрати геометричних розмірів зазначених деталей. Тому для підвищення надійності та довговічності виробів машинобудівного виробництва перспективним є використання функціонально орієнтованих технологій для зміцнення покриттями деталей як на стадії виготовлення нових, так і відновлення під час ремонту зношених деталей.

Проведені дослідження технологічних процесів виготовлення деталей машин показали, що серед різноманіття методів нанесення металевих покриттів найбільш поширеними є електрохімічне хромування й оксидування. У зв'язку з підвищенням вимог до екологічної безпеки гальванічних виробництв та розвитку зелених технологій дослідники в основному зосереджуються на розробці компонентних складів електролітів для нанесення покриттів на основі сполук тривалентного хрому та режимів електролізу взамін шестивалентного хрому, який є токсичним, а також на вдосконаленні технологій електрохімічного хромування деталей у проточному електроліті з використанням електрохімічних комірок, що значно зменшує площу контакту електроліту із навколишнім середовищем.

В останні роки інтенсивно розвиваються нові технології формування оксидних покриттів на металах вентильної групи – плазмоелектролітичним (мікродуговим) оксидуванням, які забезпечують одержання зносостійких і корозійнотривких шарів великої товщини, що забезпечує збільшення обсягів використання алюмінієвих, магнієвих і титанових сплавів у різних галузях промисловості для виготовлення відповідальних деталей машин та обладнання.

Однак у літературі практично відсутні відомості щодо порівняння технологічних режимів нанесення покриттів в електроліті, зокрема для хромування, анодування і плазмоелектролітичного оксидування та властивостей одержаних покриттів.

Мета та задачі дослідження. Провести аналіз і порівняння сучасних методів поверхневого зміцнення деталей машин металевими електрохімічними хромовими та оксидними покриттями і встановити тенденції їх розвитку.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розглянути технології електрохімічного хромування;
- розглянути технології анодування;
- розглянути технології плазмоелектролітичного оксидування.

Методика досліджень. Для проведення досліджень технологій нанесення електрохімічних хромових покриттів на сталь і алюміній та формування оксидних покриттів на алюмінієвих литих і деформованих сплавах у режимі анодування та плазмоелектролітичного оксидування в електроліті застосували системний підхід і використали бібліографічний метод. Під час досліджень використовували електронні ресурси бібліографічних реферативних баз даних: Scopus, Web of Science, Google Scholar.

Виклад основного матеріалу. Для підвищення довговічності деталей машин використовують технологічні методи, які забезпечують формування поверхневих шарів на робочих поверхнях із покращеними фізико-механічними властивостями. Серед функціонально орієнтованих технологій, які забезпечують формування зносо- та корозійнотривких покриттів варто відзначити електрохімічне хромування, анодування та плазмоелектролітне оксидування в електроліті.

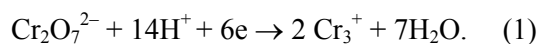
Захисні зносо- та корозійнотривкі покриття на деталях машин повинні задовольняти наступним вимогам [1]:

- 1) бути суцільними, ізолюючи метал від корозивного середовища;
- 2) бути механічно стійкими (зносотривкими) і мати високу адгезію до металу основи;
- 3) добуток розчинності фазових складових покриття не повинен перевищувати 10^{-6} моль/л;
- 4) об'єм захисного покриття повинен бути більшим за об'єм металу, що йде на утворення покриття ($V_{\text{п}}/V_{\text{м}} = 1 \dots 2,5$);
- 5) площа пор у захисному покритті не повинна перевищувати 0,01 %.

Електрохімічне хромування. Найпоширенішим із вищенаведених способів захисту відповідальних деталей машин є хромування. Тверде хромування використовують на промислових компонентах, які повинні працювати за жорстких умов експлуатації: високі температури, навантаження, тертя, абразивне зношування. Тверде хромування забезпечує стійкість до зносу та корозії, а також дозволяє відновити зношені деталі до точних розмірів. Хромові пок-

риття мають низький коефіцієнт тертя, тверді та термостійкі, мають добру адгезію до основи, забезпечують стійкість до корозії [2-4]. Основні промислові вироби, на деталі яких наносять тверді хромові покриття – двигуни, шасі літаків, обладнання для нафтових свердловин, колінчасті вали, пневматичні та гідравлічні циліндри, поршневі, плунжерні та відцентрові насоси, обладнання для виготовлення паперу, пресформи, штампи, бурові долота й обладнання для енергетичної та гірничої промисловості тощо, яке зазнає корозійно-абразивного зношування. Ці покриття повинні мати відповідну твердість, зносостійкість, адгезію, втомну міцність, корозійну стійкість та шорсткість поверхні. Крім цього, є й специфічні характеристики, такі як знос гідравлічного ущільнення, що є актуальним для циліндрів гідроприводів та насосів.

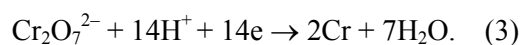
Товщини хромових покриттів досить високі, тому деталі можуть бути покриті кількома шарами. Хром в основному осаджують з висококонцентрованих розчинів. Типовий склад ванни з шестивалентним хромом: хромово кислота $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ – 225–300 г/л; сірчана кислота H_2SO_4 – 2,25–3,0 г/л. Температура електроліту – 45–60 °С. Сила струму – 15,5–31,0 А/дм². Аноди в основному свинцеві з додатками 7 % олова. Після розчинення хромової та сірчаної кислот робочий розчин містить хромвмісні іони $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, CrO_4^{2-} , HCrO_4^- , $\text{O}_3\text{CrOS}_3^{2-}$. На катоді у процесі електролізу проходять одночасно декілька процесів [5]: електрохімічне відновлення Cr^{+6} до Cr^{+3} ; електрохімічне відновлення Cr^{+6} до металевого Cr; електрохімічне відновлення водню; утворення суцільної металеві плівки. Для осадження хрому потрібні сторонні аніони, наприклад SO_4^{2-} . Вони, адсорбуючись на окисненій катодній поверхні, утворюють розчинні комплекси, які переходять в розчин, знімаючи оксидну плівку. Це дає можливість для проходження катодної реакції



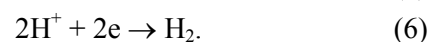
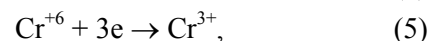
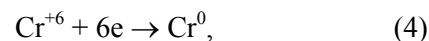
Крім цього, відбувається реакція



Після досягнення певного катодного потенціалу починається реакція електровідновлення хрому



У зоні електроосадження на катоді покриття відбувається проходження кількох спряжених реакцій:



Крім сполук хрому, ванни для твердого хромування також містять каталізатори реакцій осадження. Зазвичай це сульфатні або фторидно-сульфатні каталізатори з низькими концентраціями (~1 % концентрації хромової кислоти). Деталі в процесі хромування наводнюються внаслідок електрохімічних реакцій, що відбуваються на поверхні та в самому покритті. Для покращення функціональних властивостей нанесені покриття потребують відпалу. В роботі [6] дослідили формування хромових покриттів із різних електролітів і вивчили їх структуру. Встановлено, що трибологічні властивості хромових покриттів, отриманих із електролітів, що містять іони тривалентного хрому, нижчі ніж у покриттів, отриманих із електролітів, що містять шестивалентний хром. Показано, що застосування термічної обробки – відпалу за температури 180 °С протягом двох годин – забезпечує підвищення зносостійкості хромового покриття.

Більшість сполук шестивалентного хрому розчинні у воді та є сильними окислювачами. Шестивалентні та тривалентні сполуки хрому різняться за своїм впливом на здоров'я людей та навколишнє середовище, при цьому шестивалентна форма є набагато небезпечнішою. Короточасні наслідки впливу шестивалентного хрому (наприклад крапель хромової кислоти або хроматного пилу) включають подразнення очей, подразнення дихальних шляхів, чхання або сенсibiliзацію; за високих концентрацій гостре вдихання може викликати виразки в носовій перегородці. У чутливих людей вдихання шестивалентного хрому може викликати напад астми. Відомо, що тривале вдихання шестивалентного хрому викликає рак легень, а також може призвести до пошкодження слизової оболонки носа, перфорації носової перегородки й астми [7-9].

Крім санітарних, є ще й певні функціональні недоліки цього методу: це складна підготовка поверхні деталі перед процесом електрохімічного хромування, низька адгезія покриттів, складність видалення домішок із ванни для покриття, проблеми з очищенням розчину для промивання покритих деталей (внаслідок чого утворюється велика кількість шестивалентного хрому), а також перерви або

зміни струму під час нанесення покриття. При шестивалентному хромуванні стоки промивної води необхідно обробляти діоксидом сірки або бісульфатом натрію, щоб зменшити вміст Cr(VI) та перевести його до Cr(III). Кількість шламу, що утворюється в результаті використання шестивалентного процесу, приблизно в 30 разів більша, ніж під час тривалентного процесу. Екологічна небезпека процесу змусила до пошуків заміни шестивалентного хромування, хоча самі покриття мають високі функціональні властивості, зокрема, високу твердість 1000 HV, товщину – 250 мкм, незначно понижують втомну міцність вихідних матеріалів та можуть бути поверхнево оброблені обкочуванням [10]. В праці [11] показана роботоздатність хромованих штоків поршневих насосів двосторонньої дії в напружено-деформованому стані. Перспективним методом заміни шестивалентного хромування є тривалентне хромування. Тривалентний хром нетоксичний, нешкідливий та не є окислювачем. Набагато легше дотримуватись вимог щодо якості повітря. Вплив тривалентного хрому на порядок нижчий. Під час тривалентного хромування значно зменшуються витрати на утилізацію електроліту. Утворення осаду гідроксиду зменшується в 10–20 разів, оскільки тривалентний хром зазвичай працює при концентраціях хрому приблизно 4–20 г/л, а у ваннах для шестивалентного хромування – 150–300 г/л. Воду, що використовується для промивання деталей після хромування необхідно очищати. Крім того, тривалентне хромування має низку технічних переваг. Ванна для тривалентного хромування не чутлива до змін струму. Допускається незначна кількість хлоридів сульфатів на поверхні деталей, яка залишається з попередніх операцій. А внесення хлоридів сульфатів порушує баланс каталізатора в шестивалентному процесі хромування.

Особливості процесу тривалентного хромування міді та сталі викладені відповідно в працях [12, 13]. Для процесу тривалентного хромування використовували імпульси катодної та анодної полярності з періодом релаксації між ними. Для хромування були використані як плоскі зразки, так і труби різного діаметра та довжин. Процес відбувався в рухомому електроліті, що рухався по внутрішній поверхні труб, який перекачувався насосом із резервуара з електролітом. Це дозволило моделювати та оптимізувати технологічні пара-

метри процесу тривалентного хромування внутрішніх поверхонь і розробити склад робочої електролітичної ванни для проточного хромування [13]. Нанесено покриття з тривалентного хрому на плоскі зразки та внутрішні поверхні сталейних труб. Вибрано оптимальні діапазони (32–35 А/дм²) густин струмів і частотні характеристики, за яких утворюються хромові покриття та тривалість катодних та анодних імпульсів. Хромові покриття отримано за різних частотних параметрів за густини струму 35 А/дм². Проведено дослідження впливу масштабного фактора зразків на параметри процесів. Проведено аналіз впливу діаметрів і довжини сталевих труб на якість покриттів з тривалентного хрому. Досліджено адгезію, зносостійкість і твердість покриттів. Для зменшення впливу водню зразки після хромування відпалювали за температури 190 °С протягом 24 годин. Покриття, отримані методом тривалентного хромування порівняно з шестивалентними, показали, що у них дещо нижча твердість, але інші експлуатаційні параметри практично не поступаються шестивалентному хромуванню.

Випробовування на втомну міцність взірців хромованої сталі в спокійному електроліті та анодно-струминним методом показали незначне зменшення границі втомної міцності [14].

У дослідженні [15] побудовано математичну модель процесу, на основі якої були розраховані оптимальні значення технологічних параметрів процесу хромування для отримання максимальної мікротвердості, мінімального зношування. Встановлено, що для забезпечення високих експлуатаційних показників деталей з хромовим покриттям оптимізацію слід проводити за величиною мінімального зносу. Визначено оптимальні технологічні параметри процесу: масове співвідношення концентрацій компонентів $C = 79,5$; густина струму $i = 133,5$ А/дм²; швидкість потоку електроліту в електрохімічній комірці $v = 114,7$ см/с; температура електроліту $T = 59,3$ °С.

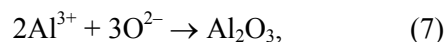
Аналіз літературних джерел, присвячених електрохімічному хромуванню в проточному електроліті [12–15], показав, що покриття наносять за більш високих густин струму, і водночас забезпечуються більш рівномірне нанесення шару покриття з низькою шорсткістю, а також більш висока швидкість нанесення покриття та підвищений вихід хрому за струмом.

Хромування широко застосовується також і для захисту алюмінієвих сплавів [16]. Гальванічне хромування хоча й є екологічно небезпечним, все ще посідає важливе місце, особливо у літако- та ракетобудуванні, оскільки хромові покриття мають високі функціональні властивості. Крім цього, активно розробляються також нові, більш екологічно безпечні, методи зміцнення алюмінієвих сплавів, наприклад анодуванням.

Метод твердого анодування. Алюмінієві сплави мають високу питому міцність та поліпшені ливарні властивості, низьку питому вагу і температуру плавлення та знайшли широке застосування в автомобіле-, авіабудуванні, ракетобудуванні, поліграфічній і текстильній промисловості. Проте цим сплавам притаманна низька корозивна тривкість та зносотривкість. У промисловості для відповідальних деталей в основному використовуються високоміцні алюмінієві сплави з великою кількістю легувальних елементів, наприклад цинку (Zn), магнію (Mg), міді (Cu) і кремнію (Si). Зміцнення сплавів проводять шляхом термічної обробки, що приводить до формування складної мікроструктури, яка містить інтерметаліди та включення різних фаз. Додавання легуючих елементів істотно підвищує механічні властивості сплавів, але для корозійної тривкості основи має шкідливі наслідки. Це особливо яскраво проявляється на сплавах системи Al–Cu. Різниця потенціалів між локальними ділянками під час потрапляння електропровідного розчину корозивного середовища призводить до утворення мікрогальванічних елементів і вибіркового розчинення більш активної (анодної). Найпоширенішим типом корозії алюмінієвих сплавів є точкова корозія, а самі сплави мають невисоку твердість. Для підвищення фізико-механічних властивостей сплавів необхідно використовувати захисні покриття. Найчастіше використовують способи штучного вирощування оксиду на поверхні алюмінію – анодування в електроліті [17-19].

Тверде анодування базується на використанні високої спорідненості алюмінію до кисню. Анодування – це електрохімічний процес, в якому алюмінієва основа штучно окислюється і на ній утворюється товста оксидна плівка. Свою назву процес отримав від того факту, що алюміній використовується як анод в електролітичній комірці. На анод подається додатна, а на катод (нержавіюча сталь) –

від’ємна напруга. Під час підведення напруги на поверхні алюмінію утворюються катіони алюмінію (Al^{3+}), а на межі розділу метал–електроліт формується оксид алюмінію, який утворюється за такими реакціями:



Ці процеси наочно ілюструються схемою [20], зображеною на рисунку 1.

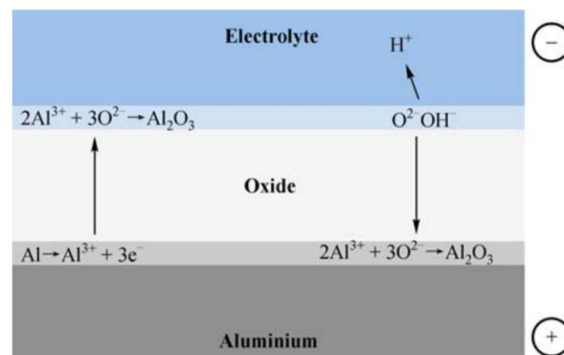


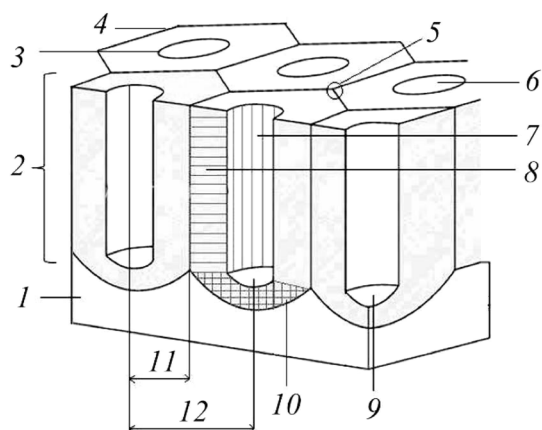
Рисунок 1 – Схема утворення оксиду алюмінію під час анодування [20]

Кисень O^{2-} та радикали $\text{OH}^\cdot$ утворюються внаслідок гідролізу води, оскільки електронна провідність оксиду алюмінію дуже низька, а провідність електроліту та алюмінію висока. Основний спад напруги відбувається власне на оксиді. Це призводить до формування високої електричної напруженості поля 10^6 до 10^7 В/м, яка є достатньою для забезпечення росту оксиду внаслідок іонної міграції. Оскільки алюміній анодується у водному електроліті, адсорбована вода на аноді буде розкладатись, утворюючи негативно заряджені іони O^{2-} та OH^- . Ці аніони мігрують у напрямку до позитивно зарядженої анодної підкладки. Залежно від напруженості електричного поля, складу та температури електроліту іони оксиду алюмінію будуть безпосередньо виходити в електроліт. Це призводить до формування характерної для анодних покриттів поруватої оксидної структури. Ефективність перетворення і, отже, кінцева морфологія плівки залежатимуть від балансу між зростанням оксиду та розчиненням оксиду (через прямий викид і хімічну атаку агресивним електролітом). Розробці умов синтезу анодних покриттів присвячено велику кількість праць, в яких розглянуто вплив складу електролітів, температури, напруг та їх зміни на товщину, склад, розміри пор, корозійну і зносостійкість анод-

них покриттів. Одним із технологічно простих та дешевих методів, який дозволяє формувати зносостійкі плівки на алюмінії, є тверде анодування. Для нього характерним є анодування в сірчано-кислих електролітах за понижених температур [17, 21]. Однак цей метод має свої недоліки: поверхневі шари мають низьку твердість (500 HV) та зносотривкість.

Оксидний шар на алюмінії складається з тонкого бар'єрного шару, розташованого на межі поділу метал-анодний шар, зовнішньої пористої ділянки з циліндричними порами, що виходять з поверхні анодного шару до бар'єрного. Анодний шар містить щільно розташовані стовпчасті шестикутні комірки з центральною циліндричною порою (рисунк 2) [21].

Оксидний шар на поверхні алюмінієвих сплавів формується у вигляді стовпчиків із сильно гідратованого оксиду алюмінію $Al_2O_3 \cdot nH_2O$. Кількість молекул у шарі визначається режимом його формування. За анодування в сірчано-кислотному електроліті діаметр пори типової анодної комірки становить ~25 нм, а бар'єрний шар завтовшки 10...30 нм. Вихід продуктів синтезу зсували у бік виходу $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ шляхом збільшення концентрації кисню в електроліті [22], зокрема, вводячи кисень, перекис водню тощо в зону реакції, а також охолоджуючи електроліт, щоб збільшити швидкість росту, товщину оксиду, його твердість та зносотривкість.



1 – алюміній; 2 – Al_2O_3 ; 3 – пора; 4 – комірка;
5 – потрійна точка; 6 – гирло пори; 7 – стінка пори;
8 – стінка комірки; 9 – основа пори;
10 – бар'єрний шар; 11 – радіус комірки;
12 – відстань між порами

Рисунок 2 – Схематичне зображення анодного шару на алюмінії [21]

Встановлені залежності товщини покриттів від концентрації перекису водню та озону в електроліті наведено на рисунку 3 [22].

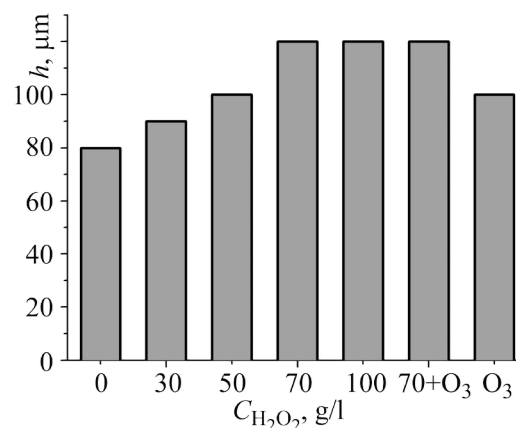


Рисунок 3 – Залежність товщини анодного шару від концентрації H_2O_2 в базовому електроліті [22]

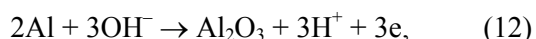
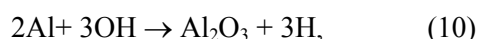
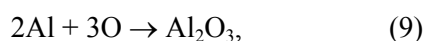
Показано [22], що оптимальний вміст перекису водню в електроліті не повинен перевищувати 30 г/л. За цієї концентрації мікротвердість покриття зростає з 360 HV до 680 HV. Додаткове підвищення мікротвердості отримують термічною обробкою покриттів, а підвищення корозійної тривкості – додатковим заповненням пор оксидами хрому. Максимальна мікротвердість анодованих покриттів сягає 1000 HV.

Плазмоелектролітне оксидування. Ще одним інноваційним способом отримання зносо- та корозійнотривких оксидних покриттів є плазмоелектролітне оксидування (ПЕО), що дозволяє формувати захисні оксидокерамічні покриття на вентильних металах (Al, Ti, Zr, Mg), які утворюються внаслідок прикладання анодної напруги до непровідної оксидної плівки. Покриття формують на компактному алюмінії та його сплавах, на литих алюмінієвих сплавах, магнії, напиленому шарі алюмінієвого покриття на компакту основу [23, 24]. Метод ПЕО є подальшим розвитком вищепри описаного методу анодування, за якого внаслідок взаємодії металу з електролітом під дією електричного струму (без виникнення електричного пробоя) формується тонка оксидна плівка. Оксидні покриття, отримані методом ПЕО, мають, на відміну від анодованих, полікристалічну структуру, товсті, тверді з високою адгезією до основи та діелектричними властивостями. Позитивною характеристикою методу ПЕО є використання екологіч-

но чистих лужних електролітів. Як електроліти використовують водні розчини лугів або кислот. Особливо широко ці методи досліджені для формування зносо- та корозійнотривких покриттів на алюмінієвих сплавах. Оксидне покриття формують в електролітній плазмі за прикладання напруги до зразка, зануреного в робочий електроліт, і до електрода, яким зазвичай слугує ванна, виготовлена із нержавіючої сталі. Під час ПЕО за перевищення напруги пробою діелектричної плівки (понад 100 В) на поверхні зразків формуються іскрові розряди, в каналах яких проходить синтез високотемпературних фаз оксиду алюмінію.

У праці [25] розроблено модель синтезу оксидокерамічного покриття в розрядному каналі системи метал–електроліт, схему якої зображено на рисунку 4.

Формування оксиду може проходити як за прямими реакціями взаємодії алюмінію з киснем та радикалами $\text{OH}^\cdot$ [26]:



так і через проміжні сполуки AlO , Al_2O , AlO_2 та Al_2O_2 :

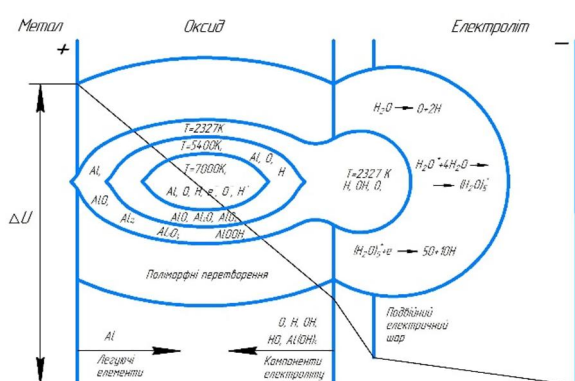
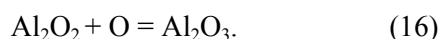
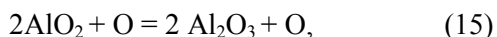
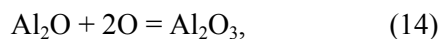
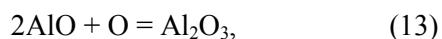


Рисунок 4 – Схематичне представлення процесу синтезу Al_2O_3 у розрядному каналі [25]

На базі теоретичних та експериментальних досліджень процесу ПЕО було запропоновано ідею збільшення виходу продуктів реакцій шляхом додаткового введення в склад

електроліту H_2O_2 , яку підтверджено результатами низки досліджень [27, 28].

Останнім часом широко застосовується формування захисних та зносо- та корозійнотривких покриттів на алюмінієвих сплавах у різних електролітах та на різних електричних режимах. У праці [29] досліджено процес старіння лужно-силікатних електролітів і втрату їх роботоздатності. З часом використання у них зменшується концентрація носіїв зарядів, особливо K, Na, Si. Вони відкладаються в зовнішньому шарі покриття, зменшується швидкість росту оксидного покриття, хоча зростають вміст $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ та концентрація гідрооксидів алюмінію. Також оксидні покриття, отримані в старих електролітах, мають меншу поруватість, яка є однією з найважливіших характеристик захисної дії цих покриттів. В дослідженні [30], використовуючи багатороздільну функцію релевантності для локалізації та подальшої сегментації поверхневих об'єктів оксидно-керамічних покриттів, запропоновано експрес-метод визначення розмірів пор та їх кількості.

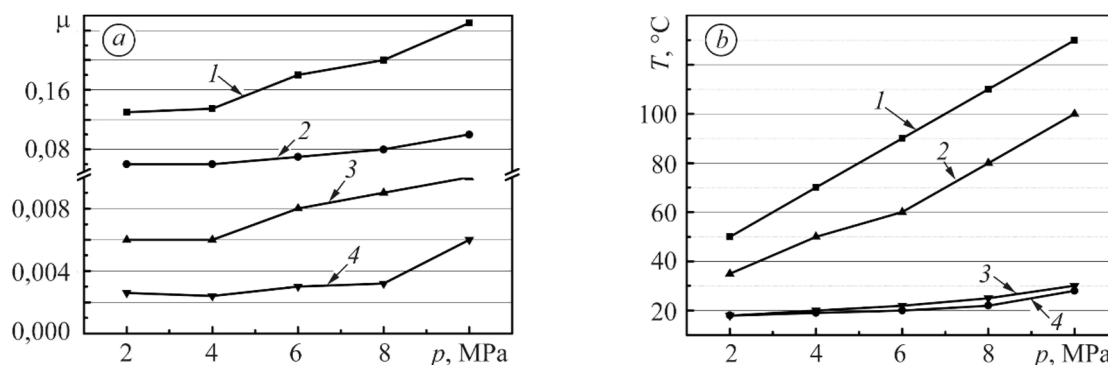
У праці [31] досліджено вплив складу висококонцентрованих лужно-силікатних електролітів з додатками фосфату та гліцерину на якість шарів ПЕО на магнієвому сплаві AZ31. Також розглянуто вплив ультразвуку, підведеного в електролітну ванну. Процес контролювали шляхом запису електричних змінних процесу за допомогою реєстратора перехідних процесів та спостереження за явищами розряду на поверхні зразка за допомогою швидкісної цифрової камери. Дослідження проводилося на основі плану експериментів. Розглянуто вплив зміни технологічних параметрів процесу на товщину, твердість та корозійну стійкість покриттів.

В дослідженні [32] встановлено, що товщина сформованих ПЕО покриттів на сплаві Д16 в лужному електроліті майже прямолінійно змінюється з часом обробки. Протягом ПЕО на сплаві Д16 після 10 хв синтезу формується покрив товщиною 8...12 мкм, після 60 хв – 50...70 мкм, а після 120 хв – товщина покриття зростає до 80...120 мкм. Встановлено, що оксидокерамічні покриття товщиною від 50 мкм до 70 мкм, сформовані за 60 хв, мають найвищу корозійну тривкість в 3 %-му розчині NaCl у воді, що зумовлено найменшою кількістю та густиною дефектів порівняно з покриттями товщиною ~ 8...12 мкм та ~ 80...120 мкм.

Автори [32] пояснюють це тим, що зростання часу синтезу до 60 min спричиняє перехід мікроіскрового розряду в іскровий, за якого температура плазми становить 6000...8000°K, кількість розрядів зменшується, проте зростає їхня тривалість. Утворюються пори невеликого діаметра. Після 100 хв синтезу потужність розрядів суттєво зростає, іскровий режим переходить в мікродуговий: кількість розрядів зменшується, збільшується їхня тривалість, зростають розміри та знижу-

ється температури плазми до 5000...6000 K. Внаслідок цього формуються пори більшого діаметра. Крім цього, на поверхні оксидокераміки можуть утворюватися тріщини.

У праці [33] досліджено трибологічну поведінку вуглецевих матеріалів у парах із оксидним покриттям, сформованим на алюмінієвому сплаві Д16Т. Як мастило використовували: мінеральну оливу І-20; мінеральну оливу І-20 із додатком водного розчину гліцерину (рисунк 5).



1, 3 – сталь 45; 2, 4 – чавун СЧ 21-40; 1, 2 – мінеральна олива І-20; 3, 4 – відповідно із додатком 1 % та 2,5 %-го водного розчину гліцерину

Рисунок 5 – Усереднені значення коефіцієнта тертя (а) та температури триборозігріву (б) у фрикційних парах оксидне покриття – залізовуглецеві сплави за різних контактних навантажень в мастильних середовищах [33]

Встановлено, що за фрикційної взаємодії сталей із оксидним покриттям в оливо-гліцериновій суміші реалізуються режими вибіркового перенесення. Виявлено, що такі контактні трибопари роботоздатні до питомих навантажень, вищих за 10 МПа. Встановлено, що тут різко знижуються не тільки знос, але й коефіцієнт тертя та температура триборозігріву контактних пар (час випробувань за кожного навантаження – 4 h). Так, коефіцієнт тертя сталі 45 у парі з оксидним покриттям зменшується в ≈ 40 разів, а в парі із чавуном – в ≈ 15 разів, водночас температура триборозігріву знижується в ≈ 4 рази [33]. Проведено аналіз фазового складу оксидокерамічних покриттів. Встановлено, що для оксидних покриттів, синтезованих на сплаві Д16Т, мікротвердість становить від 18 ГПа до 20 ГПа. Це пов'язано з високим вмістом у складі покриття високотемпературної фази α - Al_2O_3 ($\sim 70\%$).

Досліджено [34] вплив легування алюмінієвих сплавів міддю, магнієм, кремнієм, цинком та літієм на фазовий вміст, товщину

та мікротвердість оксидно-керамічних покриттів, сформованих ПЕО. Встановлено, що усі ці покриття складаються з α -, γ - та δ -фаз Al_2O_3 . У разі легування кремнієм утворюється також Al_2SiO_5 . Товщина оксидного покриття досягає максимум 500 мкм.

Обговорення результатів. Розглянуто три технологічні методи формування захисних покриттів на деталях зі сталей та алюмінієвих сплавів: електрохімічне хромування, анодування та плазмоелектролітичне оксидування. Кожен із цих методів має як низку переваг, так і певні недоліки. Технологічні режими для різних процесів формування покриттів та фізико-механічні властивості цих покриттів наведено в таблиці 1.

У зв'язку з підвищенням вимог до екологічної безпеки і розробкою зелених технологій перспективними є дослідження, спрямовані на заміну електрохімічного хромування в електролітах із вмістом сполук шестивалентного хрому [15] на більш безпечне – на основі сполук тривалентного хрому [13].

Таблиця 1 – Порівняння різних технологічних процесів формування покриттів та їх фізико-механічних властивостей

Показник	Електрохімічне хромове покриття			Оксидне покриття	
	нанесене в спокійному електроліті [5], [ГОСТ 9305-84]	нанесене в проточному електроліті [15]	нанесене в проточному електроліті [13]	тверде анодування [17, 20, 21]	плазмо-електролітичне оксидування [24]
Характеристика електроліту	Сильно-токсичний, Cr(VI)	Сильно-токсичний, Cr(VI)	Низько-токсичний, Cr(III)	Сильно-токсичний, H ₂ SO ₄	Низько-токсичний, силікатний
Напруга, В	4–12	4–15	4–12	<90	<1000
Густина струму, А/дм ²	45–60	60–150	32–35	2,5–5	10–30
Швидкість росту покриття, мкм/хв	0,3–0,7	0,6–1,8	0,5–1,7	0,6–1,1	0,6–1,8
Товщина покриття, мкм	100	350	150	20–100	500
Мікротвердість, ГПа	7,4–10,7	11,9	9,5	2,4	18–20

У праці [23] проведено порівняння твердого анодування та мікродугового оксидування, і одержані результати корелюють з результатами нашого дослідження.

Крім вибору матеріалів покриття для захисту деталей машин від корозії та зношування, необхідно проводити розрахунок напружено-деформованого стану покриття із оксидним шаром під дією довільно орієнтованих локальних навантажень для оптимізації міцності товщини шарів цього покриття [35, 36], а також враховувати зміну напруженого стану деталей з покриттями в процесі експлуатації [37, 38].

Дослідниками [39] розглянуто розподіл покриттів за частотою їх нанесення під час зміцнення поверхні деталей машин електрохімічними методами. Результати статистичних досліджень показують однорідність вибірок і виявляють зв'язок між кількістю підприємств, які продають певний вид покриття, тобто частотою нанесення певного виду покриття на деталі в різних країнах світу (США, Японія, Італія, Франція, Німеччина, Великобританія, Іспанія, Канада, Мексика, Росія, ПАР). Перевірки гіпотези про тісний зв'язок між рядами покриттів показали, що виявлено достовірну кореляцію між розподілом покриттів за частотою їх застосування серед усіх країн. На основі отриманих результатів досліджень було складено узагальнений рейтинг частоти використання всіх покриттів за даними різних країн. Металеві покриття розташували в ряд за спадною частотою їх нанесення в такому порядку: Cr > Ni > Zn > Cu > Cd. Результати рейтингу

покриттів показали, що найбільш часто наносять електрохімічними методами металеві хромові та нікелеві покриття, а серед неорганічних неметалевих покриттів – оксидні, а потім фосфатні. Це важливо не лише для розуміння структури ринку покриттів, а й для визначення пріоритетних напрямів проведення науково-технічних досліджень, що узгоджується із результатами наших досліджень.

Висновки. На основі результатів критичного порівняльного аналізу технологій нанесення електрохімічних хромових покриттів на сталь і алюміній та формування оксидних покриттів на алюмінієвих литих та деформованих сплавах у режимі анодування і плазмоелектролітичного оксидування в електроліті можна зробити наступні висновки. Розглянуто процеси електролізу в спокійному електроліті та в проточному електроліті на основі сполук шестивалентного й тривалентного хрому за різних технологічних режимів. Суттєвими перевагами електрохімічного хромування (особливо в проточному електроліті) є висока зносостійкість і незначне зниження межі втомної міцності сталевих деталей. Власне, ці властивості істотно знижені на зразках із анодними й оксидокерамічними покриттями. Крім цього, хромування істотно підвищує зносостійкість та корозійну стійкість деталей. Вивчено формування оксидних покриттів на алюмінієвих деформованих, литих сплавах та напиленних алюмінієвих шарах, а також магнієвих сплавах. Встановлено, що тверде анодування забезпечує одержання оксидних покриттів меншої товщини порівняно

з інноваційним методом – плазмоелектролітичним окисуванням. Тверде анодування найбільш низькозатратний процес і його широко застосовують для обробки поршнів двигунів внутрішнього згоряння та формування покриттів на великогабаритних деталях. Плазмоелектролітичне окисування алюмінієвих сплавів – найбільш енергозатратний технологічний процес, але в ньому найпростіша підготовка поверхні деталей перед синтезом оксидних покриттів, на відміну від усіх досліджених методів. Також за допомогою плазмоелектролітичного окисування можна синтезувати оксидокерамічні покриття з максимальною твердістю 2400 HV, які більш ніж вдвічі підвищують зносостійкість деталей зі сталі. Ще однією суттєвою перевагою цього методу є використання екологічно безпечних електролітів порівняно з іншими процесами нанесення гальванічних покриттів. Вибір методу захисту залежить від матеріалу деталі та умов її експлуатації у складі машини. *Наукова новизна отриманих результатів* дослідження полягає в системному підході до аналізу та порівнянні сучасних методів формування металевих електрохімічних хромових та оксидних покриттів, а також у визначенні перспектив їх подальшого вдосконалення. *Практична значущість* – обґрунтовано раціональний вибір металевих та оксидних покриттів для зміцнення деталей машин.

У подальших дослідженнях планується зосередитись на зниженні енергоємності процесів формування покриттів та їх екологічній безпеці.

Подяка. Дослідження проводилося в рамках проекту, що фінансується Міністерством освіти і науки України за рахунок видатків загального фонду державного бюджету: «Розробка екологічно чистої технології хромування в проточному електроліті довгомірних деталей зі складною топологією поверхні», Д 8-21-П (ПК 0121U109591, 2021–2022 pp.).

Список використаних джерел

- [1] N. D. Tomashov, *Theory of Corrosion and Protection of Metals: The Science of Corrosion*, Boris H. Tyltel and Isidore Geld, Eds. Michigan, USA: Macmillan, 1966.
- [2] Z. Zeng, and J. Zhang, "Electrodeposition and tribological behavior of amorphous chromium-alumina composite coatings", *Surface and coatings technology*, vol. 202, no. 12, pp. 2725-2730, 2008.
- [3] O. V. Safonova, L. N. Vykhodtseva, N. A. Polyakov, J. C. Swarbrick, M. Sikora, P. Glatzel, and V. A. Safonov, "Chemical composition and structural transformations of amorphous chromium coatings electrodeposited from Cr (III) electrolytes", *Electrochimica Acta*, vol. 56, no. 1, pp. 145-153, 2010.
- [4] V. S. Protsenko, and F. I. Danilov, "Chromium electroplating from trivalent chromium baths as an environmentally friendly alternative to hazardous hexavalent chromium baths: comparative study on advantages and disadvantages", *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 16, no. 6, pp. 1201-1206, 2014.
- [5] В. Т. Яворський, О. І. Кунтий, та М. С. Хома, *Електрохімічне нанесення металевих, конверсійних та композиційних покриттів*. Львів: Львівська політехніка, 2000.
- [6] A. Liang, L. Ni, Q. Liu, and J. Zhang, "Structure characterization and tribological properties of thick chromium coating electrodeposited from a Cr (III) electrolyte", *Surface and coatings technology*, vol. 218, pp. 23-29, 2013.
- [7] B. H. Alexander, H. Checkoway, L. Wechsler, N. J. Heyer, J. M. Muhm, and T. P. O'Keeffe, "Lung cancer in chromate-exposed aerospace workers", *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, vol. 38, no. 12, pp. 1253-1258, 1996.
- [8] S. T. Abrahimi, J. M. de Kok, H. Terryn, and J. M. Mol, "Towards Cr(VI)-free anodization of aluminum alloys for aerospace adhesive bonding applications: A review", *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 465-482, 2017.
- [9] Air quality guidelines for Europe, 2nd ed. World Health Organization. Regional Office for Europe. Copenhagen, Denmark, 2000.
- [10] M. Korzynski, A. Pacana, and J. Cwanek, "Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing", *Surface and Coatings Technology*, vol. 203, no. 12, pp. 1670-1676, 2009.
- [11] В. В. Остапович, Л. Я. Роп'як, та А. С. Величків, "Дослідження напружено-деформованого стану вкритої хромовим покривом ділянки штока поршневого насоса двосторонньої дії в умовах

- позаштатного навантаження", *Методи та прилади контролю якості*, №. 2, с. 118-125, 2013.
- [12] L. Sziráki, E. Kuzmann, K. Papp, C. U. Chisholm, M. R. El-Sharif, and K. Havancsák, "Electrochemical behaviour of amorphous electrodeposited chromium coatings", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 133, no. 2-3, pp. 1092-1100, 2012.
- [13] B. Kagajwala, T. D. Hall, M. Inman, E. J. Taylor, B. Griffin, G. Cushnie, R. Taylor, M. Jaworowski, and J. Bonivel, "Functional trivalent chromium electroplating of internal diameters", *Products Finishing*, vol. 1, no. 2, 2013. [Online]. Available: <https://www.pfonline.com/articles/functional-trivalent-chromium-electroplating-of-internal-diameters>. Accessed on: July 17, 2021.
- [14] V. Kvedaras, J. Vilys, V. Čiuplys, and A. Čiuplys, "Fatigue strength of chromium-plated steel", *Materials Science*, vol. 12, no. 1, pp. 16-18, 2006.
- [15] L. Ropyak, and V. Ostapovych, "Optimization of process parameters of chrome plating for providing quality indicators of reciprocating pumps parts", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 5 (80), pp. 50-62, 2016.
- [16] C. F. Oduoza, E. Khan, and T. Sihra, "Chromium electroplating of aluminium alloys using electroless nickel as underlayer", *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, vol. 2, pp. 59-74, 2014.
- [17] И. Н. Францевич, А. Н. Пилянкевич, и А. И. Вольфсон, *Анодные оксидные покрытия на металлах и анодная защита*, Киев, Украина: Наукова думка, 1985.
- [18] A. M. Abd-Elnaiem, and A. Gaber, "Parametric study on the anodization of fabricating nano-pores template", *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 8, pp. 9741-9751, 2013.
- [19] D. R. Gabe, "Hard anodizing – what do we mean by hard?", *Metal Finishing*, vol. 100, no. 11-12, pp. 52-58, 2002.
- [20] M. Paz Martínez-Viademonte, S. T. Abrahami, T. Hack, M. Burchardt, and H. Terryn, "A review on anodizing of aerospace aluminum alloys for corrosion protection", *Coatings*, vol. 10, no. 11, art. no. 1106, 2020.
- [21] J. M. Torrescano Alvarez, "Hard anodic films for aluminium alloys". Ph.D. thesis, Univ. of Manchester, Manchester, UK, 2018.
- [22] M. M. Student, I. M. Pohrelyuk, V. M. Hvozdettskyi, H. H. Veselivska, Kh. R. Zadorozhna, R. S. Mardarevych, and Y. V. Dzioba, "Influence of the composition of electrolyte for hard anodizing of aluminum on the characteristics of oxide layer", *Materials Science*, vol. 57, no. 2, pp. 240-247, 2021.
- [23] X. Lu, C. Blawert, Y. Huang, H. Ovi, M. L. Zheludkevich, and K-U. Kainer, "Plasma electrolytic oxidation coatings on Mg alloy with addition of SiO₂ particles", *Electrochimica Acta*, vol. 187, pp. 20-33, 2016.
- [24] V. Pokhmurskii, H. Nykyforchyn, M. Student, M. Klapkiv, H. Pokhmurska, B. Wielage, T. Grund, and A. Wank, "Plasma electrolytic oxidation of arc-sprayed aluminum coatings", *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 16, no. 5-6, pp. 998-1004, 2007.
- [25] M. D. Klapkiv, "Simulation of synthesis of oxide-ceramic coatings in discharge channels of a metal-electrolyte system", *Materials Science*, vol. 35, no. 2, pp. 279-283, 1999.
- [26] M. D. Klapkiv, O. S. Chuchmarev, P. Ya. Sydor, and V. M. Posuvailo, "Thermodynamics of the interaction of aluminum, magnesium and zirconium with components of an electrolytic plasma", *Materials Science*, vol. 36, no. 1, pp. 66-79, 2000.
- [27] V. M. Posuvailo, V. V. Kulyk, Z. A. Duriagina, I. V. Koval'chuk, M. M. Student, and B. D. Vasylyv, "The effect of electrolyte composition on the plasma electrolyte oxidation and phase composition of oxide ceramic coatings formed on 2024 aluminium alloy", *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 105, no. 2, pp. 49-55, 2020.
- [28] M. M. Student, H. H. Veselivska, O. S. Kalakhan, K. R. Zadorozhna, and Y. Y. Sirak, "Influence of the conditions of plasma-electrolytic treatment of D16T aluminium alloy on its corrosion resistance in 3% NaCl solution", *Materials Science*, vol. 56, no. 4, pp. 550-559, 2021.
- [29] J. Martin, P. Leone, A. Nominé, D. Veys-Renaux, G. Henrion, and T. Belmonte, "Influence of electrolyte ageing on the plas-

- ma electrolytic oxidation of aluminium", *Surface and Coatings Technology*, vol. 269, pp. 36-46, 2015.
- [30] I. B. Ivasenko, V. M. Posuvailo, M. D. Klapkiv, V. A. Vynar, and S. I. Ostap'yuk, "Express method for determining the presence of defects of the surface of oxide-ceramic coatings", *Materials Science*, vol. 45, no. 3, pp. 460-464, 2009.
- [31] F. Simchen, L.-M. Rymer, M. Sieber, and T. Lampke, "Composition of highly concentrated silicate electrolytes and ultrasound influencing the plasma electrolytic oxidation of magnesium", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 19th Chemnitz Seminar on Materials Engineering – 19. Werkstofftechnisches Kolloquium*, March 16–17, 2017. Chemnitz, Germany, vol. 181, art. no. 012040, 2017.
- [32] M. M. Student, I. B. Ivasenko, V. M. Posuvailo, H. H. Veselivs'ka, A. Yu Pokhmurs'kyi, and Ya. Ya. Sirak, "Influence of the porosity of a plasma-electrolytic coating on the corrosion resistance of D16 alloy", *Materials Science*, vol. 54, no. 6, pp. 899-906, 2019.
- [33] M. M. Student, V. M. Dovhunyk, V. M. Posuvailo, I. V. Koval'chuk, and V. M. Hvozdet's'kyi, "Friction behavior of iron-carbon alloys in couples with plasma-electrolytic oxide-ceramic layers synthesized on D16T alloy", *Materials Science*, vol. 53, no. 3, pp. 359-367, 2017.
- [34] H. M. Nykyforchyn, M. D. Klapkiv, and V. M. Posuvailo, "Properties of synthesised in electrolyte plasma oxide-ceramic coatings on aluminum alloys", *Surface and Coatings Technology*, vol. 100-101, pp. 219-221, 1998.
- [35] I. P. Shatskyi, L. Y. Ropyak, and M. V. Makoviichuk, "Strength optimization of a two-layer coating for the particular local loading conditions", *Strength of Materials*, vol. 48, no. 5, pp. 726-730, 2016.
- [36] L. Y. Ropyak, M. V. Makoviichuk, I. P. Shatskyi, I. M. Pritula, L. O. Gryn, and V. O. Belyakovskiy, "Stressed state of laminated interference-absorption filter under local loading", *Functional Materials*, vol. 27, no. 3, pp. 638-642, 2020.
- [37] L. Y. Ropyak, A. S. Velychkovych, V. S. Vytyvtskyi, and M. V. Shovkopliash, "Analytical study of "crosshead - slide rail" wear effect on pump rod stress state", *Journal of Physics: Conf. Series*, vol. 1741, no. 1, art. no. 012039, 2021.
- [38] O. Bazaluk, O. Dubei, L. Ropyak, M. Shovkopliash, T. Pryhorovska, and V. Lozynskyi, "Strategy of compatible use of jet and plunger pump with chrome parts in oil well", *Energies*, vol. 15, no. 15, art. no. 83, 2022.
- [39] E. G. Vinokurov, T. F. Burukhina, and I. S. Kuroshev, "Ranking of metallic and non-metallic coatings in the electrochemical surface treatment sector", *Tsvetnye Metally*, no. 4, pp. 54-58, 2021.

References

- [1] N. D. Tomashov, *Theory of Corrosion and Protection of Metals: The Science of Corrosion*, Boris H. Tytell and Isidore Geld, Eds. Michigan, USA: Macmillan, 1966.
- [2] Z. Zeng, and J. Zhang, "Electrodeposition and tribological behavior of amorphous chromium-alumina composite coatings", *Surface and coatings technology*, vol. 202, no. 12, pp. 2725-2730, 2008.
- [3] O. V. Safonova, L. N. Vykhodtseva, N. A. Polyakov, J. C. Swarbrick, M. Sikora, P. Glatzel, and V. A. Safonov, "Chemical composition and structural transformations of amorphous chromium coatings electrodeposited from Cr (III) electrolytes", *Electrochimica Acta*, vol. 56, no. 1, pp. 145-153, 2010.
- [4] V. S. Protsenko, and F. I. Danilov, "Chromium electroplating from trivalent chromium baths as an environmentally friendly alternative to hazardous hexavalent chromium baths: comparative study on advantages and disadvantages", *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 16, no. 6, pp. 1201-1206, 2014.
- [5] V. T. Yavors'kyy, O. I. Kuntty, and M. S. Khoma, *Electrochemical application of metal, conversion and composite coatings*. L'viv: L'vivs'ka politekhnika, 2000 [in Ukrainian].
- [6] A. Liang, L. Ni, Q. Liu, and J. Zhang, "Structure characterization and tribological properties of thick chromium coating electrodeposited from a Cr (III) electrolyte", *Surface and coatings technology*, vol. 218, pp. 23-29, 2013.

- [7] B. H. Alexander, H. Checkoway, L. Wechsler, N. J. Heyer, J. M. Muhm, and T. P. O'Keeffe, "Lung cancer in chromate-exposed aerospace workers", *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, vol. 38, no. 12, pp. 1253-1258, 1996.
- [8] S. T. Abrahimi, J. M. de Kok, H. Terryn, and J. M. Mol, "Towards Cr(VI)-free anodization of aluminum alloys for aerospace adhesive bonding applications: A review", *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 465-482, 2017.
- [9] Air quality guidelines for Europe, 2nd ed. World Health Organization. Regional Office for Europe. Copenhagen, Denmark, 2000.
- [10] M. Korzynski, A. Pacana, and J. Cwanek, "Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing", *Surface and Coatings Technology*, vol. 203, no. 12, pp. 1670-1676, 2009.
- [11] V. V. Ostapovych, L. Ya. Rop'yak, and A. S. Velychkovich, "Investigation of the stress-strain state of the chrome-plated area of the double-acting piston pump rod under free-load conditions", *Metody ta prylady kontrolyu yakosti*, no. 2, pp. 118-125, 2013 [in Ukrainian].
- [12] L. Sziráki, E. Kuzmann, K. Papp, C. U. Chisholm, M. R. El-Sharif, and K. Havancsák, "Electrochemical behaviour of amorphous electrodeposited chromium coatings", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 133, no. 2-3, pp. 1092-1100, 2012.
- [13] B. Kagajwala, T. D. Hall, M. Inman, E. J. Taylor, B. Griffin, G. Cushnie, R. Taylor, M. Jaworowski, and J. Bonivel, "Functional trivalent chromium electroplating of internal diameters", *Products Finishing*, vol. 1, no. 2, 2013. [Online]. Available: <https://www.pfonline.com/articles/functional-trivalent-chromium-electroplating-of-internal-diameters>. Accessed on: July 17, 2021.
- [14] V. Kvedaras, J. Vilys, V. Čiuplys, and A. Čiuplys, "Fatigue strength of chromium-plated steel", *Materials Science*, vol. 12, no. 1, pp. 16-18, 2006.
- [15] L. Ropyak, and V. Ostapovych, "Optimization of process parameters of chrome plating for providing quality indicators of reciprocating pumps parts", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 5 (80), pp. 50-62, 2016.
- [16] C. F. Oduoza, E. Khan, and T. Sihra, "Chromium electroplating of aluminium alloys using electroless nickel as underlayer", *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, vol. 2, pp. 59-74, 2014.
- [17] I. N. Franczevich, A. N. Pilyankevich, and A. I. Vol'fson, *Anode oxide coatings on metals and anode protection*. Kiev: Naukova dumka, 1985 [in Russian].
- [18] A. M. Abd-Elnaiem, and A. Gaber, "Parametric study on the anodization of fabricating nano-pores template", *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 8, pp. 9741-9751, 2013.
- [19] D. R. Gabe, "Hard anodizing – what do we mean by hard?", *Metal Finishing*, vol. 100, no. 11-12, pp. 52-58, 2002.
- [20] M. Paz Martínez-Viademonte, S. T. Abrahimi, T. Hack, M. Burchardt, and H. Terryn, "A review on anodizing of aerospace aluminum alloys for corrosion protection", *Coatings*, vol. 10, no. 11, art. no. 1106, 2020.
- [21] J. M. Torrecano Alvarez, "Hard anodic films for aluminium alloys". Ph.D. thesis, Univ. of Manchester, Manchester, UK, 2018.
- [22] M. M. Student, I. M. Pohrelyuk, V. M. Hvozdetzkyi, H. H. Veselivska, Kh. R. Zadorozhna, R. S. Mardarevych, and Y. V. Dzioba, "Influence of the composition of electrolyte for hard anodizing of aluminum on the characteristics of oxide layer", *Materials Science*, vol. 57, no. 2, pp. 240-247, 2021.
- [23] X. Lu, C. Blawert, Y. Huang, H. Ovri, M. L. Zheludkevich, and K.-U. Kainer, "Plasma electrolytic oxidation coatings on Mg alloy with addition of SiO₂ particles", *Electrochimica Acta*, vol. 187, pp. 20-33, 2016.
- [24] V. Pokhmurskii, H. Nykyforchyn, M. Student, M. Klapkiv, H. Pokhmurska, B. Wielage, T. Grund, and A. Wank, "Plasma electrolytic oxidation of arc-sprayed aluminum coatings", *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 16, no. 5-6, pp. 998-1004, 2007.
- [25] M. D. Klapkiv, "Simulation of synthesis of oxide-ceramic coatings in discharge channels of a metal-electrolyte system", *Materi-*

- als Science, vol. 35, no. 2, pp. 279-283, 1999.
- [26] M. D. Klapkiv, O. S. Chuchmarev, P. Ya. Sydor, and V. M. Posuvailo, "Thermodynamics of the interaction of aluminum, magnesium and zirconium with components of an electrolytic plasma", *Materials Science*, vol. 36, no. 1, pp. 66-79, 2000.
- [27] V. M. Posuvailo, V. V. Kulyk, Z. A. Duriagina, I. V. Koval'chuk, M. M. Student, and B. D. Vasylyv, "The effect of electrolyte composition on the plasma electrolyte oxidation and phase composition of oxide ceramic coatings formed on 2024 aluminium alloy", *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 105, no. 2, pp. 49-55, 2020.
- [28] M. M. Student, H. H. Veselivska, O. S. Kalakhan, K. R. Zadorozhna, and Y. Y. Sirak, "Influence of the conditions of plasma-electrolytic treatment of D16T aluminium alloy on its corrosion resistance in 3% NaCl solution", *Materials Science*, vol. 56, no. 4, pp. 550-559, 2021.
- [29] J. Martin, P. Leone, A. Nominé, D. Veys-Renaux, G. Henrion, and T. Belmonte, "Influence of electrolyte ageing on the plasma electrolytic oxidation of aluminium", *Surface and Coatings Technology*, vol. 269, pp. 36-46, 2015.
- [30] I. B. Ivasenko, V. M. Posuvailo, M. D. Klapkiv, V. A. Vynar, and S. I. Ostap'yuk, "Express method for determining the presence of defects of the surface of oxide-ceramic coatings", *Materials Science*, vol. 45, no. 3, pp. 460-464, 2009.
- [31] F. Simchen, L.-M. Rymer, M. Sieber, and T. Lampke, "Composition of highly concentrated silicate electrolytes and ultrasound influencing the plasma electrolytic oxidation of magnesium", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 19th Chemnitz Seminar on Materials Engineering – 19. Werkstofftechnisches Kolloquium*, March 16–17, 2017. Chemnitz, Germany, vol. 181, art. no. 012040, 2017.
- [32] M. M. Student, I. B. Ivasenko, V. M. Posuvailo, H. H. Veseliv's'ka, A. Yu Pokhmurs'kyi, and Ya. Ya. Sirak, "Influence of the porosity of a plasma-electrolytic coating on the corrosion resistance of D16 alloy", *Materials Science*, vol. 54, no. 6, pp. 899-906, 2019.
- [33] M. M. Student, V. M. Dovhunyk, V. M. Posuvailo, I. V. Koval'chuk, and V. M. Hvozdet's'kyi, "Friction behavior of iron-carbon alloys in couples with plasma-electrolytic oxide-ceramic layers synthesized on D16T alloy", *Materials Science*, vol. 53, no. 3, pp. 359-367, 2017.
- [34] H. M. Nykyforchyn, M. D. Klapkiv, and V. M. Posuvailo, "Properties of synthesised in electrolyte plasma oxide-ceramic coatings on aluminum alloys", *Surface and Coatings Technology*, vol. 100-101, pp. 219-221, 1998.
- [35] I. P. Shatskyi, L. Y. Ropyak, and M. V. Makoviichuk, "Strength optimization of a two-layer coating for the particular local loading conditions", *Strength of Materials*, vol. 48, no. 5, pp. 726-730, 2016.
- [36] L. Y. Ropyak, M. V. Makoviichuk, I. P. Shatskyi, I. M. Pritula, L. O. Gryn, and V. O. Belyakovskiy, "Stressed state of laminated interference-absorption filter under local loading", *Functional Materials*, vol. 27, no. 3, pp. 638-642, 2020.
- [37] L. Y. Ropyak, A. S. Velychkovych, V. S. Vytvytskyi, and M. V. Shovkoplias, "Analytical study of "crosshead - slide rail" wear effect on pump rod stress state", *Journal of Physics: Conf. Series*, vol. 1741, no. 1, art. no. 012039, 2021.
- [38] O. Bazaluk, O. Dubei, L. Ropyak, M. Shovkoplias, T. Pryhorovska, and V. Lozynskyi, "Strategy of compatible use of jet and plunger pump with chrome parts in oil well", *Energies*, vol. 15, no. 15, art. no. 83, 2022.
- [39] E. G. Vinokurov, T. F. Burukhina, and I. S. Kuroshev, "Ranking of metallic and non-metallic coatings in the electrochemical surface treatment sector", *Tsvetnye Metally*, no. 4, pp. 54-58, 2021.

V. M. Posuvailo¹, Ph. D.,
M. V. Shovkoplias²,
M. M. Romaniv²,
e-mail: romaniv2809@ukr.net
V. Yu. Malinin³

¹Karpenko physico-mechanical institute of the NAS of Ukraine
Naukova st. 5, Lviv, 79060, Ukraine

²Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
Karpatska st. 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine

³G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the NAS of Ukraine
Academician Vernadsky blvd, 36, Kyiv, 03142, Ukraine

COMPARISON OF METHODS OF SURFACE STRENGTHENING OF MACHINE PARTS BY COATINGS

The article analyzes and compares the most common methods of surface hardening of machine parts with coatings. It is noted that by using protective coatings it is possible to solve a number of scientific and technical problems of mechanical engineering, providing a comprehensive rational use of the properties of the base of the part and the properties of the material of the protective coating. The purpose of the study is to analyze and compare modern methods of surface hardening of machine parts with metal electrochemical chrome and oxide coatings and to establish trends in their development. A systematic approach and bibliographic method have been used to study the technologies of electrochemical chromium coatings on steel and aluminum and the formation of oxide coatings on cast and deformed aluminum alloys in the anodizing mode and plasma electrolytic oxidation in the electrolyte. Electronic resources of bibliographic abstract databases, such as Scopus, Web of Science, Google Scholar, have been used in the research. Technological processes of application of metal electrochemical chrome coatings on steel, copper and aluminum have been studied. The processes of electrolysis in quiet and flowing electrolyte based on hexavalent and trivalent chromium under different current regimes are considered. The formation of oxide coatings on aluminum deformed, cast alloys and sprayed aluminum layers, as well as magnesium alloys has been studied. It is established that solid anodizing provides oxide coatings of smaller thickness compared to the innovative method - plasma electrolytic oxidation. Chemical, electro- and plasma-chemical reactions during the formation of oxide coating layers are described. The comparison of technological modes of drawing and properties of the formed coverings is carried out. The scientific novelty of the obtained research results is the application of a systematic approach to the analysis and comparison of modern methods of forming metal electrochemical chromium and oxide coatings and determination of the prospects for their further improvement. Practical significance - a rational choice of metal and oxide coatings to strengthen machine parts is justified.

Keywords: technological process, cathode, anode, electrochemical chromium coating, oxide coating, anodizing, plasma electrolytic oxidation, microhardness.