

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

# ВІСНИК

## ЧЕРКАСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Технічні науки  
Заснований у грудні 1996 р.

3/2022

### 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, професор  
Батраченко О. В., д-р техн. наук, доцент  
Бондаренко М. О., д-р техн. наук, професор  
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, професор  
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, професор  
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:

- АВТОМАТИЗАЦІЯ  
ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ
- ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
- 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](mailto:vtn.chdtu.edu.ua) (подання статей)

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

**3•2022**

**ВІСНИК**

**Черкаського державного**  
**технологічного університету**

**ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

**VISNYK**

**Cherkaskogo derzhavnogo**  
**tehnologichnogo universitetu**

**TECHNICAL SCIENCE**

**3 • 2022**

**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](http://vtn.chdtu.edu.ua); [visnyk.chdtu.edu.ua](http://visnyk.chdtu.edu.ua)**

Затверджено вченою радою  
Черкаського державного  
технологічного університету,  
протокол № 5 від 17.10.2022.

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

## ЗМІСТ

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Базіло К. В., Філімонов С. О., Філімонова Н. В.</i> Розподіл акустичного тиску в ультразвуковій системі інтенсифікації екстракційних процесів.....                    | 5  |
| <i>Титаренко В. С., Тичков Д. В.</i> Імітаційна модель інформаційно-вимірювальної системи електричних характеристик функціональних покриттів електронних пристроїв ..... | 14 |
| <i>Філімонов С. О., Бачеріков Д. С.</i> Конструкція вузла точного дозування в системі впливу рідких добрив .....                                                         | 23 |
| <i>Жайворонок І. С., Коваленко О. В.</i> Вплив основних робочих параметрів стрічкового потоку електронів на якість отриманого мікрорельєфу поверхні оптичного скла.....  | 32 |

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Лавданський А. О., Фауре Е. В., Тинимбаєв С. Т., Скуцький А. Б.</i> Система захищеного інформаційного обміну текстовими даними через радіоканал ISM-діапазону ..... | 41 |
| <i>Ліп'яніна-Гончаренко Х. В.</i> Інтелектуальний метод формування людських ресурсів на короткостроковий проект.....                                                   | 49 |
| <i>Артемук С. І., Микитин І. П.</i> Методи визначення координат джерела акустичного сигналу .....                                                                      | 59 |

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРІЯ,  
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

|                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Кириченко Є. П., Гвоздь В. М., Кириченко О. В., Ковбаса В. О., Ващенко В. А., Бутенко Т. І., Цибулін В. В.</i> Підвищення стійкості процесу горіння піротехнічних сумішей шляхом введення добавок органічних речовин..... | 73 |
| <i>Ящук Л. Б.</i> Моніторинг шкідливих чинників, динаміки і тенденцій тютюнопаління серед української молоді.....                                                                                                            | 84 |

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ  
СУЧАСНИХ МАШИНОБУДІВНИХ І ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Лисенков Е. А., Стрюцький О. В.</i> Електричні властивості полімерних наноккомпозитів на основі поліетиленоксиду та наночастинок срібла в області низьких концентрацій наповнювача..... | 94 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## CONTENTS

### AUTOMATION AND CONSTRUCTION OF DEVICES

|                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Bazilo C. V., Filimonov S. O., Filimonova N. V.</i> Distribution of acoustic pressure in the ultrasonic system of intensification of extraction processes.....                                             | 5  |
| <i>Tytarenko V. S., Tychkov D. V.</i> Simulation model of the information-measuring system of electrical characteristics of functional coatings of electronic devices.....                                    | 14 |
| <i>Filimonov S. O., Bacherikov D. S.</i> Design of the precise dosing unit in the system of influence of liquid fertilizers .....                                                                             | 23 |
| <i>Zhayvoronok I. S., Kovalenko O. V.</i> The influence of the main operating parameters of the ribbon-shaped flow of electrons on the quality of the obtained microrelief on the optical glass surface ..... | 32 |

### INFORMATION TECHNOLOGIES

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Lavdanskyi A. O., Faure E. V., Tynymbaiev S. T., Skutskyi A. B.</i> System for secure information exchange of text data through the radio channel of the ISM band..... | 41 |
| <i>Lipianina-Honcharenko Kh. V.</i> Intelligent method of forming human resources for a short-term project .....                                                          | 49 |
| <i>Artemuk S. I., Mykytyn I. P.</i> Methods of determining the coordinates of the acoustic signal source .....                                                            | 59 |

### CHEMICAL TECHNOLOGIES AND ENGINEERING, ECOLOGICAL SECURITY

|                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Kirichenko E. P., Gvozd V. M., Kirichenko O. V., Kovbasa V. O., Vaschenko V. A., Butenko T. I., Tsybulin V. V.</i> Increase of the stability of the process of pyrotechnic mixtures combustion through the addition of organic substances ..... | 73 |
| <i>Yashchuk L. B.</i> Monitoring of harmful factors, dynamics and trends of smoking among Ukrainian youth .....                                                                                                                                    | 84 |

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

|                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Lysenkov E. A., Strutkyi O. V.</i> Electrical properties of polymer nanocomposites based on polyethylene oxide and silver nanoparticles in the area of low filler concentrations ..... | 94 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

[0000-0002-1571-401X] **К. В. Базіло**, д-р техн. наук, професор,  
[0000-0003-1727-3286] **С. О. Філімонов**, канд. техн. наук, доцент,  
e-mail: s.filimonov@chdtu.edu.ua  
[0000-0003-0136-7587] **Н. В. Філімонова**, канд. техн. наук  
Черкаський державний технологічний університет  
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

## РОЗПОДІЛ АКУСТИЧНОГО ТИСКУ В УЛЬТРАЗВУКОВІЙ СИСТЕМІ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ЕКСТРАКЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

Сьогодні популярнішими стають харчові продукти функціонального призначення, зокрема оздоровчого та профілактичного, з підвищеним вмістом вітамінів, мікроелементів, макроелементів, незамінних амінокислот та біологічно активних речовин. Такі продукти дають людині змогу зберігати своє здоров'я, а також повністю задовольнити фізіологічні потреби в енергії та харчових сполуках, якими користується організм для побудови клітин, органів і тканин.

Екстракція – один із найбільш поширених методів, використовуваних у процесі отримання біологічно активних речовин з рослинної або тваринної сировини. Ефективність екстракції може бути збільшена, використовуючи інтенсифікуючі методи впливу, що застосовуються в процесі екстракції, наприклад ультразвук.

В роботі розглянуто конструкцію і особливості математичного опису ультразвукових систем для інтенсифікації процесу екстракції, принцип дії якого базується на використанні п'єзоелектричних ультразвукових випромінювачів. Побудовано комп'ютерну модель за допомогою пакета програм COMSOL Multiphysics ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції з урахуванням повного набору геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів. В результаті визначено частоту, при якій забезпечуються максимальні амплітуди коливань ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції, що приводить до реалізації найбільш ефективного резонансного режиму роботи системи. Визначено місця розташування максимального акустичного тиску на об'єкт екстракції в ультразвуковій системі для інтенсифікації процесу екстракції при виготовленні концентрованих напоїв функціонального призначення.

**Ключові слова:** п'єзоелемент, ультразвукова система, процес екстракції, акустичний тиск, моделювання.

**Вступ.** В останні десятиліття стан здоров'я населення характеризується негативними тенденціями: скорочується середня тривалість життя, зростає загальна захворюваність. У більшості людей виявляються порушення харчування, обумовлені як недостатнім споживанням харчових речовин, в першу чергу вітамінів, макро- і мікронутрієнтів, повноцінних білків, так і нераціональним їх співвідношенням.

Відомі напої часто містять небезпечні, особливо для здоров'я дітей, барвники, консерванти, підсолоджувачі, поліпшувачі смаку, штучні інгредієнти, що викликають алергічні реакції, порушення обмінних процесів та інші негативні зміни [1].

Серед факторів харчування, що мають особливо важливе значення для підтримки

здоров'я, працездатності й активного довголіття людини, найважливіша роль належить повноцінному і регулярному постачанню організму необхідних мікронутрієнтів: вітамінів, макро- і мікроелементів.

Результати аналізу споживчого вітчизняного ринку свідчать про поступове підвищення попиту на якісні напої різних груп з наявністю у їх складі компонентів з натуральної рослинної сировини. Ці функціональні напої мають підвищену біологічну цінність завдяки вмісту вітамінів, органічних кислот, білків, ефірних олій та інших біологічно активних речовин. Значна частина напоїв має виражену лікувальну дію.

Сьогодні популярнішими стають харчові продукти функціонального призначення, зокрема оздоровчого та профілактичного, з

підвищеним вмістом вітамінів, мікроелементів, макроелементів, незамінних амінокислот та біологічно активних речовин (БАР). Такі продукти дають людині змогу зберігати своє здоров'я, а також повністю задовольнити фізіологічні потреби в енергії та харчових сполуках, якими користується організм для побудови клітин, органів і тканин. Тому саме харчова індустрія на сьогодні є важливою складовою охорони здоров'я і займає особливе місце у сфері інтелектуальної та виробничої діяльності людини [2].

Функціональні харчові продукти – перспективні продукти для збагачення біологічно активними речовинами.

Згідно з Законом України «Про безпеку та якість харчових продуктів» функціональний харчовий продукт – це харчовий продукт, який містить у своєму складі лікарські компоненти та/або може бути використаний для профілактики чи пом'якшення перебігу хвороби людини [3].

**Постановка проблеми.** Екстракція – один із найбільш поширених методів, використовуваних у процесі отримання біологічно активних речовин з рослинної або тваринної сировини.

Ефективність екстракції може бути збільшена, використовуючи інтенсифікуючі методи впливу, що застосовуються в процесі екстракції, наприклад ультразвук [4].

Перевагами ультразвукової екстракції порівняно з іншими способами є: мінімальне застосування ручної праці; скорочення часу технологічного процесу; видалення шкідливих домішок; збільшення виходу екстрактивних речовин.

На сьогодні ультразвукове обладнання недостатньо використовується через високу вартість, вузьку спеціалізацію і низьку ефективність розроблених раніше великогабаритних промислових установок, відсутність малогабаритних високоефективних ультразвукових апаратів для сучасних малих і середніх виробництв, військових частин, індивідуального застосування.

Питання забезпечення населення України якісним обладнанням є важливою складовою забезпечення конституційного права громадян на охорону здоров'я (стаття 49 Конституції України).

Маркетингові дослідження були проведені в рамках Плану реалізації Стратегії розвитку Черкаської області на період 2021 –

2023 рр. [5] на основі положень Державної стратегії регіонального розвитку України на період до 2027 р. [6], відповідно до Порядку розроблення регіональних стратегій розвитку і планів заходів з їх реалізації, а також проведення моніторингу та оцінки результативності реалізації зазначених регіональних стратегій і планів заходів (затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 11.11.2015 № 932 [7]) і з урахуванням процесів державного стратегічного планування розвитку окремих секторів економіки країни та її регіонів, що враховують потреби їх розвитку та необхідність підвищення конкурентоспроможності.

В процесі підготовки Плану реалізації Стратегії максимально застосовувалися принципи ЄС, методологія та інструменти для стратегічного й операційного планування з незначними поправками для відображення особливостей України.

В регіоні наявна потужна база для виробництва сільськогосподарської продукції. Враховуючи це, глибока переробка сільськогосподарської продукції (зокрема готових продуктів харчування), якість і безпека харчових продуктів починають відігравати провідну роль. Окрім того, інноваційні харчові технології та висока якість і безпека харчових продуктів дозволять суттєво полегшити процеси просування таких продуктів як на внутрішніх, так і на зовнішніх ринках.

Ця операційна мета спрямована на стимулювання співробітництва та партнерства науки і бізнесу регіону в харчових технологіях, а також інтеграцію досліджень та інновацій у харчові технології задля високої якості та безпеки продуктів харчування.

Розвиток ультразвукової техніки і технології стримується також низькою інформованістю споживачів про ефективність ультразвукових впливів і відсутністю методичних рекомендацій, що враховують особливості застосування ультразвукових технологій в умовах малих виробництв.

Сучасні ультразвукові технології ґрунтуються на використанні двох властивостей, які мають певні матеріали: п'єзоелектрика та магнітострикція. В роботах [8-10] розглянуто конструкції ультразвукових систем для інтенсифікації біотехнологічних процесів, які містять п'єзоелектричний ультразвуковий генератор, що базується на генерації електричних коливань певної частоти, які матеріал з п'єзоелектричними властивостями (перетво-

рювач) перетворює на механічні коливання. В роботах [11-13] наведено особливості моделювання ультразвукових систем для інтенсифікації кавітаційних процесів, принцип дії яких базується на використанні п'єзоелектричних ультразвукових випромінювачів. Проте розглянуті роботи не об'єднані будь-яким системним підходом, мають характер розрізнених епізодів, на підставі чого можна стверджувати, що сьогодні існує потреба у створенні цілісної методики моделювання п'єзоелектричних перетворювачів, яка могла б використовуватися як теоретична основа розрахунку характеристик і параметрів систем. Таким чином, актуальність розробки фізично змістовних моделей систем з п'єзоелектричними перетвореннями зберігається й нині.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є моделювання ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції за допо-

могою програми COMSOL Multiphysics для визначення місця розташування максимального акустичного тиску на об'єкт екстракції в ультразвуковій системі.

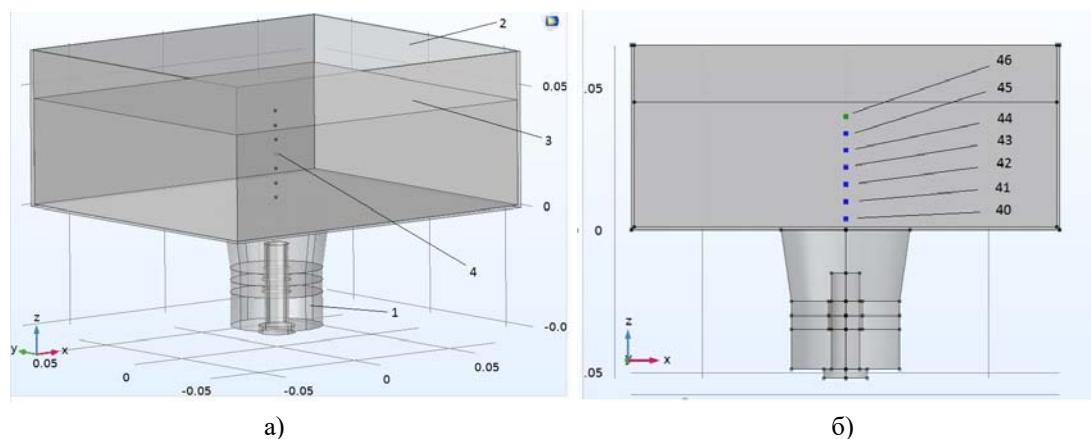
Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- створити віртуальну модель ультразвукової системи за допомогою програми COMSOL Multiphysics;

- визначити резонансні частоти ультразвукової системи;

- визначити акустичний тиск у рідині на визначених резонансних частотах.

**Матеріали та методи.** На рисунку 1 зображено досліджувану аксонометричну модель ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції при виготовленні концентрованих напоїв функціонального призначення.



**Рисунок 1. Аксонометрична модель ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції:** а) загальний вигляд: 1 – ультразвуковий випромінювач; 2 – резервуар, 3 – рідина, 4 – точки, в яких проводиться реєстрація акустичного тиску (40-46, нумерація точок відповідає нумерації у моделі COMSOL Multiphysics); б) вид збоку

Враховуючи технічні особливості п'єзоелектричних ультразвукових випромінюючих систем і всі складнощі, що виникають при їх виготовленні, оптимальним рішенням є використання чисельних методів розрахунку, що реалізуються спеціальними САПР [14].

Для дослідження акустичного тиску під час випромінювання ультразвукових хвиль було проведено чисельне моделювання процесу роботи ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції в програмі COMSOL Multiphysics 5.5.

Відомості про математичну модель, яка враховує мультифізичні процеси, що описуються комбінацією різних рівнянь в частинних похідних, і деякі основні моменти обчис-

лень за допомогою модуля Piezoelectric Effects та інструментів COMSOL's Solid Mechanics and Electrostatics детально наведено в [15, 16]. Аналіз роботи ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції здійснювався в режимі Frequency response. Для визначення акустичного тиску використовувався модуль Pressure Acoustics, Frequency Domain. Для об'єднання наведених вище модулів використовувався мультифізичний зв'язок Acoustic-Structure Boundary.

Як розв'язувач використовувався Direct, в якому був обраний чисельний метод SPOOLES для розв'язку систем лінійних рівнянь з розрідженими матрицями [17].

Розміри резервуара у моделі: довжина – 150 мм, ширина – 135 мм, висота – 65 мм, товщина стінки становить 1 мм. Розміри ультразвукового випромінювача у моделі: діаметр хвилеводу – максимум 55 мм, діаметр хвилеводу – мінімум 45 мм, довжина хвилеводу – 24 мм, товщина відбивача – 12 мм, діаметр п'єзоелементів – 45 мм, загальна довжина – 46 мм. З'єднання резервуару та ультразвукового випромінювача виконувалось за допомогою епоксидного клею. Як матеріал для моделювання п'єзоелектричного двигуна було використано марку п'єзокераміки PZT-4. Марка матеріалу хвилеводу та відбивача ультразвукового випромінювача, а також резервуара відповідає сталі AISI 4340. Як рідина використовувалася вода.

При моделюванні ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції було прийнято тип граничних умов Fixed до верхньої торцевої частини резервуара. Електричний потенціал (Electric potential) 300 В прикладений до зовнішніх сторін п'єзоелементів, а загальний «мінус» (Ground) – до сторін п'єзоелементів, які з'єднані між собою. Поляризація п'єзоелектричних елементів зустрічна.

Принцип роботи ультразвукової системи полягає в наступному. При подачі змінної електричної напруги на п'єзоелементи виникають механічні коливання, які передаються у резервуар з рідиною, в результаті чого у рідині виникає акустичний тиск.

**Чисельні експерименти та результати дослідження.** Важливим кроком для отримання достовірних результатів чисельного моделювання є побудова кінцево-елементної моделі конструкції ультразвукової системи введенням сітки Mesh, від якої істотно залежать отримані результати обчислень. Розрахункова сітка кінцевих елементів Mesh вибиралася з наступними умовами. Використовувалися лагранжеві кінцеві елементи з елементарними базисними функціями другого порядку – Lagrange-Quadratic. Кількість лагранжевих елементів становить 6 на локальну довжину хвилі, яка розповсюджується у конструкції та у воді. Сітка була побудована тетрагональним розбиттям, а досліджувані тривимірні моделі були представлені сукупністю з більш ніж двадцяти тисяч елементів для кожної складової конструкції (рисунок 2).

Оскільки сила акустичного впливу на пряму залежить від вибору робочої (резонанс-

ної) частоти ультразвукового випромінювача, то першим етапом було визначення максимальної амплітуди коливань на частотах у діапазоні від 36 кГц до 43 кГц (використаний ультразвуковий випромінювач розрахований на частоту 40 кГц.). Результати моделювання представлені на рисунку 3.

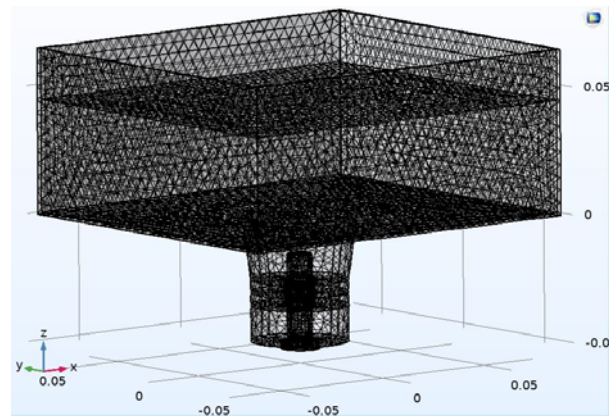


Рисунок 2. Кінцево-елементна модель ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції

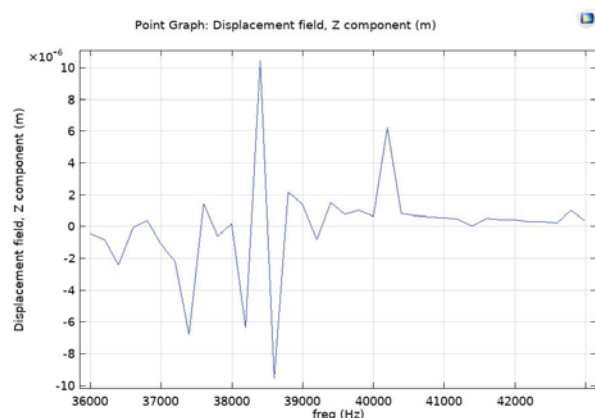
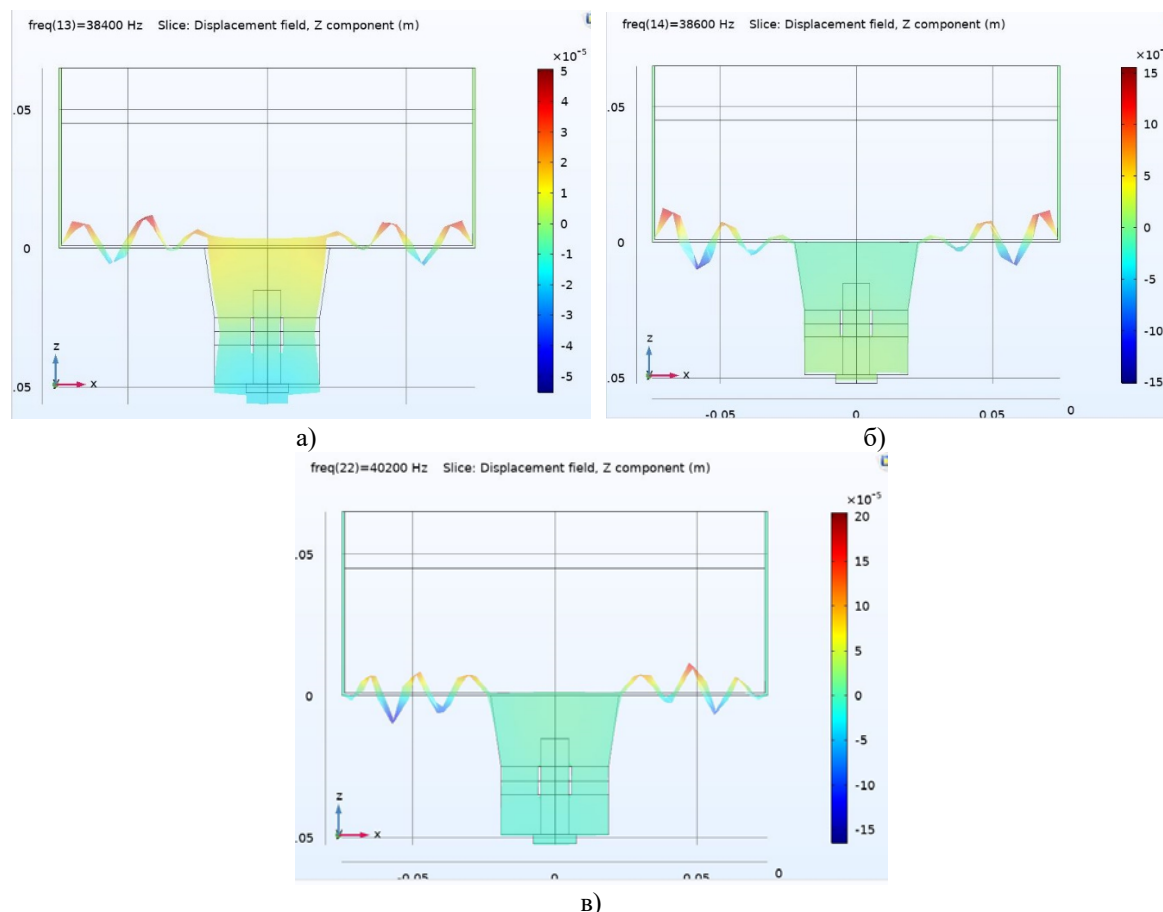


Рисунок 3. Амплітудно-частотна характеристика ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції

З рисунка 3 видно, що максимальна амплітуда коливань відповідає частотам 38,4 кГц, 38,6 кГц та 40,2 кГц. Слід зауважити, що значення амплітуди коливань вище нуля відповідають розтягненню, а нижче нуля – стисненню ультразвукового випромінювача.

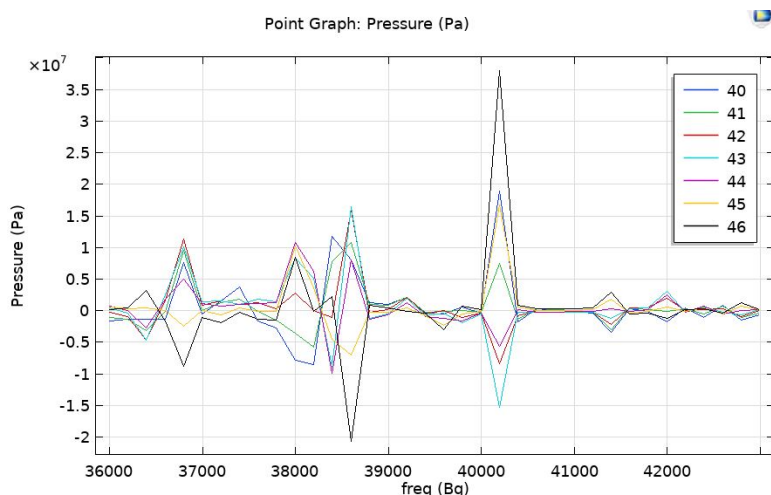
На рисунку 4 за результатами (рисунок 3) представлено наочну деформацію ультразвукової системи на частотах, які відповідають максимальним амплітудам коливань.



**Рисунок 4. Результати чисельного моделювання для визначення резонансної амплітуди коливань ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції в режимі Frequency response на частотах: а) 38,4 кГц; б) 38,6 кГц; в) 40,2 кГц**

**Обговорення результатів.** Визначивши основні резонансні частоти ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції за допомогою мультифізичного зв'язку Acoustic-Structure Boundary, визначимо акустичний тиск у контрольних точках згідно з

рисунком 1. Розподілення акустичного тиску у контрольних точках визначалося в діапазоні частот від 36 кГц до 43 кГц. Розрахункові результати моделювання зображено у графічному вигляді (рисунк 5).

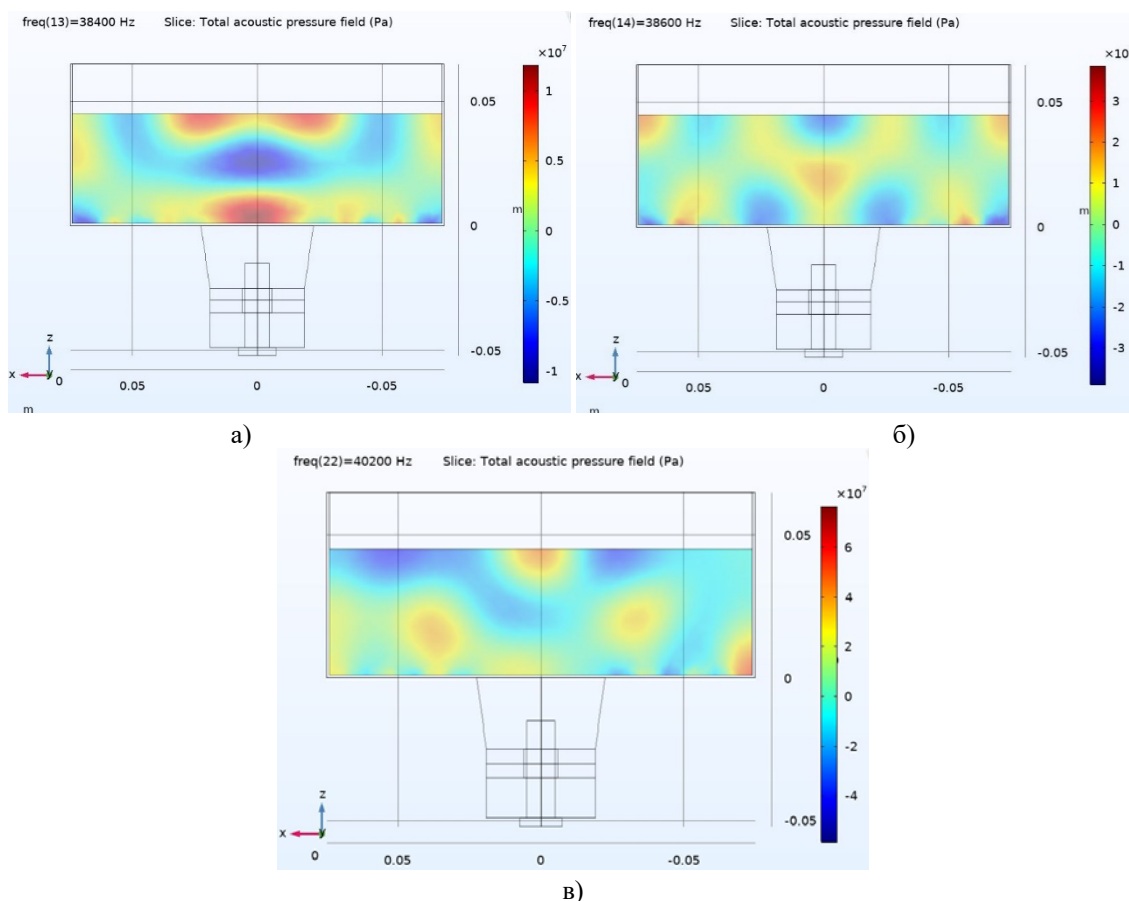


**Рисунок 5. Амплітудно-частотна характеристика акустичного тиску в резервуарі з рідиною ультразвукової системи**

З графіка видно, що максимальний акустичний тиск спостерігається на частотах 38,6 кГц та 40,2 кГц у точках № 40 (перша точка знизу), 45 (друга точка зверху) та 46 (перша точка зверху). Ці результати корелюють з результатами, отриманими для механічного резонансу. Акустичний тиск на частоті 40,2 кГц

практично у два рази більший, ніж на усіх інших частотах. Це означає, що інтенсифікація процесу екстракції буде проходити швидше.

Окрім графічних результатів, у процесі розрахунку було отримано ще й візуалізацію розповсюдження акустичного тиску, яка представлена на рисунку 6.



**Рисунок 6. Результати чисельного моделювання для визначення акустичного тиску в резервуарі з рідиною ультразвукової системи на частотах: а) 38,4 кГц; б) 38,6 кГц; в) 40,2 кГц**

З рисунка 6 (по шкалі справа) видно, що найбільший акустичний тиск сягає  $3.7 \cdot 10^{-7}$  Па при частоті резонансу 40,2 кГц.

Подальші дослідження авторів можуть бути спрямовані на розробку мобільної ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції при виготовленні концентрованих напоїв функціонального призначення, а також на визначення найбільш ефективної геометрії резервуара ультразвукової системи за допомогою пакета прикладних програм COMSOL Multiphysics.

**Висновки.** Розглянуто конструкцію та особливості математичного опису ультразвукових систем для інтенсифікації процесу екстракції, принцип дії якого базується на вико-

ристанні п'єзоелектричних ультразвукових випромінювачів.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні комп'ютерної моделі ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції за допомогою пакета програм COMSOL Multiphysics 5.5 з урахуванням повного набору геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

- визначено частоту, при якій забезпечуються максимальні амплітуди коливань ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції, що приводить до реаліза-

ції найбільш ефективного резонансного режиму роботи системи;

– визначено місця розташування максимального акустичного тиску на об'єкт екстракції в ультразвуковій системі для інтенсифікації процесу екстракції;

– отримані дані можна використовувати при проектуванні пристроїв на основі ультразвукових випромінюючих систем для інтенсифікації процесу екстракції при виготовленні концентрованих напоїв функціонального призначення.

### Список використаних джерел

- [1] Н. О. Стеценко, *Технологія оздоровчих напоїв та фітоконцентратів*. Київ, Україна: НУХТ, 2018.
- [2] А. І. Українець, та Г. О. Сімахіна, *Технологія оздоровчих харчових продуктів*. Київ, Україна: НУХТ, 2009.
- [3] Про внесення змін до Закону України "Про якість та безпеку харчових продуктів та продовольчої сировини", *Відомості Верховної Ради України*, № 50, 2005. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2809-15#Text>. Дата звернення: Жовт. 22, 2022.
- [4] К. В. Базіло, В. М. Заїка, та Ю. Ю. Бондаренко, "Особливості застосування ультразвуку для інтенсифікації біохімічних процесів у фармацевтиці", в *Тези VI Міжнар. наук.-техн. конф. Датчики, прилади та системи – 2017*. Черкаси – Миколаїв – Херсон – Лазурне, 2017, с. 56-57.
- [5] План реалізації Стратегії розвитку Черкаської області на період 2021 – 2023 роки. Черкаси, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://cutt.ly/PlwO8M9>. Дата звернення: Жовт. 22, 2022.
- [6] Кабінет Міністрів України (2020, серп. 05). *Постанова № 695, Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021 – 2027 роки*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-п#Text>. Дата звернення: Жовт. 22, 2022.
- [7] Кабінет Міністрів України (2015, Листоп. 11). *Постанова № 932, Про затвердження Порядку розроблення регіональних стратегій розвитку і планів заходів з їх реалізації, а також проведення моніторингу та оцінки результативності реалізації зазначених регіональних стратегій і планів заходів*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/932-2015-п#Text>. Дата звернення: Жовт. 22, 2022.
- [8] K. G. Zinoviadou, C. M. Galanakis, M. Brnčić, et al., "Fruit juice sonication: Implications on food safety and physicochemical and nutritional properties", *Food Research International*, vol. 77, part 4, pp. 743-752, 2015. doi: 10.1016/j.foodres.2015.05.032.
- [9] M. Abid, S. Jabbar, T. Wu, M. M. Hashim, et al., "Effect of ultrasound on different quality parameters of apple juice", *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 20, iss. 5, pp. 1182-1187, 2013. doi: 10.1016/j.ultsonch.2013.02.010.
- [10] Y. Poodi, M. Bimakr, A. Ganjloo, and S. Zarringhalami, "Intensification of bioactive compounds extraction from Feijoa (*Feijoa sellowiana* Berg.) leaves using ultrasonic waves", *Food and Bioprocess Processing*, vol. 108, pp. 37-50, 2018. doi: 10.1016/j.fbp.2017.12.004.
- [11] Z. Shen, J. Xu, Z. Li, Y. Chen, Y. Cui, and X. Jian. "An improved equivalent circuit simulation of high frequency ultrasound transducer", *Front. Mater.*, 8, 663109, 2021. doi: 10.3389/fmats.2021.663109.
- [12] W. Tangsopha, J. Thongsri, and W. Busayaporn, "Simulation of ultrasonic cleaning and ways to improve the efficiency", in *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/IEECON.2017.8075747.
- [13] M. S. Mat-Shayuti, T. M. Y. S. Tuan Ya, M. Z. Abdullah, et al., "Simulations of different power intensity inputs towards pressure, velocity & cavitation in ultrasonic bath reactor", *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 34, pp. 57-62, 2020. doi: 10.1016/j.sajce.2020.06.002.
- [14] L. Wang, L. Zhao, Z. Jiang, et al., "High accuracy Comsol simulation method of bimorph cantilever for piezoelectric vibration energy harvesting", *AIP Advances*, 9, 095067, pp. 1-9, 2019. doi: 10.1063/1.5119328.
- [15] V. Ya. Halchenko, Yu. Yu. Bondarenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Determination of influence of geometric parameters of piezoceramic plate on amplitude characteristics of linear piezomotor",

*Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 17-22, 2019.

doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.03.

- [16] V. Ya. Halchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "Increase the efficiency of the linear piezoelectric motor", *J. Nano-Electron. Phys.*, 10, no. 4, 04025, 2018.  
doi: 10.21272/jnep.10(4).04025.
- [17] B. Behera, and H. B. Nemade, "Investigating translational motion of a dual friction-drive surface acoustic wave motor through modeling and finite element simulation", *Simulation*, 95 (2), pp. 117-125, 2019.  
doi: 10.1177/0037549718778770.
- References**
- [1] N. O. Stetsenko, *Technology of health drinks and phyto-concentrates*. Kyiv, Ukraine: National University of Food Technologies, 2018 [in Ukrainian].
- [2] A. I. Ukrayinets, and H. O. Simakhina, *Technology of health food products*. Kyiv, Ukraine: National University of Food Technologies, 2009 [in Ukrainian].
- [3] On amendments to the Law of Ukraine "On the quality and safety of food products and food raw materials", *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*, no. 50, 2005. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2809-15#Text>. Accessed on: Oct. 22, 2022 [in Ukrainian].
- [4] C. V. Bazilo, V. M. Zaika, and Yu. Yu. Bondarenko, "Peculiarities of using ultrasound for intensification of biochemical processes in pharmaceuticals", in *Abstracts of the VI Int. Sci.-Tech. Conf. Sensors, Devices and Systems – 2017*. Cherkasy – Mykolayiv – Kherson – Lazurne, 2017, pp. 56–57 [in Ukrainian].
- [5] *The implementation plan of the Development Strategy of the Cherkasy region for the period 2021–2023*. Cherkasy, 2020. [Online]. Available: <https://cutt.ly/PlwO8M9>. Accessed on: Oct. 22, 2022 [in Ukrainian].
- [6] Cabinet of Ministers of Ukraine (2020, Aug. 05). *Resolution no. 695, On the approval of the State Regional Development Strategy for 2021 – 2027*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-п#Text>. Accessed on: Oct. 22, 2022 [in Ukrainian].
- [7] Cabinet of Ministers of Ukraine (2015, Nov. 11). *Resolution no. 932, On the approval of the Procedure for the development of regional development strategies and action plans for their implementation, as well as monitoring and evaluation of the effectiveness of the implementation of the specified regional strategies and action plans*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/932-2015-п#Text>. Accessed on: Oct. 22, 2022 [in Ukrainian].
- [8] K. G. Zinoviadou, C. M. Galanakis, M. Brnčić, et al., "Fruit juice sonication: Implications on food safety and physico-chemical and nutritional properties", *Food Research International*, vol. 77, part 4, pp. 743-752, 2015.  
doi: 10.1016/j.foodres.2015.05.032.
- [9] M. Abid, S. Jabbar, T. Wu, M. M. Hashim, et al., "Effect of ultrasound on different quality parameters of apple juice", *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 20, iss. 5, pp. 1182-1187, 2013.  
doi: 10.1016/j.ultsonch.2013.02.010.
- [10] Y. Poodi, M. Bimakr, A. Ganjloo, and S. Zarringhalami, "Intensification of bioactive compounds extraction from Feijoa (*Feijoa sellowiana* Berg.) leaves using ultrasonic waves", *Food and Bioproducts Processing*, vol. 108, pp. 37-50, 2018.  
doi: 10.1016/j.fbp.2017.12.004.
- [11] Z. Shen, J. Xu, Z. Li, Y. Chen, Y. Cui, and X. Jian. "An improved equivalent circuit simulation of high frequency ultrasound transducer", *Front. Mater.*, 8, 663109, 2021.  
doi: 10.3389/fmats.2021.663109.
- [12] W. Tangsopha, J. Thongsri, and W. Busayaporn, "Simulation of ultrasonic cleaning and ways to improve the efficiency", in *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2017, pp. 1-4.  
doi: 10.1109/IEECON.2017.8075747.
- [13] M. S. Mat-Shayuti, T. M. Y. S. Tuan Ya, M. Z. Abdullah, et al., "Simulations of different power intensity inputs towards pressure, velocity & cavitation in ultrasonic bath reactor", *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 34, pp. 57-62, 2020.  
doi: 10.1016/j.sajce.2020.06.002.
- [14] L. Wang, L. Zhao, Z. Jiang, et al., "High accuracy Comsol simulation method of bimorph cantilever for piezoelectric vibration energy harvesting", *AIP Advances*, 9, 095067, pp. 1-9, 2019.  
doi: 10.1063/1.5119328.

- [15] V. Ya. Halchenko, Yu. Yu. Bondarenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Determination of influence of geometric parameters of piezoceramic plate on amplitude characteristics of linear piezomotor", *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 17-22, 2019.  
doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.03.
- [16] V. Ya. Halchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "Increase the efficiency of the linear piezoelectric motor", *J. Nano-Electron. Phys.*, 10, no. 4, 04025 (5 p.), 2018.  
doi: 10.21272/jnep.10(4).04025.
- [17] B. Behera, and H. B. Nemade, "Investigating translational motion of a dual friction-drive surface acoustic wave motor through modeling and finite element simulation", *Simulation*, 95 (2), pp. 117-125, 2019.  
doi: 10.1177/0037549718778770.

**C. V. Bazilo**, Dr. Tech. Sc., Professor,  
**S. O. Filimonov**, Ph. D., Associate Professor,  
e-mail: s.filimonov@chdtu.edu.ua  
**N. V. Filimonova**, Ph. D.  
Cherkasy State Technological University  
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

## DISTRIBUTION OF ACOUSTIC PRESSURE IN THE ULTRASONIC SYSTEM OF INTENSIFICATION OF EXTRACTION PROCESSES

Today, food products for functional purposes, especially health-improving and preventive ones, with a high content of vitamins, microelements, macroelements, essential amino acids, and biologically active substances (BAS), are becoming more popular. Such products allow a person to maintain his or her health, as well as fully meet the physiological needs for energy and nutrients, which the body uses to build cells, organs and tissues. Therefore, it is the food industry that is currently an important component of healthcare and occupies a special place in the field of intellectual and industrial human activities.

Extraction is one of the most common methods used in the process of obtaining biologically active substances from plant or animal raw materials. The efficiency of the extraction can be increased by using intensifying methods used in the extraction process, such as ultrasound.

The paper considers the design and features of the mathematical description of ultrasonic systems for the intensification of the extraction process, the principle of operation of which is based on the use of piezoelectric ultrasonic radiators. A computer model has been built using the COMSOL Multiphysics software package of the ultrasonic system to intensify the extraction process, taking into account the full set of geometric, physical, mechanical and electrical parameters. As a result, the frequency at which the maximum amplitudes of oscillations of the ultrasonic system are provided for the intensification of the extraction process, which leads to the implementation of the most effective resonant mode of operation of the system, is determined. The locations of the maximum acoustic pressure on the object of extraction in the ultrasonic system to intensify the extraction process in the manufacture of concentrated drinks for functional purposes are determined.

Further research by the authors can be directed to the development of a mobile ultrasonic system for intensifying the extraction process in the manufacture of concentrated drinks for functional purposes, as well as for determining the most efficient geometry of the ultrasonic system tank using the COMSOL Multiphysics application software package.

**Keywords:** piezoelectric element, ultrasonic system, extraction process, acoustic pressure, modeling.

[0000-0002-1684-342X] **В. С. Титаренко,**  
e-mail: titarenko9494@gmail.com  
[0000-0003-1741-9329] **Д. В. Тичков**

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

## ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

*У статті розроблено та досліджено імітаційну модель (на базі математичного процесора MatLab Simulink) інформаційно-вимірювальної системи електричних характеристик (залишкового поверхневого електричного заряду, ємності поверхневого шару тощо) функціональних покриттів електронних пристроїв. Основною метою цієї імітаційної моделі було визначення раціональних параметрів вимірювання розробленої авторами інформаційно-вимірювальної системи та керування нею, які б спростили процес налагодження такої системи, а також дослідження динамічних режимів її роботи. Основною перевагою розробленої імітаційної моделі є можливість проведення інтерактивного дослідження роботи інформаційно-вимірювальної системи в різних, зокрема граничних, режимах. Випробування імітаційної моделі інформаційно-вимірювальної системи дозволили дослідити її роботу за різних умов і режимів вимірювального експерименту, а також віртуально визначити раціональні параметри роботи такої вимірювально-керуючої системи. Встановлено задовільну розбіжність експериментальних результатів 8-11,5 % порівняно з даними, отриманими аналітичним шляхом, що підтверджує правильність і адекватність складеної моделі.*

**Ключові слова:** електронний пристрій, функціональне покриття, інформаційно-вимірювальна система, електрична характеристика, імітаційна модель.

**Вступ.** Функціональні покриття (сенсорні, модулюючі, візуалізуючі та інші) сучасних електронних пристроїв знайшли широке застосування в багатьох галузях людської діяльності і на сьогодні мають широке впровадження та подальший розвиток [1-3]. Однак подальша мініатюризація цих пристроїв, підвищення їх функціональності та надійності зумовлюють необхідність більш компактного розміщення мікрокомпонентів таких пристроїв у їх робочих об'ємах. Це, в свою чергу, призводить до появи різноманітних електричних (так, паралельні провідники створюють шкідливу ємність, тоді як будь-який замкнений ланцюг зі струмом утворює індукційний елемент на поверхні пристрою) та механічних (трибологічних, динамічних) перешкод у таких приладах [4]. Такі перешкоди слід враховувати на етапі їх проектування. Проте у більшості випадків такі ефекти проявляються на етапах дослідно-промислових випробувань або взагалі експлуатації виробів.

Основними електричними характеристиками, які мають істотний вплив на характе-

ристики функціональних покриттів, є поверхневий електричний заряд та електрична ємність поверхневого шару.

Для швидкого й ефективного визначення електричного заряду та залишкової електроємності в поверхневому шарі діелектрика, який є основою більшості електронних мікропристроїв, у роботі пропонується розробити та використовувати інформаційно-вимірювальну систему (ІВС) електричних характеристик функціональних покриттів електронних пристроїв. Створенню такої ІВС передують її моделювання з метою встановлення робочих параметрів та режимів визначення електричних характеристик і усунення суб'єктивних похибок, які можуть виникнути на етапі проектування ІВС.

Розробкою подібних імітаційних моделей (проте в більшості випадків для визначення поверхневого та об'ємного електричного заряду в діелектриках) займається ряд учених, а саме: П. А. Тарагаєв, С. Є. Кузнецов, Е. Сабат, А. Куффель та ін. [5-8]. Проте в роботах цих учених недостатньо показані ре-

зультати дослідження залишкових електричних зарядів, що виникають на поверхнях діелектричних матеріалів під виробами мікроелектроніки та мікросхемотехніки (кремній, скло, ситал та ін.).

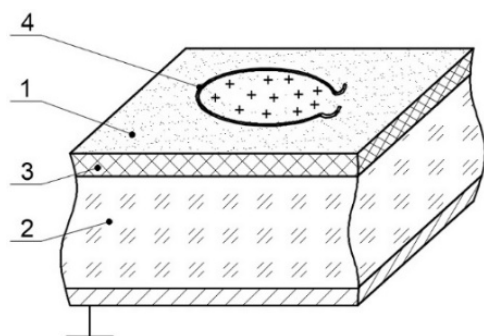
Тому розробка імітаційної моделі електричних характеристик ІВС функціональних покриттів мікроелектромеханічних пристроїв, яка спрощує процес налаштування такої ІВС та дослідження динамічних режимів її роботи, є питанням, яке досі не вирішене.

**Метою роботи** є розробка імітаційної моделі ІВС електричних характеристик (залишковий електричний заряд, електроємність поверхневого шару тощо), яка розроблена на базі математичного процесора Matlab Simulink і дозволяє проводити інтерактивні дослідження функціональних покриттів електронних пристроїв цією ІВС у різних (включаючи граничні та критичні) режимах.

Основними задачами для досягнення поставленої мети є:

- розробити схему вимірювання поверхневого електричного заряду та запропонувати імітаційну модель ІВС електричних характеристик функціональних покриттів;
- дослідити зміну енергетичного розподілу електричного заряду на досліджуваній ділянці матеріалів з різною електропровідністю, а також зміну у величині такого заряду за час проведення дослідження.

**Математичний опис інформаційно-вимірювальної системи.** Вимірювання електричного заряду поверхні проводять за схемою, зображеною на рисунку 1.



**Рисунок 1. Схема вимірювання електричного заряду поверхні:**

- 1 – функціональне покриття (діелектрик);
- 2 – діелектрична основа;
- 3 – електрод; 4 – детектор електричного заряду

Такий поверхневий заряд у діелектрику під кільцем детектора описується ємністю  $C_e$ . Ємність  $C_b$ , з'єднана послідовно з ємністю  $C_e$ , характеризується діелектричною областю, обмеженою кільцем детектора.  $C_a$  – ємність, що характеризується частиною діелектрика, яка знаходиться поза дією детектора електричного заряду. Основні рівняння для розрахунку цих потужностей такі [9]:

$$C_a = \frac{\epsilon_{rd} \cdot \epsilon_0 \cdot (S - S_q)}{d}, \quad (1)$$

$$C_b = \frac{(\epsilon_{rd} - \epsilon_{ra}) \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (2)$$

$$C_e = \frac{\epsilon_{ra} \cdot \epsilon_0 \cdot S_q}{d_n}, \quad (3)$$

де  $S$  – площа поверхні діелектричного зразка, обмеженого кільцем детектора;  $S_q$  – площа поверхні діелектрика під кільцем детектора електричного заряду;  $d$ ,  $d_n$  – відповідно, повна товщина та товщина поверхневого шару діелектрика;  $\epsilon_0$  – діелектрична проникність ( $\epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $\epsilon_{ra}$  – діелектрична проникність повітря ( $\epsilon_{ra} = 1$ );  $\epsilon_{rd}$  – діелектрична проникність діелектрика (наприклад, для скла  $\epsilon_{rd} = 2,4$ ).

Максимально допустима напруга  $U_c$  і сумарний заряд  $q$ , виміряний на поверхні діелектрика, визначаються за такими формулами [10]:

$$U_c = \frac{U_a \cdot C_b}{(C_a + C_b)}, \quad (4)$$

$$q = C_e \cdot U_c, \quad (5)$$

де  $U_a$  – критична напруга пробою діелектрика (для скла товщиною 1 мм  $U_a = 5$  кВ).

Порядок розрахунку вимірюваних параметрів наступний. За формулами (1) – (3) розраховується ємність кожної ділянки діелектрика. Далі, за формулами (4) і (5) визначаються значення напруги під детектором на діелектрику та заряду, що утворюється на ньому. Результати, отримані за умов критичних напруг за різних площ поверхні  $S_q$  (для діелектриків з параметрами:  $S = 0,05\pi$ ;  $0,5\pi$ ;  $\pi$  мм<sup>2</sup>;  $d = 1,2$  мм;  $d_n = 0,1$  мм) наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Параметри вимірювальної схеми ІВС для критичної напруги пробою (при  $U_a = 5$  кВ)

| Номер зразка | Площа поверхні зразка, обмежена кільцем детектора $S$ , мм <sup>2</sup> | Ємність $C_a$ , Ф     | Ємність $C_b$ , Ф     | Ємність $C_e$ , Ф    | Допустима напруга $U_c$ , В | Загальний заряд, $q$ , Кл |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 1            | $0,05\pi \approx 0,157$                                                 | $2,5 \cdot 10^{-15}$  | $3,9 \cdot 10^{-15}$  | $1,2 \cdot 10^{-15}$ | 3043,6                      | $3,8 \cdot 10^{-12}$      |
| 2            | $0,5\pi \approx 1,57$                                                   | $26,9 \cdot 10^{-15}$ | $39,1 \cdot 10^{-15}$ | $3,9 \cdot 10^{-15}$ | 2965,7                      | $11,6 \cdot 10^{-12}$     |
| 3            | $\pi \approx 3,14$                                                      | $54,2 \cdot 10^{-15}$ | $78,3 \cdot 10^{-15}$ | $5,5 \cdot 10^{-15}$ | 2955,5                      | $16,3 \cdot 10^{-12}$     |

**Розробка та дослідження імітаційної моделі.** На основі отриманих значень ємності (таблиця 1), що характеризує поверхневий шар на діелектричному матеріалі, проведено моделювання розподілу генерованого електричного заряду.

Імітаційна модель запропонована з метою визначення раціональних параметрів вимірювання та контролю, а розроблена авторами на її основі інформаційно-вимірювальна

система дозволить спростити процес налагодження такої системи, а також дослідити динамічні режими її роботи. Для моделювання використовувався сучасний імітаційний засіб «MATLab Simulink», що дає змогу суттєво спростити аналіз сучасних ІВС із різними алгоритмами їх роботи [11].

Імітаційну модель ІВС, створену в середовищі MATLAB Simulink, зображено на рисунку 2.

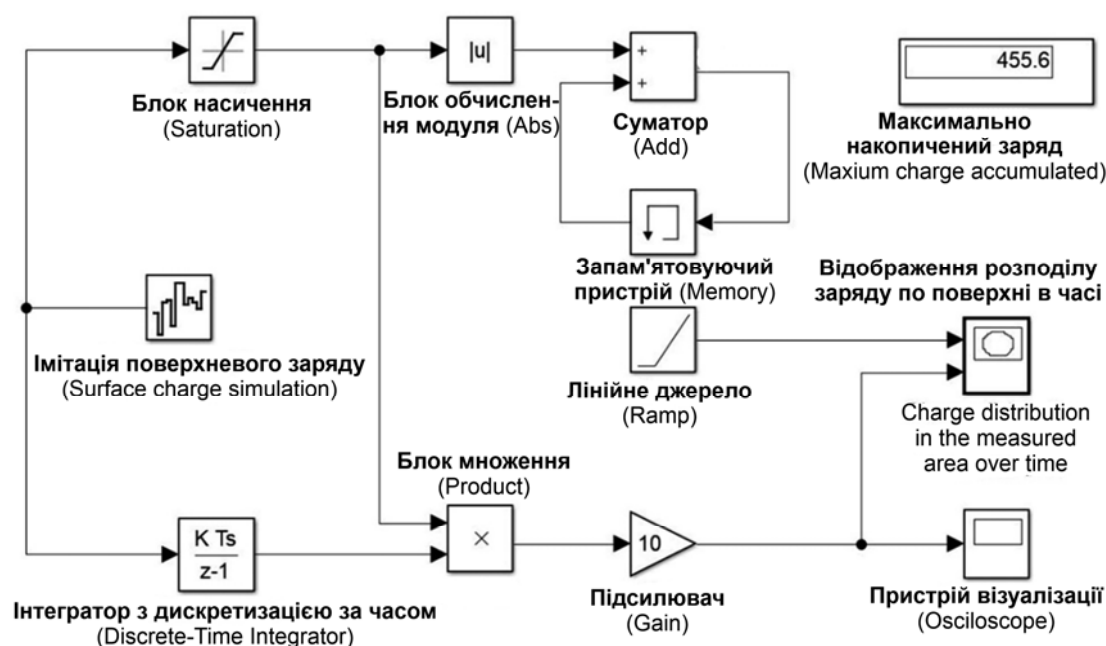


Рисунок 2. Імітаційна модель ІВС електричних характеристик функціональних покриттів. MatLab Simulink

Розроблена імітаційна модель являє собою набір блоків, що моделюють роботу ІВС електричних характеристик функціональних покриттів. Ця модель містить такі блоки: блок моделювання поверхневого заряду, який змінюється за стохастичним законом кожні 0,05 с, і основною метою якого є моделювання поверхневого заряду, що виникає на

поверхні діелектрика та підлягає вимірюванню; інтегратор з дискретизацією за часом, який моделює зміну та розподіл електричного заряду по поверхні в часі; блок насичення, що дозволяє визначити граничну накопичувальну ємність вимірювального датчика; блоки виконання математичних операцій (Abs, Product, Add), призначені для реалізації більш простих

математичних операцій для обчислення вимірюваного електричного заряду та його розподілу; блок пам'яті (Memory), який накопичує і зберігає дані про виміряний заряд; підсилювач (Gain), що підвищує вимірюване значення заряду до рівня, достатнього для відображення його на інформаційних пристроях; лінійне джерело (Ramp) – джерело сигналу, призначене для формування на інформаційних пристроях правильної картини розподілу електричного заряду в часі; інформаційні пристрої (осцилограф та інші), призначені для інформаційного відображення інформації про максимальний заряд, накопичений на вимірювальній ділянці, його амплітудно-частотні характеристики, а також розподіл по вимірювальній ділянці за часом [12].

Принцип роботи такої ІВС можна пояснити на прикладі розробленої імітаційної моделі і полягає він у наступному.

На початковому етапі, коли на вимірювальному датчику немає залишкового поверхневого заряду, на входи блоків Abs і Product не подається сигнал, відповідно вся електрична схема приладу знаходиться на «паузі» – має нульовий вихідний рівень.

При підведенні вимірювального датчика на достатню відстань до діелектричної поверхні вимірюваної ділянки (визначається величиною поверхневого заряду, поглиненого датчиком, необхідного для забезпечення мінімального рівня струму в блоці насичення) на дисплеї з'являється мінімальний рівень сигналу. Далі, у відповідних блоках, що здійснюють математичні операції (Abs, Product), сигнал посилюється і передається на блок Saturation, призначений для захисту розробленої ІВС від накопичення занадто високого електричного заряду, який може призвести до електричного пробоя і, як наслідок, до виходу з ладу всієї ІВС. Значення параметрів цього блока не можна змінити. З другого боку, слід пам'ятати, що мінімальне значення вихідного параметра є межею чутливості ІВС.

Після проходження блока Saturation сигнал виводиться на суматор Add, який підключається паралельно до накопичувального пристрою Memory.

Паралельно зв'язку, що веде до суматора, вихідний сигнал подається в блок Product,

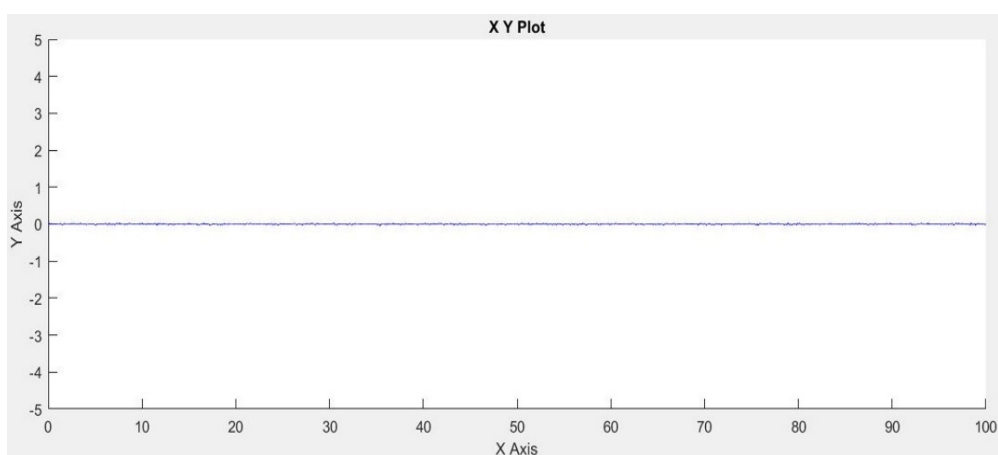
де він множиться на сигнал, отриманий від блока інтегратора дискретного часу. Основною метою блока Product є якомога точніша апроксимація імітаційної моделі розподілу електричного заряду на вибраній ділянці досліджуваної поверхні шляхом масштабування стохастичного електричного заряду, створеного в симуляції поверхневого заряду в часовому діапазоні, заданому дискретним інтегратором часу. Після подальшого посилення в блоці Gain сигнал заряду одночасно надходить на пристрій візуалізації, що показує амплітудно-частотні характеристики прийнятого сигналу в часі (які відповідають розподілу заряду у вимірюваній області в часі).

Особливістю цієї моделі є те, що блок візуалізації (осцилограф) дозволяє отримати розподіл електричного сигналу по площі досліджуваної поверхні за амплітудно-частотними характеристиками в часі.

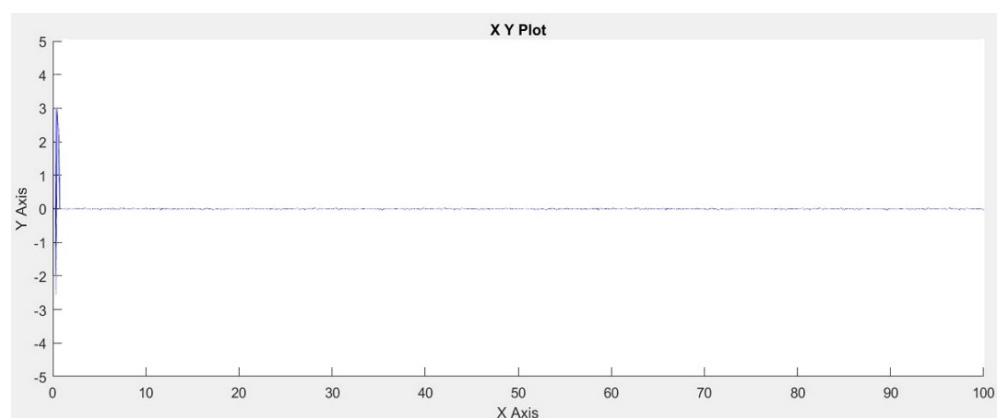
Щоб отримати розподіл енергії електричного сигналу, до посиленого сигналу додається постійний сигнал від лінійного джерела (блок Ramp), що надсилається до блока розподілу заряду у вимірюваній області за час, що дозволяє провести розподіл вихідного сигналу та передати його в блок візуалізації як незатухаючий сигнал, який не зменшується з часом через витрати електроенергії та енергії на елементи ІВС. Це мінімізує потік сигналу в ланцюзі вимірювальної системи та забезпечує приблизне наближення змодельованого розподілу електричного заряду до його справжнього розподілу по поверхні.

Слід зауважити, що встановлення коефіцієнтів (особливо в блоках інтегратора Saturation, Gain і Discrete-time integrator) слід проводити обережно, оскільки їх неправильне встановлення може призвести до нестабільності тестованої системи, що є неприпустимим [13].

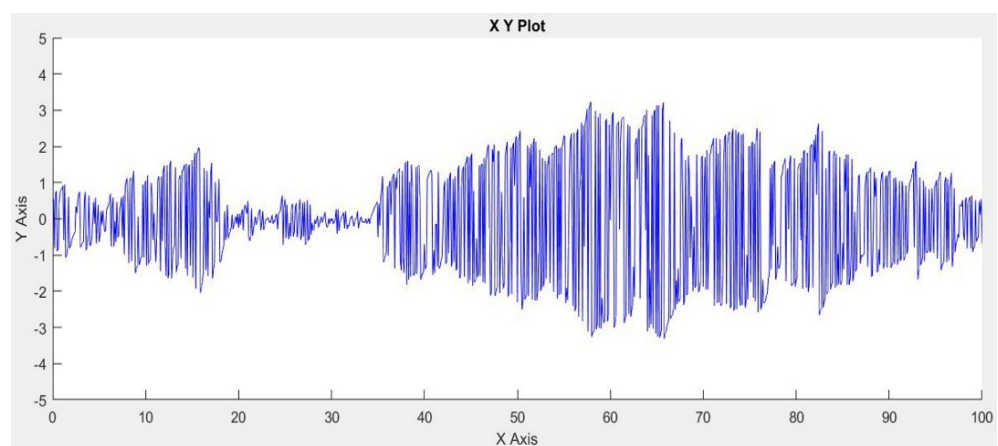
**Результати досліджень.** Результати імітаційного моделювання електричних характеристик функціональних покриттів дозволили визначити та дослідити зміну енергетичного розподілу електричного заряду на досліджуваній ділянці матеріалів з різною електропровідністю (рисунок 3), а також зміну у величині такого заряду за час, протягом якого проводилося дослідження (рисунок 4).



a)



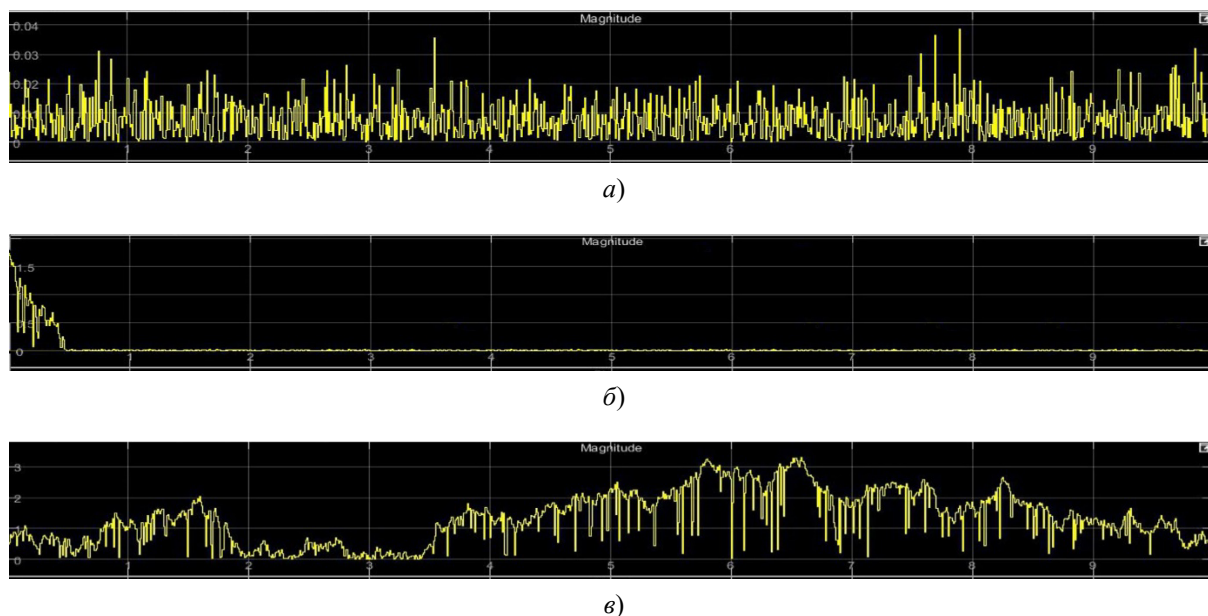
б)



в)

**Рисунок 3. Зміна розподілу енергії електричного заряду на досліджуваній ділянці матеріалів за час вимірювання (10 с):**

- a) на провіднику (заземлене суцільне срібне покриття Ag-999 на діелектричній основі);
- б) на неполяризованому діелектрику (оптичне скло К-8);
- в) на поляризованому діелектрику (п'єзокераміка PZT-8)



**Рисунок 4. Зміна величини електричного заряду на досліджуваній ділянці матеріалів за час вимірювання (10 с):**

- а) на провіднику (заземлене суцільне срібне покриття Ag-999 на діелектричній основі);
- б) на неполяризованому діелектрику (оптичне скло К-8);
- в) на поляризованому діелектрику (п'єзокераміка PZT-8)

У процесі аналізу зміни енергетичного розподілу залишкового електричного заряду в досліджуваній зоні (рисунок 3):

- у випадку заземленого провідника (рисунок 3, а) відсутній залишковий електричний сигнал (невеликі збурення кривої розподілу визначають шуми, спричинені електричною та магнітною дією зовнішніх полів, а також перешкоди з самою електронною схемою вимірювання);

- при дослідженні неполяризованого діелектрика (рисунок 3, б) спостерігається різке одноразове збурення електричного сигналу, яке відразу загасає. Таке збурення відповідає залишковому поверхневому заряду, накопиченому на поверхні неполяризованого діелектрика внаслідок зовнішньої електричної та механічної дії;

- у випадку поляризованого діелектрика (рисунок 3, в) спостерігаються заряд і розподіл величини електричного заряду. Проте, як бачимо, цей розподіл є періодичним з періодом  $T \approx 0,6-1,5$  с (рисунки 3, в, 4, в) (цей період відповідає діапазону робочих параметрів пристрою), що можна пояснити накопиченням і підтримкою залишкового заряду на поверхні матеріалу за рахунок накопиченої в матеріалі енергії електричного поля, а також динамічно змінною об'ємною електричною анізотропією, яка є особливістю поляризованих діелектриків.

Така динамічна зміна електричного поля всередині діелектрика також пояснює різний розподіл електричного сигналу (який імітує миттєвий заряд на тестовій поверхні в певний момент часу).

Подібна ситуація для різних матеріалів за електричними властивостями матеріалів спостерігається при дослідженні зміни фактичного значення електричного заряду в досліджуваній зоні (рисунок 4) [14]. Єдина відмінність в отриманні таких залежностей полягає в тому, що при дослідженні провідного матеріалу або неполяризованого діелектрика відсутній нульовий рівень вихідного сигналу, що генерується джерелом додаткового сигналу Ramp [15].

У процесі дослідження, аналізу та подальшого порівняння результатів імітаційної моделі з даними, отриманими експериментальним шляхом для певних режимів і моментів часу вимірювання, встановлено, що ці результати мають розбіжність 8–11,5 %, що доводить правильність та адекватність складеної імітаційної моделі.

**Висновки.** Таким чином, розроблена та апробована імітаційна модель інформаційно-вимірювальної системи електричних характеристик (залишковий електричний заряд поверхні, електроємність поверхневого шару тощо) функціональних покриттів електронних

пристроїв дозволяє досліджувати її роботу, а також віртуально визначити раціональні параметри роботи цієї системи.

Наукова новизна розробленої імітаційної моделі ІВС полягає в тому, що вперше запропоновано модель, яка дозволяє з високою точністю й адекватністю обирати режими дослідження функціональних покриттів електронних пристроїв шляхом урахування їх провідності, а також щільності розподілу електричного заряду по площі досліджуваної поверхні за амплітудно-частотними характеристиками в часі, чим дає змогу проводити інтерактивні дослідження електричних характеристик таких покриттів у режимі реального часу.

Випробування імітаційної моделі інформаційно-вимірювальної системи дозволили дослідити її роботу за різних умов і режимів проведення вимірювального експерименту, а також віртуально визначити раціональні параметри роботи вимірювально-керуючої системи.

Встановлено задовільну розбіжність експериментальних результатів 8–11,5 % порівняно з даними, отриманими методом імітаційного моделювання, що свідчить про коректність та адекватність розробленої імітаційної моделі.

Практична цінність проведених досліджень полягає у можливості проектування високоточних ІВС, що враховують результати проведеного імітаційного моделювання, чим забезпечують високу точність (відносна похибка визначення залишкового поверхневого електричного заряду не перевищує 8–8,5 %, а ємності поверхневого шару – не вище 4,5 %) та повторюваність (близько 0,998) результатів проведеного дослідження.

В перспективі планується на основі отриманих з імітаційної моделі даних про режими визначення електричних характеристик побудувати та дослідити реальну ІВС функціональних покриттів електронних пристроїв.

#### Список використаних джерел

[1] Ajit D. Kelkar, Daniel J. C. Herr, and James G. Ryan, *Nanoscience and Nanoengineering: Advances and Applications*. Prague, Czech Republic: CRC Press, 2014.

[2] *Status of the MEMS industry 2018*. Lyon, France: Yole Development SARL, May 2018.

[3] V. Tsenev, "An addition of functionalities in an integrated robot complex for assembling electronic products". *Innovations in discrete productions*, no. 1, pp. 34-35, 2016. [Online]. Available: <https://stumejournals.com/journals/innovations/2016/1/34.full.pdf>

[4] Yong Zhu, *Micro and Nano Machined Electrometers*. Singapore: Springer, 2020. doi: 10.1007/978-981-13-3247-0.

[5] J. Vedral, and M. Kriz, "Signal processing in partial discharge measurement", *Metrology and Measurement Systems*, no. 1 (17), pp. 55-63, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2478/v10178-010-006-8>

[6] C. L. Wadhwa, *High Voltage Engineering*. New Delhi, India: New Age International, 2007.

[7] A. Sabat, and S. Karmakar, "Simulation of partial discharge in high voltage power equipment", *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, no. 3 (2), pp. 234-247, 2011.

[8] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering*. London, GB: TBS, 2000.

[9] A. Tzinevrakis, D. Tsanakas, and E. Mimos, "Analytical calculation of the electric field produced by single circuit power lines with horizontal arrangement of the conductors", in *51st Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Sept. 11-15, 2006.

[10] Yu. Shi, G. Xie, Q. Wang, X. Li, X. Yang, P. Liu, and Z. Peng, "Simulation analysis and calculation of electric field distribution characteristics of UHV wall bushing", in *4th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy CEEGE*, Munich, June 10-13, 2021, pp. 110-117. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.066>

[11] J. Junior, R. Marcos, C. Tenorio, A. Mateus, and C. Egoavil, "Development of a matlab software for real-time mapping of electric fields on transmission power line", *International Journal of Technology*, no. 2, pp. 164-170, 2011.

[12] J. Nalepa, "Modelling and simulation of measuring systems using the Simulink specialised Toolbox", in *IX International*

- Symposium on Electrical Instruments in Industry*, Glasgow, 1997, pp. 249-252.
- [13] Д. В. Тичков, М. О. Бондаренко, та В. С. Антонюк, "Особливості розрахунку та дослідження ємнісних перетворювачів діелектричної проникливості з різною формою електродів", *Перспективні технології та прилади*, т. 14, с. 140-145, 2019.
- [14] M. A. Bondarenko, S. A. Bilokon, V. S. Antonyuk, and Iu. Iu. Bondarenko, "Mechanism of origin and neutralization of residual triboelectricity at scanning of dielectric surfaces by a silicon probe of the atomic-force microscope", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, no. 2 (6), pp. 02018-1-02018-5, 2014.
- [15] D. K. Chaturvedi, *Modeling and Simulation of Systems Using MATLAB and Simulink*. Boca Raton, USA: CRC Press, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/9781315218335>.
- References**
- [1] Ajit D. Kelkar, Daniel J. C. Herr, and James G. Ryan, *Nanoscience and Nanoengineering: Advances and Applications*. Prague, Czech Republic: CRC Press, 2014.
- [2] *Status of the MEMS industry 2018*. Lyon, France: Yole Development SARL, May 2018.
- [3] V. Tsenev, "An addition of functionalities in an integrated robot complex for assembling electronic products". *Innovations in discrete productions*, no. 1, pp. 34-35, 2016. [Online]. Available: <https://stumejournals.com/journals/innovations/2016/1/34.full.pdf>
- [4] Yong Zhu, *Micro and Nano Machined Electrometers*. Singapore: Springer, 2020. doi: 10.1007/978-981-13-3247-0.
- [5] J. Vedral, and M. Kriz, "Signal processing in partial discharge measurement", *Metrology and Measurement Systems*, no. 1 (17), pp. 55-63, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2478/v10178-010-006-8>
- [6] C. L. Wadhwa, *High Voltage Engineering*. New Delhi, India: New Age International, 2007.
- [7] A. Sabat, and S. Karmakar, "Simulation of partial discharge in high voltage power equipment", *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, no. 3 (2), pp. 234-247, 2011.
- [8] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering*. London, GB: TBS, 2000.
- [9] A. Tzinevrakis, D. Tsanakas, and E. Mimos, "Analytical calculation of the electric field produced by single circuit power lines with horizontal arrangement of the conductors", in *51st Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Sept. 11-15, 2006.
- [10] Yu. Shi, G. Xie, Q. Wang, X. Li, X. Yang, P. Liu, and Z. Peng, "Simulation analysis and calculation of electric field distribution characteristics of UHV wall bushing", in *4th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy CEEGE*, Munich, June 10-13, 2021, pp. 110-117. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.066>
- [11] J. Junior, R. Marcos, C. Tenorio, A. Mateus, and C. Egoavil, "Development of a matlab software for real-time mapping of electric fields on transmission power line", *International Journal of Technology*, no. 2, pp. 164-170, 2011.
- [12] J. Nalepa, "Modelling and simulation of measuring systems using the Simulink specialised Toolbox", in *IX International Symposium on Electrical Instruments in Industry*, Glasgow, 1997, pp. 249-252.
- [13] D. V. Tychkov, M. O. Bondarenko, and V. S. Antoniuk, "Peculiarities of calculation and research of capacitive dielectric permeability converters with different electrode shapes", *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady*, vol. 14, pp. 140-145, 2019 [in Ukrainian].
- [14] M. A. Bondarenko, S. A. Bilokon, V. S. Antonyuk, and Iu. Iu. Bondarenko, "Mechanism of origin and neutralization of residual triboelectricity at scanning of dielectric surfaces by a silicon probe of the atomic-force microscope", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, no. 2 (6), pp. 02018-1-02018-5, 2014.
- [15] D. K. Chaturvedi, *Modeling and Simulation of Systems Using MATLAB and Simulink*. Boca Raton, USA: CRC Press, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/9781315218335>.

**V. S. Tytarenko,**

e-mail: titarenko9494@gmail.com

**D. V. Tychkov**

Cherkasy State Technological University,  
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

## **SIMULATION MODEL OF THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF FUNCTIONAL COATINGS OF ELECTRONIC DEVICES**

*The article has developed and researched a simulation model (based on the MatLab Simulink mathematical processor) of the information-measuring system of electrical characteristics (residual surface electric charge, surface layer capacitance, etc.) of functional coatings of electronic devices. The main goal of this simulation model is to determine the rational parameters of measurement and control of the information-measuring system developed by the authors, which would simplify the process of setting up such a system, as well as to study the dynamic modes of its operation. The main advantage of the developed simulation model is the possibility of conducting an interactive study of the operation of the information-measuring system in various, including marginal, regimes. Testing of the simulation model of the information-measuring system makes it possible to investigate its operation under various conditions and regimes of the measurement experiment, as well as to virtually determine the rational parameters of the operation of such a measurement and control system. A satisfactory discrepancy of experimental results of 8-11.5% is established in comparison with the data obtained analytically, which confirms the correctness and adequacy of the developed model. The practical value of the conducted research lies in the possibility of designing high-precision information-measuring systems, that take into account the results of simulation modeling, thus ensuring high accuracy (the relative error of determining the residual surface electric charge does not exceed 8-8.5%, and the capacitance of the surface layer does not exceed 4.5%) and repeatability (about 0.998) of the results of the conducted research. In the future, it is planned to carry out hardware implementation and research of the information-measuring system of functional coatings of electronic devices, which will be created taking into account the data obtained from the simulation model about the modes of determining electrical characteristics.*

**Keywords:** *electronic device, functional coating, information-measuring system, electrical characteristic, simulation model.*

УДК 534.133

[0000-0003-1727-3286] **С. О. Філімонов**, канд. техн. наук, доцент,  
e-mail: s.filimonov@chdtu.edu.ua

[0000-0002-6854-8676] **Д. С. Бачеріков**, аспірант

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

## КОНСТРУКЦІЯ ВУЗЛА ТОЧНОГО ДОЗУВАННЯ В СИСТЕМІ ВПЛИВУ РІДКИХ ДОБРИВ

З розвитком сільського господарства збільшується попит на використання добрив і препаратів для досягнення максимальної врожайності на полях. Одним із важливих етапів для отримання гарного врожаю є обприскування та внесення рідких добрив. Лише за останні 10 років в Україні об'єми внесення рідких комплексних добрив, мікродобрив, азотних добрив і препаратів збільшилися в чотири рази. Вилів рідких добрив виконується за допомогою спеціальних систем. Основним елементом системи виліву є дозатори різного типу.

Визначено основні особливості сучасних моделей дозаторів для виліву рідких добрив. Виявлено їх переваги та недоліки. Представлена класифікація основних способів керування системою виліву рідини.

Запропоновано та виготовлено нову конструкцію дозатора з п'єзокерамічним двигуном. В дослідному зразку використовується нове технічне рішення стосовно регулювання норми виліву. Також запропоновано різні варіанти дозуючих шайб, з однаковими отворами та різнокаліберними отворами, що значно підвищить ефективність роботи системи.

Представлено гідравлічну схему розробленого стенда для перевірки та визначення параметрів дозаторів. За допомогою розробленого стенда експериментально отримано залежності гідравлічних характеристик розробленого дозатора. Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні дозаторів для виліву рідких добрив.

**Ключові слова:** сільське господарство, дозатор, дозуюча шайба, п'єзоелектричний двигун, біморфний п'єзоелемент.

**Вступ.** У сільському господарстві стрімко використовуються новітні технології, які застосовуються для керування й оптимізації виробництва сільськогосподарської продукції. Основними впроваджувальними технологіями є не тільки GPS-навігація, контролери, протоколи передачі даних, програмні платформи

для управління фермами, а й новітні датчики для точного контролю, моніторингу, аналізу та збору даних про стан ґрунту в режимі реального часу, для застосування їх у диференційованому висіві та виліві, які нині є актуальними (рисунк 1) [1, 2].



Рисунок 1. Схема реалізації сучасних технологій у точному землеробстві

Наводиться за [1, 2]

Незважаючи на такий розвиток, одним із важливих етапів для отримання гарного врожаю є обприскування та внесення рідких добрив. Лише за останні 10 років у світі об'єми внесення рідких комплексних добрив, мікродобрив, азотних добрив і препаратів збільшилися в чотири рази [3-5]. Це означає, що обприскування та внесення широко використовують не лише великі агрохолдинги, а й невеликі фермерські господарства. Також актуальнішим стає напрям точного землеробства, який нині технічно розвинений у системах виливу та точного дозування і дотримання заданих норм, що не призводить до перевитрат добрив та бюджету.

Таким чином, розробка і впровадження пріоритетних напрямів точного землеробства сприятиме зростанню прибутковості аграрного виробництва, його рентабельності, підвищенню продуктивності праці та зменшенню забруднення навколишнього природного середовища.

**Огляд літератури.** Одним із важливих етапів для отримання гарного врожаю є обприскування та внесення рідких добрив.

З розвитком сільського господарства збільшується попит на використання добрив і препаратів для досягнення максимальної врожайності на полях. Тому актуальним постає питання систем виливу та точного дозування і дотримання заданих норм, що не призведуть до перевитрат добрив та бюджету і підвищать врожайність сільгоспкультур [6-9].

Для контролю дозування виливу рідких добрив використовуються спеціальні дозатори. Основним елементом вузла дозування і виливу є система регулювання. В її основі лежить керування технологічними операціями за допомогою заслінок, каліброваних отворів, регулювання за допомогою електродвигунів та електромагнітних клапанів, які широко застосовуються в системах точного землеробства.

На рисунку 2 зображено класифікацію основних способів керування системою виливу рідини.



Рисунок 2. Класифікаційна схема основних способів керування системами виливу добрив

**Постановка проблеми.** Недоліками відомих видів систем регулювання вузла дозування і виливу, які широко застосовуються в системах точного землеробства, а саме в причіпних, навісних та самохідних обприскувачах, є: в заслінках та каліброваних отворах відсутня можливість дистанційного керування, спостерігається велика засміченість отворів і недотримання заданих норм виливу, що призводить до перевитрат добрив; регулювання

електродвигунами та електромагнітними клапанами є енерговитратними через значні струми для самоутримання. Також до недоліків слід віднести складність виготовлення, значний крок регулювання та складність керування цими видами систем [10-11].

Перспективним напрямом у галузі агротехнологій є створення й використання двигунів, принцип дії яких базується на зворотному п'єзоелектричному ефекті. Зворотний

п'єзоелектричний ефект полягає в зміні лінійних розмірів п'єзоелектрика при подаванні до нього електричного поля.

Завдяки простоті конструкції та низці технічних переваг над електромагнітними двигунами, а саме: відсутності випромінюваних магнітних полів і несхильності до їх впливу, можливості мініатюризації; широкого діапазону частот обертання і моментів на валу (0.1 ... 1.0 Нм), вогнестійкості, відсутності обмоток, можливості самозастопорювання приводного вала без споживання електричного струму та великої точності позиціонування [12, 13] близько 0.5  $\mu\text{м}$ , досить значної сили штовхання (тяги) до 10 Н п'єзоелектричні двигуни є високоефективними у використанні в усіх галузях промисловості, а особливо сучасній сільгосптехніці та сільгосптехнологіях [14, 15], що обґрунтовано винятковою їх невибагливістю в умовах роботи та обслуговуванні [16-19].

Таким чином, актуальним завданням є розробка дозаторів рідких добрив на основі п'єзоелектричних двигунів.

**Метою роботи** є розробка конструкції дозування рідких добрив на основі гвинтового лінійного п'єзоелектричного двигуна.

Для розробки вузла точного виливу рідини необхідно виконати такі задачі: проаналізувати конструктивні особливості сучасних моделей дозаторів для виливу рідких добрив, визначити їх недоліки і розробити нову конструкцію дозатора; розробити стенд для дослідження та визначення параметрів дозаторів; визначити гідравлічні характеристики використаних дозуючих шайб у розробленому дозаторі.

**Матеріали та методи.** В роботі розроблено конструкцію дозатора, в якій основною складовою є розроблений гвинтовий п'єзокерамічний двигун [20], що зображено на рисунку 3.

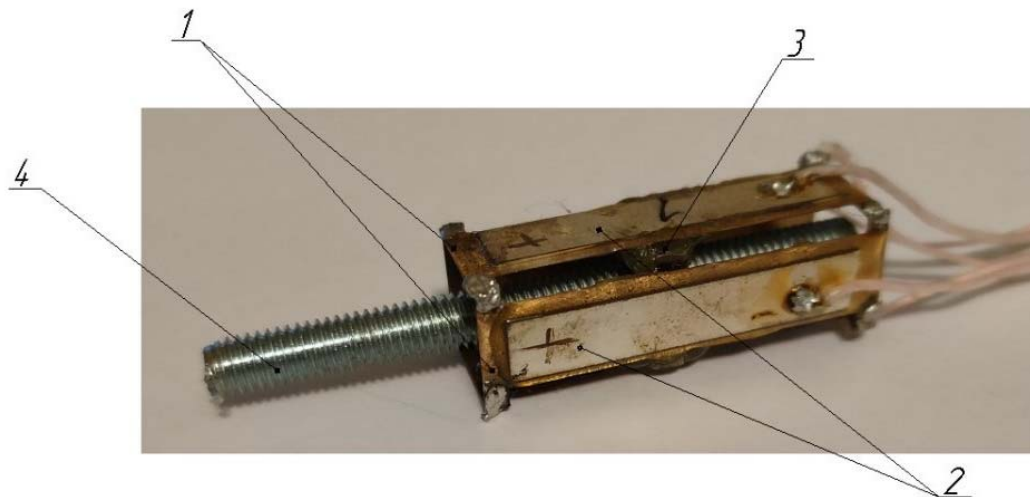


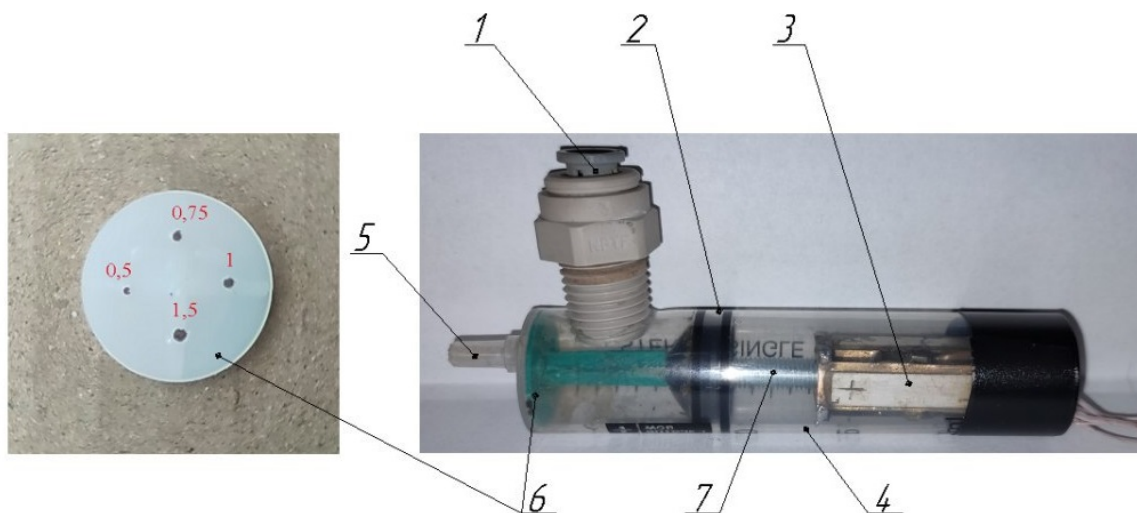
Рисунок 3. Конструкція п'єзоелектричного двигуна з використанням біморфних п'єзоелементів:

1 – латунні пластини; 2 – п'єзоелементи;  
3 – чотиригранна металева гайка, 4 – ходовий вал

На рисунку 4 зображено конструкцію дозатора, в якій основною складовою є розроблений гвинтовий п'єзокерамічний двигун.

Загальна довжина конструкції становить 100 мм, а її діаметр – 20 мм, діаметр шайб дозатора – 18 мм. В одному варіанті отвори шайби дозатора одного діаметра – 0,5 мм, в іншому варіанті чотири отвори різного діаметра: 0,5 мм, 0,75 мм, 1 мм та 1,5 мм.

Принцип роботи розробленого дозатора полягає в наступному. На п'єзокерамічний двигун подається напруга, в результаті чого виникає обертовий рух ходового вала, який жорстко зв'язаний з шайбою, шайба дозатора обертається і встановлює отвір напроти отвору для виходу рідини. Таким чином можна регулювати вилив добрива.

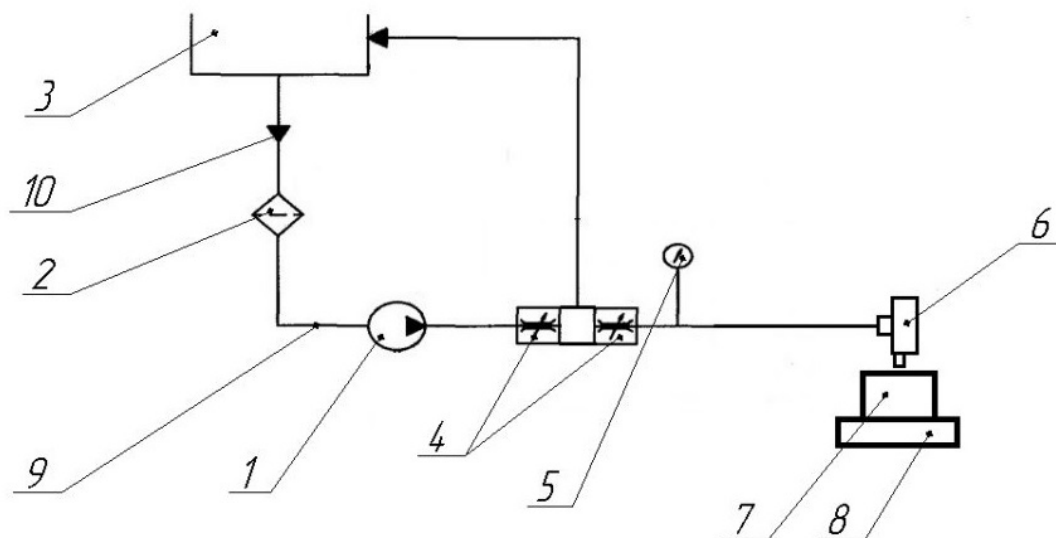


**Рисунок 4. Конструкція дозатора з гвинтовим п'єзокерамічним двигуном:**

1 – подача рідини; 2 – сальник; 3 – розроблений гвинтовий п'єзокерамічний двигун, 4 – корпус дозатора, 5 – вихід рідини, 6 – змінні шайби дозатора, 7 – вал

Гідравлічну схему стенда для дослідження та визначення параметрів дозаторів зображено на рисунку 5. Цей стенд складається з бака 3 місткістю 50 л; насоса 1; фільт-

рів 2; гумових рукавів 9; регулятора тиску 4; манометра 5; штанг 8, виготовлених з полімеру діаметром 32 мм; дозатора рідини 6; ємності для збору рідини 7; прецизійних ваг 8.



**Рисунок 5. Гідравлічна схема стенда для дослідження дозатора:**

1 – насос; 2 – фільтр; 3 – бак з рідиною; 4 – ручний регулятор тиску; 5 – манометр; 6 – дозатор; 7 – ємність для збору рідини; 8 – ваги; 9 – рукав; 10 – рух рідини

Робота стенда відбувається наступним чином: насос 1 всмоктує робочий розчин з бака 3 та подає на регулятор тиску 4, рідина проходить через фільтри 2. Контроль тиску здійснюється завдяки манометру 5. Рідина проходить по рукавах до дозатора рідини 6 та розподіляється в ємність 7. Розподілена рідина в ємності 7 зважується на прецизійних ва-

гах для більш точного результату під час проведення дослідів та після зважування виливається в бак 3. Стенд працює циклічно. Загальний вигляд гідравлічної схеми стенда показано на рисунку 5.

**Чисельні експерименти та результати дослідження.** За допомогою розробленого стенда було проведено експериментальні дос-

лідження дозатора, де визначалась хвилинна витрата рідини. Для експериментального визначення хвилинної витрати рідини були прийняті такі граничні умови. Вимірюють витрату у літрах за 1 хв, для кожного отвору дозуючої шайби тиск випробовування становив (0,25-4 атм) з похибкою, меншою ніж 1 %. Тривалість вимірювання, яку визначають секундоміром з похибкою, меншою ніж 1 с, по-

винна бути більша або рівна 60 с. Для більш точного визначення кількості рідини ємність з рідиною заважувалась на вагах з похибкою 1 г x 5 кг. Експериментальні дослідження проводилися для кожного з отворів дозуючої шайби. На рисунку 6 зображено гідравлічні характеристики з різними отворами дозуючих шайб.

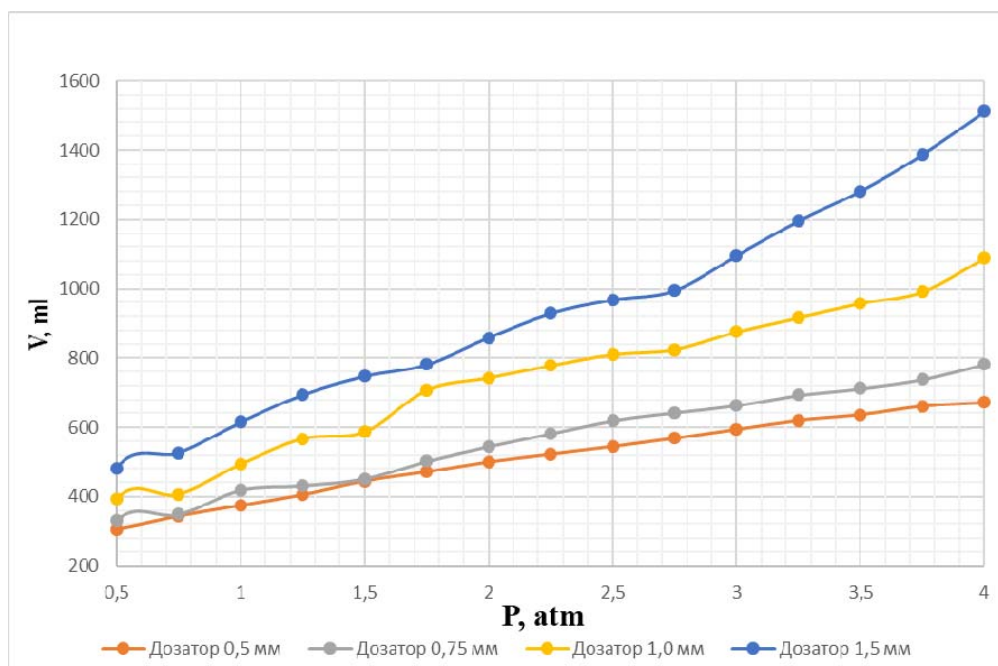


Рисунок 6. Гідравлічні характеристики дозуючих шайб з різним діаметром отвору

З рисунка 6 видно, яку гідравлічну характеристику мають шайби з різними отворами. Отже, якщо обертати вал з дозуючою шайбою в розробленому дозаторі, то можна встановлювати необхідну норму виливу.

Запропонований та розроблений нами дозатор є універсальним. Він може містити дозуючу шайбу з різними (рисунок 4) або однаковими (рисунок 7) отворами, що дає змогу швидко змінювати або корегувати норму виливу, а також дає можливість використовувати його з різною густиною рідких добрив. Також великим плюсом цього дозатора є те, що в нього практично відсутнє засмічення отворів.

Наступним експериментом було порівняння двох дозуючих шайб: одна була в експлуатації, а друга не була в експлуатації.

На рисунку 8 наведено гідравлічні характеристики дозаторів: того, що був в експлуатації (близько 2000 мотогодин), та який не був в експлуатації.



Рисунок 7. Дозуюча шайба з однаковими отворами

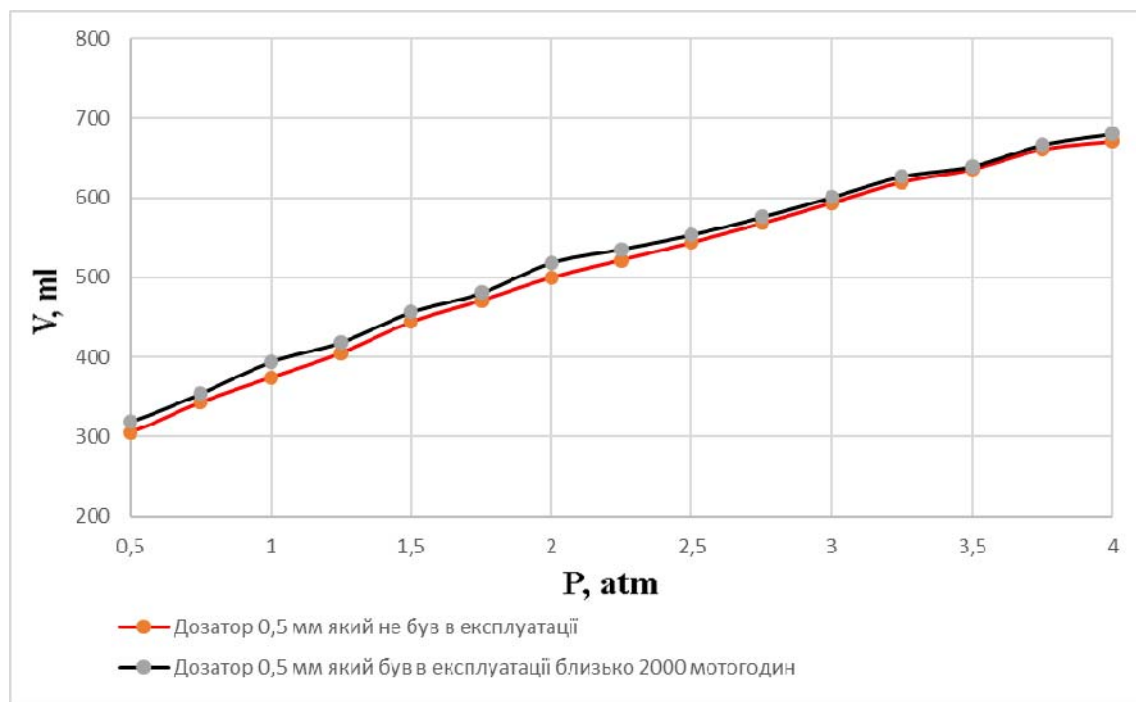


Рисунок 8. Гідрравлічні характеристики дозуючих шайб з діаметром отвору  $d=0,5$  мм

З рисунка 8 видно, що дозатор, який був в роботі, має більшу гідрравлічну характеристику виливу рідини. Це означає, що, якщо його використовувати надалі в технологічних операціях, це призведе до перевитрат рідин.

**Обговорення результатів.** За результатами проведених експериментальних дослідів з шайбою, яка має різні діаметри отворів, а саме: 0,5 мм, 0,75 мм, 1 мм та 1,5 мм, отримано їхні гідрравлічні характеристики. На основі отриманих гідрравлічних характеристик можна точно встановлювати норми витрат виливу рідини. Використання шайби з різними діаметрами отворів робить дозатор більш універсальним та продуктивним.

З хвилинної витрати рідини, що наведено на рисунку 8, можна побачити, що різниця двох дозаторів становить приблизно 20 мл/хв при тиску 2 атм. Якщо це все перевести в добову витрату, то це є дуже суттєво, розбіжність становитиме близько 30 л на кожному дозаторі. Це призведе до недотримання заданих норм виливу, що, в свою чергу, збільшує витрати.

Надалі можуть бути проведені дослідження в польових умовах, а саме монтаж розробленого дозатора з гвинтовим п'єзокерамічним двигуном на аплікатор з за-

водською системою виливу для внесення рідких добрив.

Окрім цього, також планується створення схеми заміщення за допомогою методу електромеханічних аналогій для узгодження зі схемою керування, що підвищить ефективність роботи дозатора з гвинтовим п'єзокерамічним двигуном.

**Висновки.** Проаналізовано конструктивні особливості сучасних моделей дозаторів для виливу рідких добрив. Виявлено їх переваги та недоліки.

*Наукова новизна* роботи полягає в удосконаленні конструкції дозатора, в якій запропоновано нове оригінальне рішення щодо автоматичного регулювання норми виливу за рахунок використання гвинтового п'єзокерамічного двигуна.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

- розроблено стенд для дослідження та визначення параметрів дозаторів;
- експериментально перевірено норми виливу хвилинної витрати для розробленої конструкції дозатора та отримано гідрравлічні характеристики;
- результати досліджень можуть бути використані при проектуванні дозаторів для виливу рідких добрив.

## Список використаних джерел

- [1] Зони варіабельності угідь. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://agro-business.com.ua/agro/mechanizatsiia-apk/item/10996-zony-variabelnosti-uhid.html>. Дата звернення: Лист. 03, 2022.
- [2] R. P. Beluhova-Uzunova, and D. M. Dunchev, "Precision farming – concepts and perspectives", *Problems of Agricultural Economics*, vol. 360(3), pp. 142-155, 2019. doi: 10.30858/zer/112132.
- [3] S. É. Parent, W. Dossou-Yovo, and N. Ziadi, "Corn response to banded phosphorus fertilizers with or without manure application in Eastern Canada", *Agronomy Journal*, vol. 112(3), pp. 2176-2187, 2020. doi: 10.1002/agj2.20115.
- [4] L. A. Kablan, V. Chabot, and A. Mailloux, "Variability in corn yield response to nitrogen fertilizer in Eastern Canada", *Agronomy Journal*, vol. 109(5), pp. 2231-2242, 2017. doi: 10.2134/agronj2016.09.0511.
- [5] P. C. Scharf, W. J. Wiebold, and J. A. Lory, "Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level", *Agronomy Journal*, vol. 94(3), pp. 435-441, 2002. doi: 10.2134/agronj2002.4350.
- [6] M. Bermudez, and A. P. Mallarino, "Yield and early growth responses to starter fertilizer in no-till corn assessed with precision agriculture technologies", *Agronomy Journal*, vol. 94(5), pp. 1024-1033, 2002. doi: 10.2134/agronj2002.1024.
- [7] W. H. Galpottage Dona, J. J. Schoenau, and T. King, "Effect of starter fertilizer in seed-row on emergence, biomass and nutrient uptake by six pulse crops grown under controlled environment conditions", *Journal of Plant Nutrition*, vol. 43(6), pp. 879-895, 2020. doi: 10.1080/01904167.2020.1711945.
- [8] A. P. Mallarino, N. Bergmann, and D. E. Kaiser, "Corn responses to in-furrow phosphorus and potassium starter fertilizer applications", *Agronomy. Journal*, vol. 103(3), pp. 685-694, 2011. doi: 10.2134/agronj2010.0377.
- [9] D. E. Kaiser, A. P. Mallarino, and M. Bermudez, "Corn grain yield, early growth, and early nutrient uptake as affected by broadcast and in-furrow starter fertilization", *Agronomy. Journal*, vol. 97(2), pp. 620-626, 2005. doi: 10.2134/agronj2005.0620.
- [10] M. Taghizadeh, A. Ghaffari, and F. Najafi, "Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications", *Comptes Rendus Mec.*, vol. 337(3), pp. 131-140, 2009. doi: 10.1016/j.crme.2009.03.009.
- [11] X. Xu, X. Han, and Y. Liu, "Modeling and dynamic analysis on the direct operating solenoid valve for improving the performance of the shifting control system", *International Review of Applied Sciences and Engineering*, vol. 7(12), p. 1266, 2017. doi: 10.3390/app7121266.
- [12] V. M. Sharapov, S. A. Filimonov, Zh. V. Sotula, K. V. Bazilo, L. G. Kunitskaya, and V. M. Zaika, "Improvement of piezoceramic scanners", *2013 IEEE XXXIII Int. Sci. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Kiev, 2013, pp. 144-146. doi: 10.1109/ELNANO.2013.6552063.
- [13] A. A. Bobtsov, V. I. Bojkov, and S. V. Bystrov, "Actuating devices and systems for micromovements", *ITMO University*, 2017.
- [14] S. Song, S. Shao, and M. Xu, "Piezoelectric inchworm rotary actuator with high driving torque and self-locking ability", *Sensors and Actuators*, vol. 282, pp. 174-182, 2018. doi: 10.1016/j.sna.2018.08.048.
- [15] M. E. Kiziroglou, B. Temelkuran, E. M. Yeatman, and G. Z. Yang, "Micro motion amplification", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 64037-64055, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2984606.
- [16] K. Spanner, and B. Koc, "Piezoelectric motors, an overview", *Actuators*, vol. 5(1), p. 6, 2016. doi: 10.3390/act5010006.
- [17] M. Hunstig, "Piezoelectric inertia motors – a critical review of history, concepts, design, applications, and perspectives", *Actuators*, vol. 6(1), p. 7, 2017. doi: 10.3390/act6010007.
- [18] M. Brahim, Y. Bernard, and I. Bahri, "Modelling, design, and real time implementation of robust H-infinity position control of piezoelectric actuator drive", *Int. J. Mechatronics and Automation*, vol. 6, no. 4, pp. 151-159, 2018. doi: 10.1504/IJMA.2018.095516.

- [19] K. Spanner, and B. Koc, "Piezoelectric motor using in-plane orthogonal resonance modes of an octagonal", *Actuators*, vol. 7(1), p. 2, 2018.  
doi: 10.3390/act7010002
- [20] C. Bazilo, S. Filimonov, N. Filimonova, and D. Bacherikov, "Determination of geometric parameters of piezoceramic plates of bimorph screw linear piezo motor for liquid fertilizer dispenser", In: *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, Z. Hu, S. Petoukhov, F. Yanovsky and M. He (Eds), vol. 463, pp. 84-94. Springer, Cham, 2022.  
doi: 10.1007/978-3-031-03877-8\_8.
- [7] W. H. Galpottage Dona, J. J. Schoenau, and T. King, "Effect of starter fertilizer in seed-row on emergence, biomass and nutrient uptake by six pulse crops grown under controlled environment conditions", *Journal of Plant Nutrition*, vol. 43(6), pp. 879-895, 2020.  
doi: 10.1080/01904167.2020.1711945.
- [8] A. P. Mallarino, N. Bergmann, and D. E. Kaiser, "Corn responses to in-furrow phosphorus and potassium starter fertilizer applications", *Agronomy Journal*, vol. 103(3), pp. 685-694, 2011.  
doi: 10.2134/agronj2010.0377.
- [9] D. E. Kaiser, A. P. Mallarino, and M. Bermudez, "Corn grain yield, early growth, and early nutrient uptake as affected by broadcast and in-furrow starter fertilization", *Agronomy Journal*, vol. 97(2), pp. 620-626, 2005.  
doi: 10.2134/agronj2005.0620.
- [10] M. Taghizadeh, A. Ghaffari, and F. Najafi, "Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications", *Comptes Rendus Mec.*, vol. 337(3), pp. 131-140, 2009.  
doi: 10.1016/j.crme.2009.03.009.
- [11] X. Xu, X. Han, and Y. Liu, "Modeling and dynamic analysis on the direct operating solenoid valve for improving the performance of the shifting control system", *International Review of Applied Sciences and Engineering*, vol. 7(12), p. 1266, 2017.  
doi: 10.3390/app7121266.
- [12] V. M. Sharapov, S. A. Filimonov, Zh. V. Sotula, K. V. Bazilo, L. G. Kunitskaya, and V. M. Zaika, "Improvement of piezoceramic scanners", *2013 IEEE XXXIII Int. Sci. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Kiev, 2013, pp. 144-146.  
doi: 10.1109/ELNANO.2013.6552063.
- [13] A. A. Bobtsov, V. I. Bojkov, and S. V. Bystrov, "Actuating devices and systems for micromovements", *ITMO University*, 2017.
- [14] S. Song, S. Shao, and M. Xu, "Piezoelectric inchworm rotary actuator with high driving torque and self-locking ability", *Sensors and Actuators*, vol. 282, pp. 174-182, 2018.  
doi: 10.1016/j.sna.2018.08.048.
- [15] M. E. Kiziroglou, B. Temelkuran, E. M. Yeatman, and G. Z. Yang, "Micro motion amplification", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 64037-64055, 2020.  
doi: 10.1109/ACCESS.2020.2984606.

## References

- [1] Zones of land variability. [Online]. Available: <http://agro-business.com.ua/agro-mekhanizatsiia-apk/item/10996-zony-variabelnosti-uhid.html>. Accessed on: Nov. 03, 2022 [in Ukrainian].
- [2] R. P. Beluhova-Uzunova, and D. M. Dunchev, "Precision farming – concepts and perspectives", *Problems of Agricultural Economics*, vol. 360(3), pp. 142-155, 2019.  
doi: 10.30858/zer/112132.
- [3] S. É. Parent, W. Dossou-Yovo, and N. Ziadi, "Corn response to banded phosphorus fertilizers with or without manure application in Eastern Canada", *Agronomy Journal*, vol. 112(3), pp. 2176-2187, 2020.  
doi: 10.1002/agj2.20115.
- [4] L. A. Kablan, V. Chabot, and A. Mailloux, "Variability in corn yield response to nitrogen fertilizer in Eastern Canada", *Agronomy Journal*, vol. 109(5), pp. 2231-2242, 2017.  
doi: 10.2134/agronj2016.09.0511.
- [5] P. C. Scharf, W. J. Wiebold, and J. A. Lory, "Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level", *Agronomy Journal*, vol. 94(3), pp. 435-441, 2002.  
doi: 10.2134/agronj2002.4350.
- [6] M. Bermudez, and A. P. Mallarino, "Yield and early growth responses to starter fertilizer in no-till corn assessed with precision agriculture technologies", *Agronomy Journal*, vol. 94(5), pp. 1024-1033, 2002.  
doi: 10.2134/agronj2002.1024.

- [16] K. Spanner, and B. Koc, "Piezoelectric motors, an overview", *Actuators*, vol. 5(1), p. 6, 2016.  
doi: 10.3390/act5010006.
- [17] M. Hunstig, "Piezoelectric inertia motors – a critical review of history, concepts, design, applications, and perspectives", *Actuators*, vol. 6(1), p. 7, 2017.  
doi: 10.3390/act6010007.
- [18] M. Brahim, Y. Bernard, and I. Bahri, "Modelling, design, and real time implementation of robust H-infinity position control of piezoelectric actuator drive", *Int. J. Mechatronics and Automation*, vol. 6, no. 4, pp. 151-159, 2018.  
doi: 10.1504/IJMA.2018.095516.
- [19] K. Spanner, and B. Koc, "Piezoelectric motor using in-plane orthogonal resonance modes of an octagonal", *Actuators*, vol. 7(1), p. 2, 2018.  
doi: 10.3390/act7010002
- [20] C. Bazilo, S. Filimonov, N. Filimonova, and D. Bacherikov, "Determination of geometric parameters of piezoceramic plates of bimorph screw linear piezo motor for liquid fertilizer dispenser", In: *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, Z. Hu, S. Petoukhov, F. Yanovsky and M. He (Eds), vol. 463, pp. 84-94. Springer, Cham, 2022.  
doi: 10.1007/978-3-031-03877-8\_8.

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

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

**D. S. Bacherikov**, Postgraduate

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

## DESIGN OF THE PRECISE DOSING UNIT IN THE SYSTEM OF INFLUENCE OF LIQUID FERTILIZERS

*With the development of agriculture, the demand for the use of fertilizers and drugs to achieve the maximum yield in the fields increases. One of the important stages for obtaining a good harvest is spraying and application of liquid fertilizers. Only in the last 10 years in Ukraine, the volume of application of liquid complex fertilizers, microfertilizers, nitrogen fertilizers and drugs has increased four times. Liquid fertilizers are poured using special systems. The main element of the pouring system is dispensers of various types.*

*The main features of modern models of dispensers for pouring liquid fertilizers have been determined. Their advantages and disadvantages are revealed.*

*The work presents a classification of the main methods of controlling the liquid pouring system.*

*In the work, a new design of a dispenser with a piezoceramic motor has been proposed and manufactured. In the experimental model, a new technical solution for regulating the flow rate is used. The proposed and developed dispenser is universal, it contains a metering washer with different or identical holes, which allows to quickly change or adjust the rate of pouring, and also allows to use it with different densities of liquid fertilizers. Also, a big plus of this dispenser is that it has practically no clogging of holes. Different versions of dosing washers, with the same holes and holes of different calibers, are also offered, which will significantly increase the efficiency of the system.*

*The hydraulic scheme of the developed stand for checking and determining the parameters of dispensers is presented.*

*With the help of the developed stand, the dependences of hydraulic characteristics of the developed dispenser are experimentally obtained. Research results can be used in the design of dispensers for pouring liquid fertilizers.*

**Keywords:** agriculture, dispenser, metering washer, piezoelectric motor, bimorph piezoelement.

[0000-0002-7547-5081]

**І. С. Жайворонок,**

Черкаський державний технологічний університет,  
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна  
e-mail: zhaivoronok1988@ukr.net; klondaikfaust@gmail.com

[0000-0002-3264-9096]

**О. В. Коваленко**

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

## **ВПЛИВ ОСНОВНИХ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ СТРІЧКОВОГО ПОТОКУ ЕЛЕКТРОНІВ НА ЯКІСТЬ ОТРИМУВАНОГО МІКРОРЕЛЬЄФУ ПОВЕРХНІ ОПТИЧНОГО СКЛА**

*У статті наведено результати дослідження впливу основних робочих параметрів стрічкового потоку електронів на якість мікрорельєфу поверхні оптичного скла. Встановлено залежність впливу основних робочих параметрів (форми, розміру та розподілу густини струму) низькоенергетичного електронного потоку стрічкової форми на якість мікрорельєфу поверхні оптичного скла сорту «крон». Це дозволило оцінити процес взаємодії потоку електронів з поверхнею оптичного скла. Також було встановлено, що корисний струм потоку електронів становить близько 30 % від загального струму емісії катода електронної гармати. Показано, що на точність визначення робочих параметрів стрічкового потоку електронів методом зондування можуть впливати такі фактори: зменшення діаметра зондів під впливом потоку електронів та нагрівання зондів під час вимірювання. При цьому сумарна похибка зондового методу визначення густини струму потоку електронів не перевищувала 8 %. Методом атомно-силової мікроскопії встановлено, що після оброблення поверхонь оптичного скла сорту «крон» низькоенергетичним електронним пучком стрічкоподібної форми за умови забезпечення раціональної форми, розміру та розподілу густини струму як у робочому просторі, так і на обробленій поверхні нерівності зменшуються від 40-75 нм до 3,5-5 нм.*

**Ключові слова:** стрічковий потік електронів, визначення робочих параметрів, зондовий метод, мікрорельєф поверхні, оптичне скло.

**Вступ.** Електронно-променеве оброблення (ЕПО) є одним із найперспективніших видів оброблення елементів оптоелектроніки, мікрооптики тощо. Як встановлено в [1-5], найбільш істотний вплив на якість (стан поверхні та її залишкові мікронерівності) та ефективність (час оброблення, ймовірність отримання гарантованих результатів) такого оброблення мають робочі параметри стрічкового електронного потоку. Проте серед основних контрольованих робочих параметрів електронного потоку найменш стабільними є параметри потоку електронів (форма, розмір і розподіл густини струму по поперечному перерізу). Тому різні установки ЕПО, особливо в процесах, що вимагають високої точності та якості оброблення, оснащуються електронними системами керування енергією [6, 7].

Серед науковців, які досліджували вплив стрічкового потоку електронів на поверхню оптичного скла, слід відзначити В. Антонюка, М. Бондаренка, В. Ващенко,

Я. Гулояна, Г. Канашевича, П. Маццольді, М. Рудя та інших [8-12].

Проте обґрунтовані дані про вплив робочих параметрів електронного потоку на якість поверхні оптичного скла в роботах цих вчених розглядаються недостатньо, особливо в питаннях оперативного визначення параметрів електронного потоку. Перспективним у цьому напрямі є використання зондових методів визначення щільності розподілу електронів в електронній стрічці.

Раніше в роботі [13] використано оригінальний метод ротаційного зонда, який у роботі [14] був адаптований для вимірювання параметрів стрічкових електронних потоків, згідно з яким зондування відбувається шляхом рівномірного поступального переміщення блока зондів уздовж робочої поверхні (на різних відстанях від цієї поверхні) та якомога більш паралельно до неї. Проте цей метод також має низку недоліків, пов'язаних з впливом на вимірювальну систему вторинних еле-

ктронів, емітованих поверхнею матеріалу (при наближенні зондуєчої системи до поверхні) і розігрівом самого зондового блока та знімних металевих електродів, що суттєво впливає на здатність такої системи щодо адекватного та правильного вимірювання, чим знижує точність визначення робочих параметрів електронної стрічки, а також не дозволяє встановити залежність між цими параметрами та параметрами якості поверхні оптичного скла. Тому удосконалення зондового методу встановлення розподілу електронів в електронній стрічці за енергетичними показниками, що дозволило б встановити вплив робочих параметрів стрічкового електронного потоку на якість поверхні оптичного скла, є питанням актуальним.

*Метою роботи* є визначення залежності впливу основних робочих параметрів стрічкового потоку електронів (форми, розміру та розподілу густини електронного струму) на якість поверхні оптичного скла (відсутність мікро- та макродефектів поверхні, мінімальні залишкові мікронерівності тощо).

*Задачі*, вирішенню яких присвячена ця робота, є такими:

- встановити чинники, які впливають на точність визначення робочих параметрів електронного потоку стрічкової форми;
- оцінити взаємодію стрічкового електронного потоку з поверхнею оптичного скла шляхом дослідження основних робочих параметрів такого потоку;
- дослідити покращення якості мікрорельєфу поверхні оптичного скла від впливу стрічкового електронного потоку.

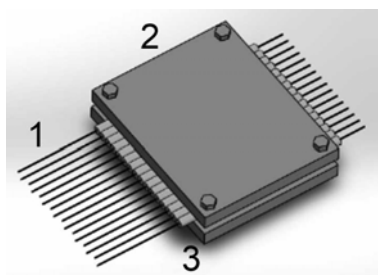
**Виклад основного матеріалу.** Необхідність проведення зондування електронного потоку в процесі його впливу на оброблюва-

ний матеріал спрямована на регулювання робочих параметрів такого потоку в режимі реального часу, чим нівелюються конструктивні недоліки існуючих на сьогодні електронно-променевих гармат та покращується якість процесу оброблення.

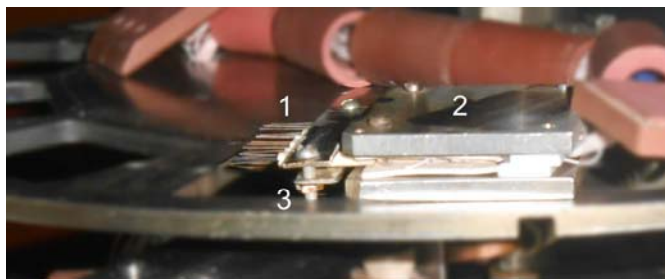
Так, стандартна електронно-променева гармата Пірса (ЕПГ), що використовується для формування стрічкового потоку електронів, має такі недоліки: нерівномірність розподілу потоку електронів уздовж стрічки (пов'язано з провисанням вольфрамового дрютяного катода при нагріванні до робочих температур і відтоком тепла на його затискачах), тривалий час розігріву катода (що веде до його старіння), недотримання форми потоку електронів на поверхні оброблюваного матеріалу, що пов'язано з поляризацією поверхні діелектрика (оптичного скла).

Ефективними методами оперативного встановлення розподілу електронного потоку по поверхні оброблюваного матеріалу (особливо діелектриків, яким притаманна поляризація поверхні від впливу низькоенергетичного (з енергією, меншою за 10 кеВ) потоку електронів) є методи зондування [15]. Серед таких методів для зондування стрічкового електронного потоку добре зарекомендував себе метод зондування, що як засіб зондування використовує модуль, який містить лінійний масив вольфрамових дрютяних електродів-зондів [16].

Такий зондовий модуль первинного вимірювального перетворювача для визначення характеристик стрічкового електронного потоку являє собою лінійний масив з 16 вольфрамових зондів (на відстані 5 мм між ними) в одній площині паралельно один одному (рисунк 1).



а)



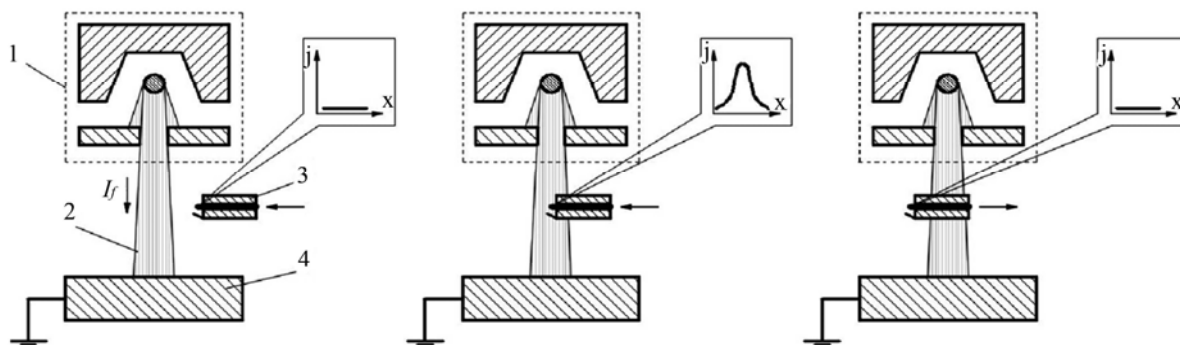
б)

**Рисунок 1.** Тривимірна модель (а) та зовнішній вигляд (б) блока зондування стрічкового електронного потоку: 1 – вольфрамові зонди, 2 – металевий корпус зондуєчого модуля, 3 – екрануюча пластина

Однак конструкція, представлена авторами цієї роботи, відрізняється від конструкції, запропонованої в [16], тим, що під час роботи на вольфрамові зонди подається напруга 30-80 В, що усуває ефект відштовхування електронів на краях зондів при визначенні струму, який наводиться в них за рахунок дії сили Ампера. Це дозволяє визначити

зміну розподілу густини струму в робочому просторі ЕПГ по довжині стрічки електронного потоку (максимально за один прохід на 80 мм).

Зондування електронного потоку стрічкової форми в робочому просторі електронної гармати відбувається за схемою і в послідовності, що зображені на рисунку 2.



**Рисунок 2. Схема зондування електронного потоку стрічкової форми в робочому просторі електронно-променевої гармати:** 1 – модуль електронно-променевої гармати Пірса, 2 – стрічковий електронний потік, 3 – модуль зондового вимірювального перетворювача, 4 – колектор електронного потоку;  $I_f$  – струм електронного потоку

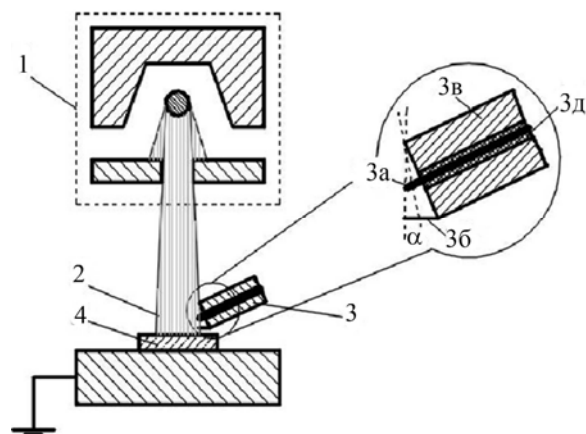
Так, на етапі формування електронного променя в ЕПГ зонд підводиться до електронного потоку (паралельно поверхні, яка підлягає впливу на неї цього потоку) і далі – в зону його дії (між анодом і поверхнею оброблюваного матеріалу). Поступове сканування стрічкового електронного потоку із заданою швидкістю таким зондовим модулем дозволяє отримати динамічний розподіл електронів у стрічці – як у просторі, так і на поверхні оброблюваного матеріалу.

Щоб захистити зонди від впливу вторинних електронів, що емітуються з оброблюваного матеріалу, вони закріплені на краю рухомої платформи, щоб усі електрони потоку, не відібрані зондами, не впливали на роботу перетворювача.

Для високоточного визначення розподілу струму в електронному потоці та на поверхні оброблюваного матеріалу зондовий модуль розташовують під кутом, що дорівнює половині кута розходження електронного потоку (приблизно  $1,4-1,6^\circ$ ) (рисунк 3).

Струм кожного із зондів через мідний дріт і вакуумний електричний вхід подається на реєструючий пристрій, детально описаний в роботі [17]. Сигнал, отриманий від кожного зонда, який змінюється, коли він проходить під електронним потоком, є результатом ін-

тегрування розподілу струму вздовж поперечного перерізу електронного потоку, який перетинає вольфрамовий зонд.



**Рисунок 3. Схема зондування електронного потоку стрічкової форми на поверхні оптичного скла:** 1 – модуль електронно-променевої гармати Пірса, 2 – стрічковий електронний потік, 3 – модуль зондового вимірювального перетворювача, 3а – вольфрамовий зонд, 3б – екран, що захищає від впливу вторинних електронів з поверхні, 3в – металевий корпус, 3г – діелектрична прокладка, 4 – дослідний зразок оптичного скла,  $\alpha$  – половина кута розходження електронного потоку ( $\alpha \approx 1,4-1,6^\circ$ )

Щоб отримати розподіл густини струму по поперечному перерізу електронів, записуючий пристрій проводить перетворення струму зонда в кожній позиції зондового модуля. Після цього мікропроцесор виконує чисельне диференціювання характеристик зондів і перерахунок густини струму в поточному положенні зондів:

$$j(x) = (i d(x) - i d(x - \Delta x)) / d \cdot v \cdot t,$$

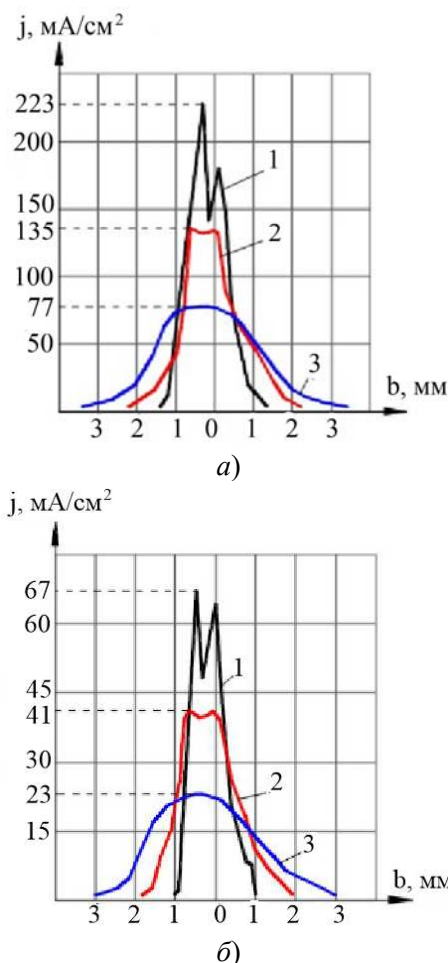
де  $j(x)$  – густина струму, діагностованого в точці  $x$ ;  $i d(x)$  – поточне значення струму, діагностованого зондовим модулем;  $i d(x - \Delta x)$  – значення струму, діагностованого за попереднє вимірювання;  $d$  – діаметр зонда;  $v$  – швидкість переміщення зондового модуля;  $t$  – період між вимірюваннями струмів.

Для вимірювання часу використано високоточні кварцові таймери (абсолютна похибка визначення часу не перевищує 0,042 с/год).

Отримані дані та розрахований за ними розподіл густини струму в робочій області ЕПГ передається на ПК для подальшого оброблення та візуалізації.

Основними перевагами розробленого методу зондування є: можливість проведення експрес-зондування електронного потоку неосьової форми (в цьому випадку стрічки) за один цикл з подальшим електронно-променевим обробленням, просте математичне обчислення вимірюваних характеристик зонда, можливість проведення зондування в автоматичному режимі. Вимірювані характеристики відразу після визначення густини струму передаються в автоматичну систему керування електронним обробленням для подальшого аналізу і корегування (за потребою). Для зондування стрічкового електронного потоку розроблено схеми, призначені для визначення форми розміру та розподілу густини струму потоку електронів як засобу оброблення в робочому просторі ЕПГ та на поверхні оброблюваного матеріалу (оптичного скла).

**Результати досліджень.** Аналіз зондових характеристик електронного потоку. На рисунку 4 зображено зондові характеристики, отримані розробленим пристроєм, розташованим у центрі електронного потоку, шляхом проведення зондування робочого простору ЕПГ (рисунк 4, а) та по поверхні оптичного скла (рисунк 4, б).



**Рисунок 4. Характеристики зонда, отримані в робочому просторі ЕПГ (а) та по поверхні оптичного скла (б):**

а) розподіл густини зондового струму вздовж перерізу електронного потоку в робочому просторі ЕПГ; б) щільність розподілу зондового струму по поверхні оптичного скла при робочих струмах електронного потоку: 1 –  $I_f = 150$  мА; 2 –  $I_f = 175$  мА; 3 –  $I_f = 200$  мА

Пробні випробування зондового пристрою проводились за умов і режимів, за яких відбувається електронно-променеве оброблення оптичного скла, а саме: відстань від зондів до анода  $H = 20$  мм, прискорювальна напруга  $U = 3$  кВ, струм розігріву катода  $I_c = 15$  А, робочий струм електронного потоку  $I_f = 150$ -200 мА.

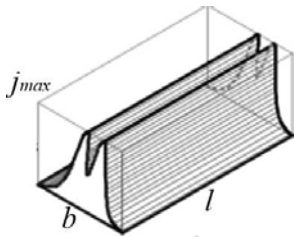
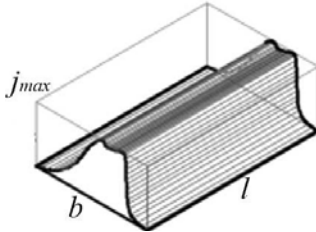
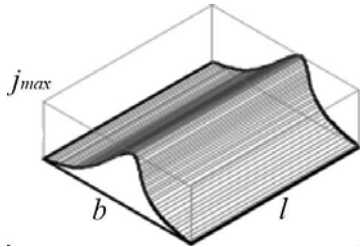
Як видно з рисунка 4, при порівнянні результатів вимірювання густини струму електронного потоку в робочому просторі ЕПГ і по поверхні оптичного скла форми розподілу електронного потоку в обох випадках однакової за умов однакових робочих струмів електронного потоку, його ширина та кути розпо-

дження електронного потоку (що становлять близько 8-10 %) змінюються пропорційно відстаням між площинами зондування. У той же час результати сканування щільності розподілу струму електронного потоку показали, що, незалежно від повного робочого струму електронного потоку, струм електронного

потoku на поверхні оптичного скла (так званий корисний струм) становить близько 30 %.

В результаті зондування стрічкового електронного потоку при обробленні оптичного скла визначено основні робочі параметри такого потоку на поверхні оптичного скла К8 (таблиця 1).

Таблиця 1. Основні робочі параметри потоку електронів на поверхні оптичного скла за різних значень струмів електронного потоку

| № | Режим оброблення електронним потоком                           | Форма електронного потоку                                                           | Довжина $l$ і ширина $b$ електронного потоку, мм | Максимальна густина струму електронного потоку, $j_{max}$ , мА/см <sup>2</sup> |
|---|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| а | $H = 20$ мм,<br>$U = 3$ кВ,<br>$I_c = 15$ А,<br>$I_f = 150$ мА |    | $l = 58$ мм,<br>$b = 2$ мм                       | $j_{max} = 67$ мА/см <sup>2</sup>                                              |
| б | $H = 20$ мм,<br>$U = 3$ кВ,<br>$I_c = 15$ А,<br>$I_f = 175$ мА |   | $l = 59$ мм,<br>$b = 3,5$ мм                     | $j_{max} = 41$ мА/см <sup>2</sup>                                              |
| в | $H = 20$ мм,<br>$U = 3$ кВ,<br>$I_c = 15$ А,<br>$I_f = 200$ мА |  | $l = 61,5$ мм,<br>$b = 6$ мм                     | $j_{max} = 23$ мА/см <sup>2</sup>                                              |

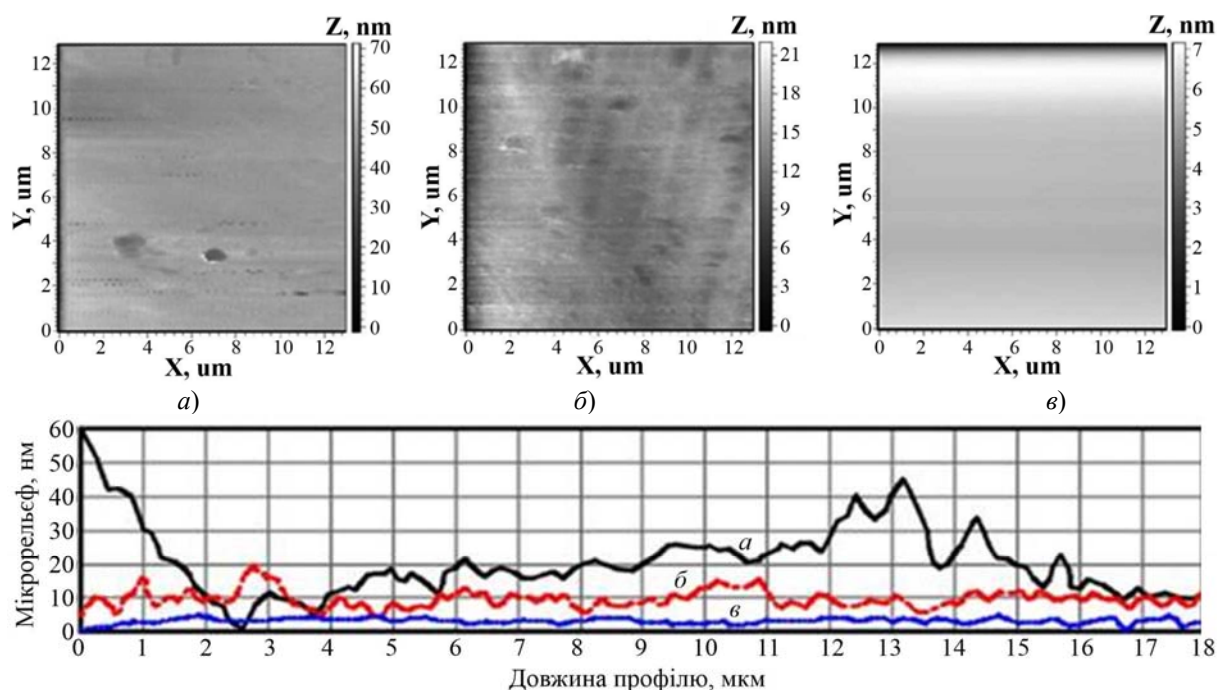
В результаті зондування стрічкового електронного потоку встановлено, що на практиці за різних режимів електронно-променевого оброблення можна отримати різні закони розподілу густини струму, відмінні від гаусівських.

**Обговорення результатів.** Для досягнення мети цієї роботи було проведено ряд досліджень щодо визначення залежності впливу основних робочих параметрів стрічкового електронного потоку на мікрорельєф поверхні обробленого оптичного скла.

Такі дослідження проводилися методом атомно-силової мікроскопії на приладі «NT-

206». Як вимірювальний інструмент використовувалися кремнієві зонди «Ultrasharp CSC12».

У результаті проведених досліджень встановлено, що поверхня оптичного скла, оброблена за режимом:  $H = 20$  мм,  $U = 3$  кВ,  $I_c = 15$  А,  $I_f = 150$  мА, є неоднорідною, має високу пористість і містить мікродфекти поверхні (тріщини, напливи тощо) (рисунк 5), що відповідає двопіковій гаусовій формі розподілу електронного потоку (див. таблицю 1, а). У цьому випадку мікронерівності такої поверхні становлять 40-75 нм.



**Рисунок 5. Топограма (вгорі) поверхні оптичного скла К8 на 13×13 мкм і профіль (знизу) рельєфу по головній діагоналі топограми за таких режимів оброблення електронним потоком:**

$H = 20$  мм,  $U = 3$  кВ,  $I_c = 15$  А,  $I_f = 150$  мА (а);  $I_f = 175$  мА (б);  $I_f = 200$  мА (в)

При обробленні поверхні оптичного скла електронним потоком в режимі:  $H = 20$  мм,  $U = 3$  кВ,  $I_c = 15$  А,  $I_f = 175$  мА (рисунки 5, б, таблиця 1, б) фактично, як і в попередньому випадку, спостерігалася неоднорідність поверхні, а залишкові мікронерівності були зменшені до 12-24 нм. Проте оброблення оптичної поверхні стрічковим електронним потоком з максимальним струмом  $I_f = 200$  мА (рисунки 5, в, таблиця 1, в) дозволяє максимально (до 99,8 %) усунути мікродефекти та пористість (до 93,7 %) поверхні, що дозволяє зробити її більш однорідною. Залишкові мікронерівності при цьому зменшуються до 3,5-5 нм.

**Висновки.** Таким чином, за допомогою розробленого за участю авторів методу та засобу зондування стрічкового електронного потоку визначено основні робочі характеристики (форму, величину та розподіл густини струму) цього потоку, що дозволило оцінити взаємодію електронного потоку з поверхнею оптичного скла. Встановлено, що корисний струм електронного потоку становить приблизно 30 % від загального струму емісії електронів з катода.

**Наукова новизна:** вперше встановлено, що на точність визначення робочих параметрів стрічкового електронного потоку зондува-

льним методом можуть впливати такі фактори: зменшення діаметра зондів під дією електронного потоку та в процесі нагрівання зондів під час вимірювання. Показано, що приблизно після 40-50 вимірювань відбувається значне зменшення діаметра зондів до 5 %, після чого виникає необхідність встановлення нових зондів з ідентичними характеристиками. При цьому відбувається зменшення впливу нагрівання зонда в процесі вимірювання, попередній нагрів здійснюється кількома електронними проходками потоку. В той же час враховується похибка записуючого пристрою, а сумарна похибка зондового методу визначення щільності електронного потоку не перевищує 8 %.

Методом атомно-силової мікроскопії встановлено, що після оброблення поверхонь оптичного скла сорту «крон» низькоенергетичний електронний потік формує стрічку з урахуванням її оптимальної форми, розмірів і розподілу густини струму в робочому просторі та на поверхні – зменшення мікронерівностей з 75 нм до 3,5-5 нм.

**Практична цінність** роботи полягає у виготовленні за запропонованою технологією різноманітних пристроїв, комплексів (як фокусуємих фотоприймальних та віддзеркалюємих компонентів). В цілому, поверхня скла

після електронно-променевого оброблення має більш однорідну структуру і збережена від мікроефектів, на відміну від поверхонь без електронно-променевого оброблення, що знаходить застосування.

В перспективі авторами планується проведення систематизації отриманих результатів з подальшими аналізом і регулюванням робочих параметрів електронного потоку без посередньо в процесі оброблення.

### Список використаних джерел

- [1] M. Bondarenko, I. Bondarenko, V. Antoniuk, D. Telezhynskyi, and V. Andriienko, "Peculiarities of metalized surfaces modification of silicon elements of microelectromechanical systems with low-power electronic flow", *Materials science. Non-equilibrium phase transformations*, no. 2, pp. 53-55, 2017.
- [2] I. Yatsenko, V. Antoniuk, M. Bondarenko, and V. Vashchenko, "Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making", *Innovations in discrete production*, no. 1, pp. 13-15, 2015.
- [3] Y. I. Kovalenko, M. A. Bondarenko, E. V. Vertsanova, I. V. Iatsenko, V. A. Andriienko, and Y. Y. Bondarenko, "Study of ordered oxide patterns got on the dielectric surfaces with the combined electronic technology", in *XIV Int. Conf. Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems*, Ivano-Frankivsk, May, 20-25, 2013.
- [4] I. V. Yatsenko, V. S. Antonyuk, V. I. Gordienko, O. V. Kyrychenko, and V. A. Vashchenko, "Increase of reliability of optic-electronic devices by means of finishing electron-beam processing of their optical element". *Mach. Technol. Mater.*, no. 4, pp. 160-164, 2018.
- [5] В. А. Ващенко, І. В. Яценко, Ю. Г. Лега, та О. В. Кириченко, *Основи електронної обробки виробів з оптичних матеріалів*. Київ, Україна: Наук. думка, 2011.
- [6] E. Skoryna, V. Medyanyk, M. Bondarenko, I. Bondarenko, S. Bilokin, and V. Antoniuk, "The investigation of the nanoreliefs of optical elements of measuring instruments, which modified by electron-beam microprocessing", *Innovations*, no. 1, pp. 30-33, 2018.
- [7] O. Andriienko, M. Bondarenko, and V. Antonyuk. "Automated system for controlling the characteristics of microsystem equipment devices", in *19 Междунар. науч.-практ. конф. Качество, стандартизация, контроль: теория и практика*, Одесса, 9-13 сент., 2019.
- [8] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kyrychenko, V. Vashchenko, and V. Tsybulin, "Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making", *Innovations in Discrete Production*, no. 1, pp. 9-12, 2016.
- [9] Г. В. Канашевич, В. А. Ващенко, та М. О. Бондаренко, "Перспективи використання електронного променя в технологіях інтегральної оптики". *Вісник Черкаського інженерно-технологічного інституту*, № 2, с. 189-193, 2000.
- [10] I. V. Yatsenko, V. S. Antonyuk, V. A. Vashchenko, O. V. Kyrychenko, and O. M. Tishchenko, "Regularities of influence of electron-beam technology modes on the performance characteristics of optical elements". *Journal of Nano- and Electronic Physics*, no. 11 (2), pp. 02014-02021, 2019. doi: 10.21272/jnep.11(2).02014.
- [11] I. Yatsenko, "Experimental and statistical models of impact determination of the electron beam parameters on surface layers properties of optical elements in precision instruments building", *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*, pp. 100-110, 2016. doi: 10.15276/opu.1.48.2016.12.
- [12] T. Fujita, H. Nishihara, and J. Koyama, "Fabrication of micro lenses using electron-beam lithography", *Optics letters*, no. 6 (12), pp. 613-615, 1981.
- [13] M. P. Rud, V. P. Boyko, Yu. I. Kovalenko, M. A. Bondarenko, G. V. Kanashevich, and V. A. Vaschenko, "The express-diagnostics of band electronic stream", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, с. 49-51, 2005.
- [14] I. Yatsenko, V. Antoniuk, M. Bondarenko, and V. Vashchenko. "Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making", in *Int. Sci.-Tech. Conf. Innovations in ingeneering*, Burgas, Sept. 9-12, 2015.

- [15] J. Henoc, *In Quantitative Electron Probe Microanalysis*. Washington, USA: National Bureau of Standards Spec., 1968.
- [16] M. Bondarenko, V. Antonyuk, Yu. Kovalenko, M. Rud, and R. Haidash, "Research of volt-ampere characteristics of the wire pierce electron gun at electron-beam microprocessing of dielectrics", *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, no. 4 (1), pp. 58-64, 2018.
- [17] R. Gaidash, S. Ralchenko, V. Medyanik, and M. Bondarenko, "Control of spatial characteristics of the ribbon-shaped electron stream in the process of processing optical coverings of optoelectronics products", *Machines. Technologies. Materials*, no. 10, pp. 398-401, 2018.
- References**
- [1] M. Bondarenko, I. Bondarenko, V. Antoniuk, D. Telezhynskyi, and V. Andriienko, "Peculiarities of metalized surfaces modification of silicon elements of microelectromechanical systems with low-power electronic flow", *Materials science. Non-equilibrium phase transformations*, no. 2, pp. 53-55, 2017.
- [2] I. Yatsenko, V. Antoniuk, M. Bondarenko, and V. Vashchenko, "Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making", *Innovations in discrete production*, no. 1, pp. 13-15, 2015.
- [3] Y. I. Kovalenko, M. A. Bondarenko, E. V. Vertsanova, I. V. Iatsenko, V. A. Andriienko, and Y. Y. Bondarenko, "Study of ordered oxide patterns got on the dielectric surfaces with the combined electronic technology", in *XIV Int. Conf. Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems*, Ivano-Frankivsk, May, 20-25, 2013.
- [4] I. V. Yatsenko, V. S. Antonyuk, V. I. Gordienko, O. V. Kyrychenko, and V. A. Vashchenko, "Increase of realibility of optic-electronic devices by means of finishing electron-beam processing of their optical element". *Mach. Technol. Mater.*, no. 4, pp. 160-164, 2018.
- [5] V. A. Vashchenko, I. V. Iatsenko, Yu. H. Leha, and O. V. Kyrychenko, *Fundamentals of electronic processing of products from optical materials*. Kyiv, Ukraine: Nauk. dumka, 2011 [in Ukrainian].
- [6] E. Skoryna, V. Medyanik, M. Bondarenko, I. Bondarenko, S. Bilokin, and V. Antoniuk, "The investigation of the nanoreliefs of optical elements of measuring instruments, which modified by electron-beam microprocessing", *Innovations*, no. 1, pp. 30-33, 2018.
- [7] O. Andriienko, M. Bondarenko, and V. Antonyuk, "Automated system for controlling the characteristics of microsystem equipment devices", in *19th Int. Sci.-Pract. Conf. Quality, Standardization, Control: Theory and Practice*, Odessa, Sept. 9-13, 2019.
- [8] I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kyrychenko, V. Vashchenko, and V. Tsybulin, "Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making", *Innovations in Discrete Production*, no. 1, pp. 9-12, 2016.
- [9] H. V. Kanashevych, V. A. Vashchenko, and M. O. Bondarenko, "Prospects for the use of an electron beam in technologies of integrated optics", *Visnyk Cherkaskoho inzhenerno-tekhnolohichnoho instytutu*, no. 2, pp. 189-193, 2000 [in Ukrainian]
- [10] I. V. Yatsenko, V. S. Antonyuk, V. A. Vashchenko, O. V. Kyrychenko, and O. M. Tishchenko, "Regularities of influence of electron-beam technology modes on the performance characteristics of optical elements". *Journal of Nano- and Electronic Physics*, no. 11 (2), pp. 02014-02021, 2019. doi: 10.21272/jnep.11(2).02014.
- [11] I. Yatsenko, "Experimental and statistical models of impact determination of the electron beam parameters on surface layers properties of optical elements in precision instruments building", *Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi*, pp. 100-110, 2016. doi: 10.15276/opu.1.48.2016.12.
- [12] T. Fujita, H. Nishihara, and J. Koyama, "Fabrication of micro lenses using electron-beam lithography", *Optics letters*, no. 6 (12), pp. 613-615, 1981.
- [13] M. P. Rud, V. P. Boyko, Yu. I. Kovalenko, M. A. Bondarenko, G. V. Kanashevich, and V. A. Vaschenko, "The express-diagnostics of band electronic stream", *Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu*, no 3, pp. 49-51, 2005.
- [14] I. Yatsenko, V. Antoniuk, M. Bondarenko, and V. Vashchenko. "Influence of param-

- ters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making", in *Int. Sci.-Tech. Conf. Innovations in ingeneering*, Burgas, Sept. 9-12, 2015.
- [15] J. Henoc, *In Quantitative Electron Probe Microanalysis*. Washington, USA: National Bureau of Standards Spec., 1968.
- [16] M. Bondarenko, V. Antonyuk, Yu. Kovalenko, M. Rud, and R. Haidash, "Research of volt-ampere characteristics of the wire pierce electron gun at electron-beam micro-processing of dielectrics", *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, no. 4 (1), pp. 58-64, 2018.
- [17] R. Gaidash, S. Ralchenko, V. Medyanyk, and M. Bondarenko, "Control of spatial characteristics of the ribbon-shaped electron stream in the process of processing optical coverings of optoelectronics products", *Machines. Technologies. Materials*, no. 10, pp. 398-401, 2018.

**I. S. Zhayvoronok,**

Cherkasy State Technological University,  
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine  
e-mail: zhaivoronok1988@ukr.net; klondaikfaust@gmail.com

**O. V. Kovalenko**

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

### **THE INFLUENCE OF THE MAIN OPERATING PARAMETERS OF THE RIBBON-SHAPED FLOW OF ELECTRONS ON THE QUALITY OF THE OBTAINED MICRORELIEF ON THE OPTICAL GLASS SURFACE**

*The article presents the results of the study of the influence of the main operating parameters of the ribbon-shaped flow of electrons on the quality of the microrelief on the optical glass surface. The purpose of the work is to determine the influence of the main operating parameters of the ribbon-shaped flow of electrons (shape, size and distribution of the electron current density) on the quality of the optical glass surface (absence of micro- and macro-defects on the surface, minimal residual micro-uniformities, etc.). The dependence of the influence of the main operating parameters of the low-energy ribbon-shaped flow of electrons on the quality of the surface microrelief of the "crown" optical glass is established, which makes it possible to evaluate the process of interaction of the electron flow with the optical glass surface. It is also established that the useful current of the electron flow is about 30% of the total emission current of the cathode of the electron gun. It is shown that such factors as: the decrease in the diameter of probes under the influence of the electron flow and the heating of probes during the measurement can affect the accuracy of determining the operating parameters of the ribbon-shaped electron flow by the probing method. Thus, after approximately 40-50 measurements, a significant decrease in the diameter of probes to 5% occurs, after which it becomes necessary to install new probes with identical characteristics. At the same time, the total error of the probe method for determining the density of the electron flow doesn't exceed 8%. Using the method of atomic force microscopy, it is established that after processing the surfaces of optical glass of the "crown" grade with a low-energy ribbon-shaped electron flow, provided that the rational shape, size and distribution of the current density are ensured both in the operating space and on the treated surface, the irregularities are reduced from 40-75 nm to 3,5-5 nm. The practical value of the work lies in the production of various devices and complexes (as focusing photo-receiving and reflecting components) using the proposed technology. In general, the glass surface after electron beam treatment has a more uniform structure and is protected from microdefects, unlike surfaces without electron beam treatment, which finds application.*

**Keywords:** ribbon flow of electrons, determination of operating parameters, probe method, surface microrelief, optical glass.

[0000-0002-1596-4123] **А. О. Лавданський<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доцент,  
e-mail: a.lavdanskyi@chdtu.edu.ua

[0000-0002-2046-481X] **Е. В. Фауре<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, професор,

[0000-0002-9326-9476] **С. Т. Тинимбаєв<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, професор,

[0000-0002-8632-1176] **А. Б. Скуцький<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Черкаський державний технологічний університет

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

<sup>2</sup>Казахський національний технічний університет ім. К. І. Сатпаєва

вул. Сатпаєва, 22, м. Алмати, 050000, Казахстан

## СИСТЕМА ЗАХИЩЕНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО ОБМІНУ ТЕКСТОВИМИ ДАНИМИ ЧЕРЕЗ РАДІОКАНАЛ ISM-ДІАПАЗОНУ

*У роботі розроблено систему захищеного інформаційного обміну текстовими даними через радіоканал ISM-діапазону. Система використовує нероздільне факторіальне кодування і дозволяє виконувати передавання та приймання текстових повідомлень, а також довільних двійкових даних. Повідомлення розбиваються на групи по два символи, з яких формується перестановка шляхом бієктивного перетворення двійкової послідовності у факторіальну систему числення. На приймальній стороні відбувається перевірка перестановки на належність до дозволеної множини перестановок та зворотне перетворення, після чого користувачу видається текстове повідомлення в тому вигляді, в якому воно було відправлено. Розроблено структурну схему приймально-передавального пристрою і програмне забезпечення командного рядка для реалізації процедур передавання та приймання повідомлень. Розроблена система може бути використана для встановлення захищеного зв'язку між терміналами за рахунок використання базової перестановки як ключової.*

**Ключові слова:** факторіальна система числення, перестановка, одноплатний комп'ютер, факторіальне кодування, захищений зв'язок.

**Вступ.** Важливою задачею телекомунікаційних систем є забезпечення конфіденційності та контроль цілісності інформації, що передається. Для контролю цілісності інформації після впливу на неї помилок у каналі зв'язку використовуються коди виявлення та виправлення помилок (приклади реалізації наведено в [1]–[3]): контрольна сума, парність біт, коди Хеммінга, коди Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема та інші. Для конфіденційності даних, що передаються, використовуються алгоритми шифрування (приклади реалізації наведено в [4]–[6]), наприклад AES, Twofish, RC6 тощо. Одним із методів, що одночасно дозволяє забезпечити функції виявлення помилок і криптозахист даних, є факторіальний код з відновленням даних за перестановкою (ФКВД) [7]. Такий код є нероздільним кодом і, окрім забезпечення захисту від несанкціонованого читання та захисту від помилок у каналі зв'язку, має властивість самосинхронізації за рахунок надлишкової структури кодового слова – перестановки. Створення системи передавання даних на основі ФКВД дозво-

лить одночасно забезпечити криптозахист інформації, що передається, і виявити дані, які були вражені завадою в каналі зв'язку. Крім того, такий метод інтегрованого захисту даних від несанкціонованого читання та каналних помилок дозволить зменшити надлишковість даних і зменшити вимоги до обчислювальних ресурсів пристрою, що виконує обробку повідомлень.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є створення системи захищеного інформаційного обміну текстовими даними через радіоканал ISM-діапазону на основі ФКВД та створення програмного забезпечення і макетних зразків, що реалізують цю систему. Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

– розробити алгоритми кодування текстових повідомлень для реалізації на одноплатному комп'ютері (алгоритм містить процедури перетворення текстової інформації в десяткове ціле число, представлення цього числа у факторіальній системі числення з подальшим перетворенням в перестановку);

– виконати передавання перестановки радіоканалом ISM-діапазону;

– розробити алгоритм декодування текстових повідомлень для реалізації на одноплатному комп'ютері (алгоритм містить процедури перевірки перестановки на коректність і належність до дозволеної множини перестановок, а також послідовне перетворення перестановки в число в факторіальній, десятковій і двійковій системах числення і, насамкінець, представлення двійкового числа в символному вигляді);

– розробити структурну схему, програмний код і макетні зразки системи передавання даних.

Завдання роботи за своєю суттю є розробкою протоколу передавання текстових повідомлень із використанням нероздільного факторіального кодування даних.

**Виклад основного матеріалу.** У роботі для передавання текстових повідомлень будемо використовувати ФКВД [7], де довжина перестановки – носія даних дорівнює  $M=8$ . Потужність повної множини перестановок з  $M=8$  дорівнює  $M!=40320$ . Цієї кількості перестановок буде достатньо для кодування повідомлення довжиною до  $n = \lfloor \log_2 M! \rfloor = \lfloor \log_2 40320 \rfloor = 15$  біт.

Повідомлення, введені користувачем, розбиваються на групи по два символи (якщо кількість символів у повідомленні непарна, останнім символом додається символ пробілу). З отриманих пар символів формується числове значення наступним чином. Від ASCII коду кожного символу беруться молодші 7 біт (цієї кількості достатньо для передавання великих і малих латинських символів, чисел, деяких додаткових символів) і конкатенуються у 14-бітове двійкове число. Старшими 7 бітами є ASCII код першого символу, молодшими 7 бітами – ASCII код другого символу). Отримане 14-бітове двійкове число перекладається в десяткову систему числення. Це число однозначно ідентифікує дві літери та може бути перетворене в текст на приймальній стороні шляхом зворотного переведення у двійкову систему числення та розбиття отриманого значення на два 7-розрядних двійкових числа з подальшою інтерпретацією їх як ASCII кодів символів текстового повідомлення користувача.

Зауважимо, що для  $M=8$  загальна кількість перестановок ( $8!=40320$ ) буде меншою

за загально можливою кількістю двохсимвольних комбінацій ( $2^{14}$ ). Це дозволяє сформувати ансамбль використовуваних перестановок і вести контроль за належністю прийнятої перестановки до цього ансамблю, а також відкидати її в разі належності до множини перестановок, яка не використовується джерелом.

Після перетворення двох текстових символів у десяткове число воно представляється у факторіальній системі числення:

$$x = \sum_{k=1}^n d_k \times k!, \text{ де } 0 \leq d_k \leq k. \text{ З отриманого}$$

факторіального числа на основі деякої базової перестановки  $\pi_0$  формується перестановка  $\pi$ .

Процедуру такого перетворення детально описано в [8].

Наведемо приклад перетворення послідовності текстових символів у перестановку. Для цього візьмемо послідовність з двох латинських символів  $ab$ . ASCII коди цих символів –  $97_{10}$  та  $98_{10}$  відповідно. Переведемо ці значення в двійкову систему числення та виконаємо конкатенацію їх молодших 7 біт. Отримане значення  $11000011100010_2$  еквівалентне  $12514_{10}$ . Запишемо число  $12514_{10}$  у факторіальній системі числення:

$$12514_{10} = 2 \times 7! + 3 \times 6! + 2 \times 5! + 1 \times 4! + 1 \times 3! + 2 \times 2! + 0 \times 1! + 0 \times 0! = 23211200_F$$

Для формування перестановки оберемо базову перестановку  $\pi_0 = (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)$ . Кожний розряд отриманого числа у факторіальній системі числення є індексом елемента базової перестановки. Почергово аналізуючи розряди факторіального числа, зчитуються відповідні елементи базової перестановки. При цьому зчитаний елемент вилючається з неї. Наприклад, для числа  $23211200_F$  старший розряд, а отже й індекс у базовій перестановці, дорівнює 2. Другий елемент базової перестановки  $\pi_0$  (число 2) зчитується, записується першим елементом результуючої перестановки  $\pi$  і вилючається з базової перестановки  $\pi_0$ . На поточному етапі базова перестановка  $\pi_0$  буде мати наступний вигляд:  $\pi'_0 = (0, 1, 3, 4, 5, 6, 7)$ . Оберемо наступний розряд факторіального числа  $23211200_F$  (число 3). Зчитуємо елемент з індексом 3 з перестановки  $\pi'_0$  (це буде число 4), запишемо його другим елементом перестановки  $\pi$  й видали-

мо значення 4 з базової перестановки. Повторивши описаний алгоритм для всіх розрядів факторіального числа  $23211200_F$ , отримаємо перестановку  $\pi = (2, 4, 3, 1, 5, 7, 0, 6)$ . Таким чином, текстову послідовність із двох символів  $ab$  можна представити перестановкою  $(2, 4, 3, 1, 5, 7, 0, 6)$ . Таку перестановку можна передати каналом зв'язку та однозначно перетворити в послідовність символів на приймальній стороні.

Варто зазначити, що під час передавання перестановки радіоканалом не обов'язково передавати елементи перестановки у вигляді ASCII символів, що займають 1 байт кожен. Оскільки в роботі прийнято використовувати значення  $M=8$ , елементи перестановки будуть лежати в проміжку від 0 до 7. Для кодування 8 значень у двійковій системі числення достатньо  $\log_2 8 = 3$  біти. Тому, виконавши конкатенацію трьох молодших біт кожного з елементів перестановки, можна упакувати двійкове представлення перестановки в  $3 \times 8 = 24$  біти або 3 байти, передавання яких і виконується каналом зв'язку.

Зауважимо, що відправник і отримувач повинні використовувати одну й ту ж базову перестановку  $\pi_0$ . Тільки в цьому випадку повідомлення може бути коректно декодовано. Якщо відправник і отримувач будуть зберігати базову перестановку  $\pi_0$ , яка сформована випадковим чином, у секреті, канал передавання буде захищеним. У цьому випадку виникає задача узгодження початкової перестановки між абонентами. Цю задачу можливо вирішити, наприклад, за допомогою використання трьохетапного криптографічного протоколу на основі перестановок [9].

Під час отримання з каналу зв'язку перестановки приймач може визначити, чи перестановку прийнято коректно. Для цього перевіряються всі отримані  $M=8$  елементів (24 біти). Кожний елемент із множини цілих значень діапазону  $[0, M-1]$  повинен бути присутнім і траплятися у перестановці лише один раз. Якщо в прийнятій послідовності є декілька однакових елементів або деякі елементи відсутні, таку послідовність не можна вважати перестановкою. Вона може бути відкинута, а передавач змушений буде виконати повторне передавання перестановки. Крім того, оскільки відповідно до [7] параметри

ФКВД обираються таким чином, щоб виконувалася рівність  $M! \geq 2^k$ , де  $k$  – кількість біт, що необхідно передати, завжди будуть присутні  $M! - 2^k$  перестановок, які не використовуються джерелом. Перестановки з цієї множини теж необхідно обробляти як некоректні.

Приймач отримує перестановку, яку необхідно перетворити на послідовність текстових символів. Це перетворення відбувається наступним чином. Нехай отримано перестановку  $\pi = (2, 4, 6, 3, 0, 7, 1, 5)$ . Спершу отриману перестановку необхідно перетворити в число у факторіальній системі числення. Це відбувається аналогічно перетворенню числа у факторіальній системі числення в перестановку за допомогою базової перестановки  $\pi_0$ , яке відбувається на етапі відправки повідомлення. Кожний елемент перестановки вказує на індекс елемента базової перестановки  $\pi_0$ , вилучаючи при цьому елемент з базової перестановки. Нехай базова перестановка  $\pi_0 = (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)$ . Тоді старший елемент перестановки  $\pi$  (число 2) визначає індекс (число 2) старшим розрядом у факторіальному числі, вилучаючи елемент зі значенням 2 з базової перестановки  $\pi_0$ . На поточному етапі початкова перестановка  $\pi_0$  перетворюється в  $\pi'_0 = (0, 1, 3, 4, 5, 6, 7)$ . Наступний елемент перестановки (число 4) визначає індекс (число 3) наступним розрядом у факторіальному числі, вилучаючи елемент зі значенням 4 з перестановки  $\pi'_0$ . Повторивши алгоритм для всіх елементів перестановки  $\pi$ , отримаємо число  $23420200_F$ . Після його перетворення в десяткове число отримаємо:

$$23420200_F = 2 \times 7! + 3 \times 6! + 4 \times 5! + 2 \times 4! + 0 \times 3! + 2 \times 2! + 0 \times 1! + 0 \times 0! = 12772_{10}$$

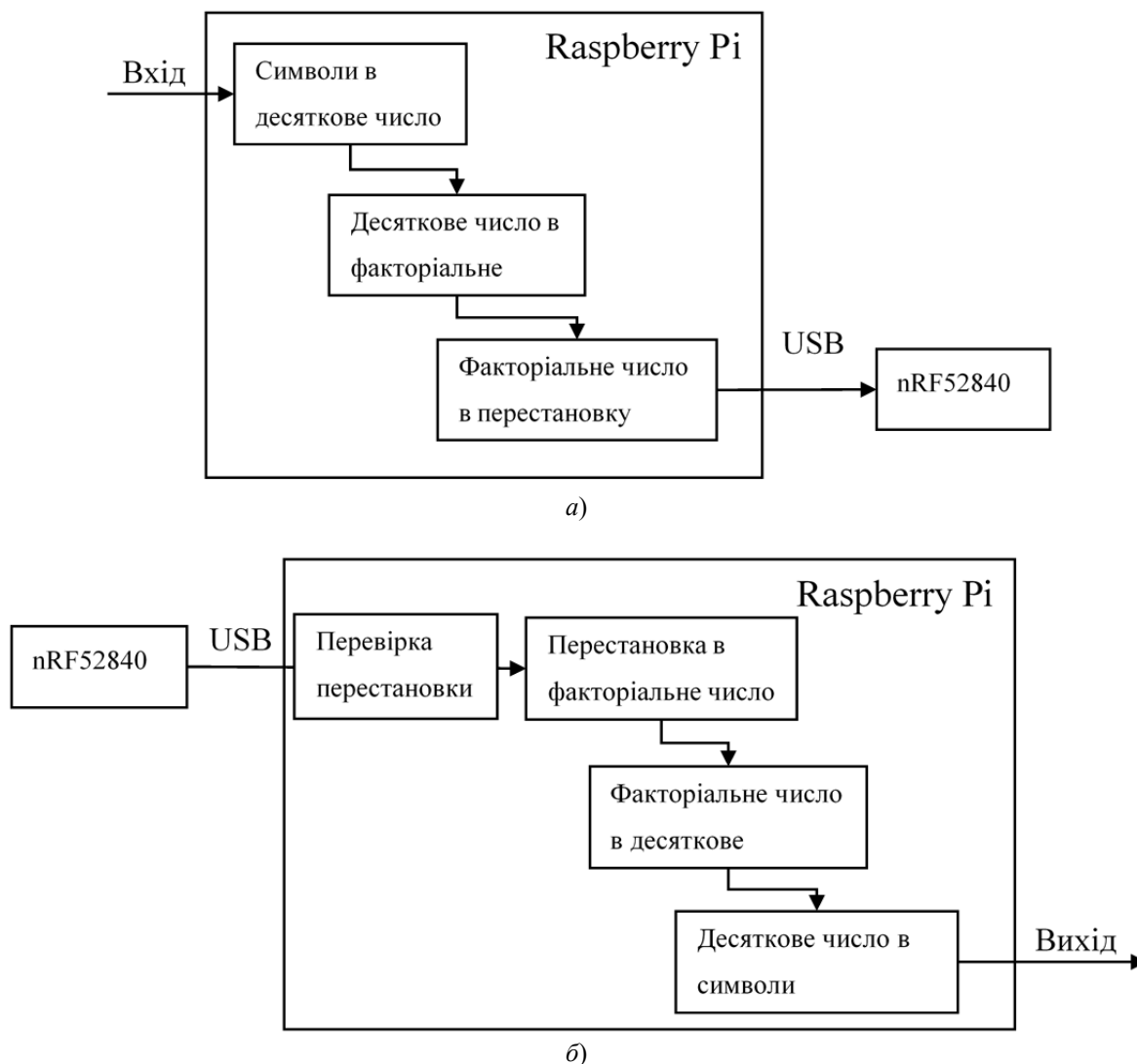
Десяткове число  $12772_{10}$  дорівнює двійковому  $11000111100100_2$ , яке розділимо на дві групи по 7 біт:  $1100011_2$ ,  $1100100_2$ . Перетворивши отримані значення в символи, отримаємо символи  $cd$ .

**Експериментальні дослідження.** Як прийнятно-передавальний пристрій будемо використовувати SoC nRF52840 компанії Nordic Semiconductor [10]. Пристрій nRF52840 має вбудоване ядро ARM Cortex-M4, що працює на частотах до 64 МГц, радіомодуль на частоті 2,4 ГГц, що підтримує різноманітні

протоколи передавання (Bluetooth LE, Bluetooth mesh, Thread, Zigbee, 802.15.4, ANT, ESB), 1 MB Flash пам'яті, 256 KB оперативної пам'яті, вбудований апаратний USB 2.0 конт-

ролер з можливістю роботи в режимі CDC (USB serial).

На рисунку 1 наведемо структурну схему системи передавання інформації на основі ФКВД.



**Рисунок 1. Структурна схема системи передавання (а) та приймання (б) інформації на основі ФКВД**

Передавання інформації відбувається в пакетному режимі з фіксованою довжиною пакета, що дорівнює 3 байтам (для  $M=8$ ). Використання такого контролера дозволяє вести передавання інформації з будь-якого пристрою, що підтримує інтерфейс USB, та на якому запущено відповідне програмне забезпечення.

Варто зазначити, що протокол передавання даних не прив'язаний до апаратного забезпечення і може використовувати практично будь-які приймально-передавальні радіо-

пристрої в різних діапазонах частот. З метою передавання інформації на частотах 433 МГц або 868 МГц (ISM-діапазони) може бути використаний контролер серії CC1352P компанії Texas Instruments [11]. ISM (industrial, scientific and medical)-діапазони доступні для безліцензійного використання практично в будь-якій країні. В Україні список доступних частот регламентується Постановою Кабінету Міністрів України № 1208 від 15.12.2005 р. «Про затвердження Національної таблиці розподілу смуг радіочастот України» [12].

Для формування ФКВД використано плату Raspberry Pi 4 Model B [13], на якій запущено програмне забезпечення на мові програмування Python [14]. Raspberry Pi 4 Model B – це одноплатний комп'ютер на основі ARM v8 архітектури, що працює з використанням операційної системи Linux. Для підключення nRF52840 використано вбудова-

ний інтерфейс USB, а для самого радіомодуля розроблено програмне забезпечення, що дозволяє виконувати двосторонній обмін перестановками радіоканалом через віртуальний COM-порт.

Фото макетних зразків приймально-передавальних пристроїв системи передавання інформації зображено на рисунку 2.



Рисунок 2. Розроблені макетні зразки системи захищеного інформаційного обміну текстовими даними через радіоканал ISM-діапазону

**Результати досліджень.** Для передавання даних у системі використовується командний рядок віддаленого SSH доступу до Raspberry Pi (рисунок 3).

Приймальна сторона системи очікує нового повідомлення, виконує перевірку перестановки, перетворює її на текст та виводить користувачу.

```
pi@raspberrypi: ~  
pi@raspberrypi:~ $ sudo python3 main.py -c /dev/ttyACM0 -m 'test message'  
27536140  
27450613  
06712543  
25063741  
27431560  
25364071  
03276145  
pi@raspberrypi:~ $
```

а)

```
pi@raspberrypi: ~  
pi@raspberrypi:~ $ sudo python3 main.py -c /dev/ttyACM0 -p  
test message
```

б)

Рисунок 3. Процес передавання (а) та приймання (б) повідомлення

Для початку отримання повідомлень на приймальній стороні необхідно запустити програму з ключем командного рядка *-p*. Для передавання повідомлення на передавальній стороні необхідно запустити програму з ключем командного рядка *-m* і ввести повідомлення, яке необхідно передати. В обох випадках додатково необхідно вказати інтерфейс

віртуального COM порту за допомогою ключа командного рядка *-c*, через який буде вестись передавання. Під час передавання повідомлення в консоль передавача виводяться перестановки, що надсилаються в канал зв'язку. Приклад реалізації процесу передавання та приймання повідомлення з використанням

створених макетних зразків наведено на рисунку 3.

**Обговорення результатів.** Розроблену систему захищеного інформаційного обміну текстовими даними через радіоканал ISM-діапазону можна використати для обміну як символьними, так і двійковими даними різної довжини. За рахунок збереження базової перестановки в секреті досягається конфіденційність зв'язку між абонентами. З метою узгодження ключової базової перестановки передбачається надалі використати трьохетапний криптографічний протокол [9].

Побудовану інформаційну систему та розроблені макетні зразки приймально-передавальних пристроїв можна використати як базові елементи для подальшої реалізації більш складних систем на основі ФКВД. Зокрема, проведені експерименти використовували високі показники відношення сигнал/шум у каналі зв'язку, що визначало нехтовно малі значення відносної частоти бітової помилки ( $\sim 10^{-5}$ ). Разом з тим, у подальшій роботі необхідно виконати аналіз достовірності передавання інформації в умовах збільшення інтенсивності появи помилок – за умови збільшення відстані між передавачем і приймачем, зменшення потужності передавача, чутливості приймача чи створення штучних шумів у каналі.

Крім того, розроблена система не повною мірою використовує властивості та переваги ФКВД. Для виправлення цієї ситуації потрібно розробити власний каналний протокол, де б кодові слова ФКВД відігравали роль кадрів. У цьому випадку такі можливості ФКВД, як синхронізація та достовірне передавання даних за ймовірності бітової помилки, близької до 0,5, буде можливо реалізувати та оцінити практично.

**Висновки.** У роботі створено систему захищеного інформаційного обміну текстовими даними через радіоканал ISM-діапазону на основі ФКВД, а також програмне забезпечення й макетні зразки, що реалізують цю систему.

Наукова новизна роботи полягає у формуванні моделей взаємодії компонентів системи захищеного інформаційного обміну на основі ФКВД, що дозволяє будувати структурні схеми, алгоритми і протоколи обробки та перетворення даних.

Практичну цінність роботи обумовлюють розроблені та реалізовані алгоритми захищеного інформаційного обміну текстовими даними, що включає перетворення текстової інформації в число у факторіальній системі числення з подальшим перетворенням у перестановку на передавальній стороні та зворотні операції декодування повідомлення на приймальній стороні. На основі розроблених алгоритмів створено структурну схему передавально-приймального пристрою, програмний код і макетні зразки системи захищеного інформаційного обміну текстовими даними.

Розроблену систему захищеного інформаційного обміну можна використати як основу для реалізації трьохетапного криптографічного протоколу на основі перестановок [9], операції над перестановками якого можна додатково прискорити за допомогою SIMD інструкцій сучасних процесорів [15].

**Подяка.** Роботу виконано в рамках науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених «Розробка мобільної системи захищеного інформаційного обміну для військових і цивільних підрозділів державних структур» (№ ДР 0120U102607).

#### Список використаних джерел

- [1] M. S. Abdulnabi, and H. Ahmed, "Design of efficient cyclic redundancy check-32 using FPGA", in *2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*, 2018, pp. 1–5.
- [2] O. Khadir, "A simple coding-decoding algorithm for the Hamming code", *arXiv preprint arXiv:2201.02066*, 2022.
- [3] S. Maheshwari, V. A. Bartlett, and I. Kale, "Energy efficient implementation of multi-phase quasi-adiabatic Cyclic Redundancy Check in near field communication", *Integration*, vol. 62, pp. 341–352, 2018.
- [4] D. Soni, V. Tiwari, B. Kaur, and M. Kumar, "Cloud computing security analysis based on RC6, AES and RSA algorithms in user-cloud environment", in *2021 First International Conference on Advances in Computing and Future Communication Technologies (ICACFCT)*, 2021, pp. 269–273.
- [5] F. Sandoya, D. Dhamodharan, J. L. Hilario Rivas, L. Choque Flores, and S. Thaddeus, "Embedding elliptic curve cryptography and

- twofish algorithm to improve data security in Internet of things", 2021.
- [6] K.-L. Tsai, F.-Y. Leu, I. You, S.-W. Chang, S.-J. Hu, and H. Park, "Low-power AES data encryption architecture for a LoRaWAN", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 146348-146357, 2019.
- [7] Э. В. Фауре, "Факториальное кодирование с восстановлением данных", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 33-39, 2016.
- [8] Э. В. Фауре, В. В. Швыдкий, и В. А. Щерба, "Метод формирования имитовставки на основе перестановок", *Захист інформації*, т. 16, № 4, с. 340, 2015.
- [9] A. Shcherba, E. Faure, and O. Lavdanska, "Three-pass cryptographic protocol based on permutations", in *2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, 2020, pp. 281–284.
- [10] "nRF52840–Bluetooth 5.2 SoC - nordicsemi.com". [Online]. Available: <https://www.nordicsemi.com/products/nrf52840>.
- [11] "CC1352P data sheet, product information and support". [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/CC1352P>.
- [12] *Про затвердження Національної таблиці розподілу смуг радіочастот України*. 15.12.2005.
- [13] "Buy a Raspberry Pi 4 Model B – Raspberry Pi". [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>.
- [14] "Welcome to Python.org". [Online]. Available: <https://www.python.org/>.
- [15] А. О. Лавданський, Е. В. Фауре, та В. О. Щерба, "Підвищення швидкості операції множення перестановок за рахунок використання SIMD інструкцій", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, с. 36-43, 2021.
- [2] O. Khadir, "A simple coding-decoding algorithm for the Hamming code", *arXiv preprint arXiv:2201.02066*, 2022.
- [3] S. Maheshwari, V. A. Bartlett, and I. Kale, "Energy efficient implementation of multi-phase quasi-adiabatic Cyclic Redundancy Check in near field communication", *Integration*, vol. 62, pp. 341-352, 2018.
- [4] D. Soni, V. Tiwari, B. Kaur, and M. Kumar, "Cloud computing security analysis based on RC6, AES and RSA algorithms in user-cloud environment", in *2021 First International Conference on Advances in Computing and Future Communication Technologies (ICACFCT)*, 2021, pp. 269–273.
- [5] F. Sandoya, D. Dhamodharan, J. L. Hilario Rivas, L. Choque Flores, and S. Thaddeus, "Embedding elliptic curve cryptography and twofish algorithm to improve data security in Internet of things", 2021.
- [6] K.-L. Tsai, F.-Y. Leu, I. You, S.-W. Chang, S.-J. Hu, and H. Park, "Low-power AES data encryption architecture for a LoRaWAN", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 146348-146357, 2019.
- [7] E. V. Faure, "Factorial coding with data recovery", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, no. 2, pp. 33-39, 2016 [in Russian].
- [8] E. V. Faure, V. V. Shvydkiy, and V. O. Shcherba, "Method of message authentication code formation based on permutations", *Zakhyst informatsii*, vol. 16, no. 4, p. 340, 2015 [in Russian].
- [9] A. Shcherba, E. Faure, and O. Lavdanska, "Three-pass cryptographic protocol based on permutations", in *2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, 2020, pp. 281–284.
- [10] "nRF52840–Bluetooth 5.2 SoC - nordicsemi.com". [Online]. Available: <https://www.nordicsemi.com/products/nrf52840>.
- [11] "CC1352P data sheet, product information and support". [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/CC1352P>.
- [12] *On the approval of the National table of distribution of radio frequency bands of Ukraine*. Dec. 15, 2005 [in Ukrainian].
- [13] "Buy a Raspberry Pi 4 Model B – Raspberry Pi". [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>.

## References

- [1] M. S. Abdulnabi, and H. Ahmed, "Design of efficient cyclic redundancy check-32 using FPGA", in *2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCEEE)*, 2018, pp. 1–5.

- [14] "Welcome to Python.org". [Online]. Available: <https://www.python.org/>.
- [15] A. O. Lavdanskyi, E. V. Faure, and V. O. Shcherba, "Increase of the speed of the permutations multiplication operation due to the use of SIMD instructions", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, no. 3, pp. 36-43, 2021 [in Ukrainian].

**A. O. Lavdanskyi<sup>1</sup>**, Ph. D., Associate Professor,  
e-mail: a.lavdanskyi@chdtu.edu.ua

**E. V. Faure<sup>1</sup>**, Dr. Sc., Professor,

**S. T. Tynymbaiev<sup>2</sup>**, Ph. D., Professor,

**A. B. Skutskyi<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Cherkasy State Technological University  
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

<sup>2</sup>Kazakh National Technical University named after K. I. Satpaev  
Satpaev st., 22, Almaty, 050000, Kazakhstan

### SYSTEM FOR SECURE INFORMATION EXCHANGE OF TEXT DATA THROUGH THE RADIO CHANNEL OF THE ISM BAND

*A system of secure information exchange of text data through the radio channel of the ISM band is developed. The system uses non-separable factorial coding and allows the transmission and reception of text messages and arbitrary binary data. Messages are divided into groups of two symbols, from which a permutation is formed by bijectively transforming the binary sequence into a factorial number system. On the receiving side, the permutation is checked for belonging to the allowed set of permutations and reverse conversion is made, after which the text message is issued to the user in the form in which it has been sent.*

*The purpose of the work is to create a system of secure information exchange of text data through the radio channel of the ISM band based on factorial code with data recovery by permutation and to create software and prototypes that implement this system.*

*The scientific novelty of the work consists in the formation of models of the interaction of system components of secure information exchange based on factorial code with data recovery by permutation, which allows the building of structural schemes, algorithms, and protocols for data processing and transformation.*

*The practical value of the work is determined by the developed and implemented algorithms for secure information exchange of text data, which includes the transformation of text information into a number in the factorial coding system with further transformation into permutation on the transmitting side and reverse operations of decoding the message on the receiving side. On the basis of the developed algorithms, a structural diagram of the transceiver device, program code, and prototypes of the system of secure information exchange of text data have been created. The developed system can establish secure communication between terminals by using basic permutation as a key.*

**Keywords:** factorial number system, permutation, single-board computer, factorial coding, secure communication.

[0000-0002-2441-6292]

**Х. В. Ліп'яніна-Гончаренко**, канд. техн. наук, доцент

e-mail: xrustya.com@gmail.com

Західноукраїнський національний університет  
вул. Львівська, 11, м. Тернопіль, 46009, Україна

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МЕТОД ФОРМУВАННЯ ЛЮДСЬКИХ РЕСУРСІВ НА КОРОТКОСТРОКОВИЙ ПРОЕКТ

*Штучний інтелект, хмарні обчислення, підключені пристрої, автономна мобільність та інші цифрові технології вже змінюють всі галузі суспільства. Це вимагає нового типу управління проектами, який спирається на гнучкі команди між підрозділами та потребує консультантів з навичками, які перевершують просте управління процесами. У статті проведено ґрунтовний аналіз наукових досліджень у сфері використання методів машинного навчання та управління людськими ресурсами. Розроблено інтелектуальний метод формування короткострокового HR-проекту на основі машинного навчання, що дозволяє скоротити витрати часу на HR і, відповідно, знизить витрати рекрутерів. Представлено розумний чат-бот, який проводить співбесіду з потенційним членом команди. Чат-бот виконує роль HR, який після співбесіди передає дані в базу даних по кожному претенденту. На основі отриманих даних чат-бот виводить найоптимальніший результат щодо розподілу ролей у команді серед найкращих претендентів.*

**Ключові слова:** HR, чат-бот, машинне навчання, дерева рішень, IT-проект.

**Вступ.** Цифрова революція дала численні інструменти та рішення для сприяння їх робочому процесу та підвищення ефективності, а також надає можливість змістити свою увагу від управління робочою силою для покращення нижньої межі організації. Цифровізація пронизує майже всі сфери життя. Ця трансформація змінює не тільки технічну сферу, але й співпрацю на всіх рівнях роботи. Зміни, викликані четвертою промисловою революцією та діджиталізацією, впливають безпосередньо на те, як ми живемо, формуємо організації та змінюємо те, як ми працюємо. Ці зміни мають на увазі деякі проблеми в підготовці молоді до роботи в такому середовищі через їх особливості. По всій Європі для того, щоб передбачити масштаби і глибину впливу, які нав'язують сучасні та нові технології, проводяться деякі проекти та ініціативи.

Світ праці зазнає революційних змін, які зазвичай називають «Work 4.0». Описана як найбільш радикальна зміна на ринку праці з часів першої промислової революції, жодний тиждень не минає без ще одного дослідження, що сповіщає про масштабне зникнення, трансформацію або інновації в роботі, організації праці та трудових відносинах. У цьому новому світі роботи керівники організації, а також співробітники потребують ком-

петентності, яка дозволить їм впоратися з проблемами оцифрованого робочого місця.

Сучасні працівники мають право працювати віддалено та спілкуватися зі своїми колегами в будь-який час. Поряд із трансформацією традиційного робочого середовища, технології також допомогли повністю переосмислити кожний аспект відділу кадрів або персоналу в компаніях по всьому світу – від процесу найму аж до управління працівниками.

Для пошуку нових співробітників витрачається багато часу, а ще грошові витрати на публікацію і просування вакансії на тематичних ресурсах, підключення зовнішніх рекрутингових агентств, а також внутрішнього персоналу компанії. Застосування машинного навчання дозволяє масштабувати процес пошуку завдяки збільшенню покриття, обробити набагато більше резюме і підібрати максимально відповідного претендента на вакансію. З тим обсягом інформації, який доступний у процесі рекрутингу, машинне навчання може розпізнати набагато більше закономірностей, ніж рекрутер і застосувати ефективні методи виявлення кандидатів.

Поєднання машинного навчання з чат-ботом дозволить скоротити рутинну роботу: підбір резюме, дзвінки до претендентів, відповіді на типові питання, запрошення на інтерв'ю й ін. Також паралельно варто провести

парсинг резюме із сайтів пошуку роботи, що дасть можливість ще більше розширити аудиторію кандидатів на посаду. Це створює можливість для короткострокового проекту взагалі відмовитись від HR-менеджера.

До цього дня було запропоновано кілька підходів керівних принципів до industry 4.0. Цінь, Лю і Гросвенор [1] запропонували структуру, що визначає критерії досягнення industry 4.0, підкреслюючи поточні прогалини в дослідженнях між поточними виробничими системами та industry 4.0, такі як зв'язок у режимі реального часу, прогностичне обслуговування та прийняття рішень виробничими системами. В іншому підході Лі, Багері і Као [2] пролили світло на архітектуру системи IT-систем у виробництві, підкреслюючи переваги п'ятишарової архітектури IT-систем, що стосуються якості продукції та надійності системи з більш інтелектуальним і стійким виробничим обладнанням. Запропоновано кілька інших рамок для IT-систем у виробництві, такі як рамки для впровадження адитивного виробництва [3] або концептуальна основа допомоги у взаємодії людини і машини [4].

У статтях [5-7] представлені Chatbot: консультант з педіатричної загальної медицини, допомога в навчанні студентам, вивченні мов. Застосовано непідконтрольні методи машинного навчання для завдання автоматизованої класифікації та проведено експеримент для оцінки ефективності роботи Chatbot порівняно з класифікацією людини. Пропонується [8] новий підхід до автоматизації вимог та класифікації за допомогою інтелектуального розмовного чату, використовуючи машинне навчання та штучний інтелект. У роботі [9] впровадили модель глибокого навчання seq2seq для розмови та адаптації самонавчання при виборі претендентів HR. У статті [10] описано розвиток Microsoft XiaoIce, найпопулярніший соціальний чат у світі. У статті [11] представлено SuperAgent, чат-службу для обслуговування клієнтів, яка використовує широкомасштабні та загальнодоступні дані електронної комерції. Дослідження [12] вивчає робочі стилі існуючих чатових систем при створенні відповіді, а потім виявляє їх недоліки з точки зору вступу в діалог з користувачем. У дослідженні [13] проведено поглиблене дослідження літератури, понад 70 публікацій, пов'язаних із чат-ботами, опублікованих за п'ять років (2013–2018 рр.).

У роботі [14] побудовано нову модель, яка оптимізує багатоцільову задачу розподілу

за допомогою нечіткої логічної стратегії. Показаний чисельний приклад щодо рішення розподілу людських ресурсів у динамічному середовищі для організацій. Для вибору людських ресурсів пропонується [15] новий метод вибору функцій, а саме процес вибору підмножини оригінальних функцій. У роботі [16] використовується дослідження Delphi, щоб дослідити, як машинне навчання може впливати на функцію HR-фахівців.

У [17] розроблено систему для аналізу резюме на основі парсингу – ChinaHR, яка є найбільшим веб-сайтом з підбору персоналу. У [18] створена система, що ґрунтується на моделі онтологічної структури і називається «Ontology based Résumé Parser (ORP)», яка протестована на низці турецьких та англійських резюме. У [19] розроблено Chinese resume information extraction system (CRIES) на основі напівструктурованого тексту для отримання форматованої інформації шляхом вилучення текстового вмісту кожного поля з резюме в різних форматах та оновлення інформації автоматично з Інтернету. У [20] запропоновано методику парсерів CV, що пропонує метод виділення сутності з завантажених резюме. У [21] пропонується спосіб вирішення проблеми виділення вмісту з резюме, використовуючи метод сегментації за заголовком з подальшими моделями для кожного відповідного заголовка, за допомогою деяких евристичних методів.

У статті [22] досліджено загальні визначення й аналітичні параметри розвитку людських ресурсів, оцінку результатів аналітики, визначених до ієрархічного аналізу літератури. У роботі [23] експериментальні результати показують, що випадкова деревоподібна модель найкраще працює для дослідження в можливості просування персоналу по кар'єрних сходах.

Треба відзначити, що згадані вище роботи здебільшого аналізують роботу чат-ботів або відбору учасників команд на основі методів машинного навчання. Проте поєднання інтелектуального чат-бота з генеруванням відповіді на основі детального аналізу претендентів і, відповідно, прийняття цілеорієнтованих управлінських рішень у формуванні команди для короткострокового проекту є важливим моментом. Аналіз кандидатів може бути розширений з використанням парсингу резюме з сайтів пошуку роботи, що дозволить максимально збільшити базу претендентів.

Крім того, треба взяти до уваги, що у роботі [24] проведено детальне дослідження по виявленню талантів претендентів на посади в ІТ та обрано дані про досвід роботи, освіти та навички з порталу пошуку роботи за допомогою Semantic Web.

У зв'язку з цим можна вважати, що дослідження шляхів формування HR короткострокового проекту на основі машинного навчання є одним із перспективних напрямів в управлінні короткостроковими проектами.

**Мета та задачі дослідження** – розробити інтелектуальний метод формування короткострокового HR-проекту на основі машинного навчання, що дозволяє скоротити витрати часу на HR і, відповідно, знизить витрати рекрутерів.

#### **Виклад основного матеріалу.**

*Стратегія управління HR короткострокового проекту.* Управління людськими ресурсами визначається як стратегічний підхід до ефективної зайнятості та розвитку

високопрофесійної та кваліфікованої робочої сили для досягнення цілей компанії. З моменту свого першого введення на початку 1980-х років основними функціями цієї концепції було використання людських ресурсів, а також набір, підбір кадрового складу, утримання та звільнення співробітників [25-29]. Ще однією важливою функцією є розвиток співробітників, який часто називають розвитком людських ресурсів. Зосереджуючись на всіх видах діяльності, що стосуються професійної освіти, навчання та підготовки окремих осіб і команд, ця функція сильно впливає на організаційний розвиток і, отже, на теперішню та майбутню діяльність будь-якої організації.

Формування стратегії управління персоналом (рисунок 1) – важливий етап роботи будь-якого HR-департаменту. Це дозволяє компанії розвиватися в потрібному напрямку, досягати поставлених цілей і залишатися конкурентоспроможною.

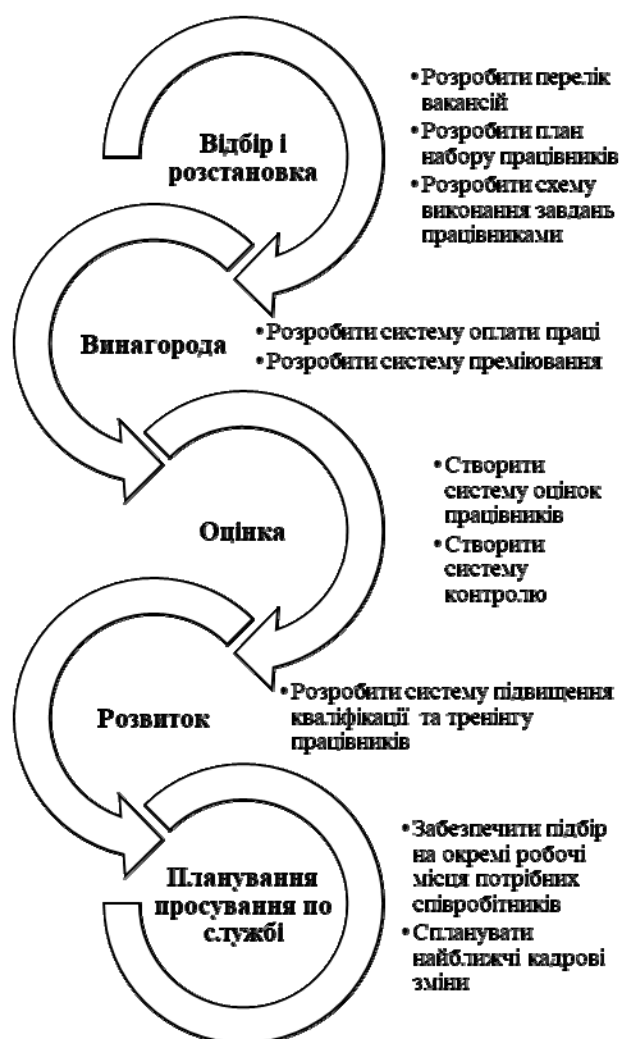


Рисунок 1. Стратегія управління HR короткострокового ІТ-проекту

Стратегія управління персоналом – це план дій по досягненню цілей компанії через ефективні методи управління персоналом. Стратегія – невід’ємна частина політики компанії, вона допомагає ефективно організувати роботу співробітників.

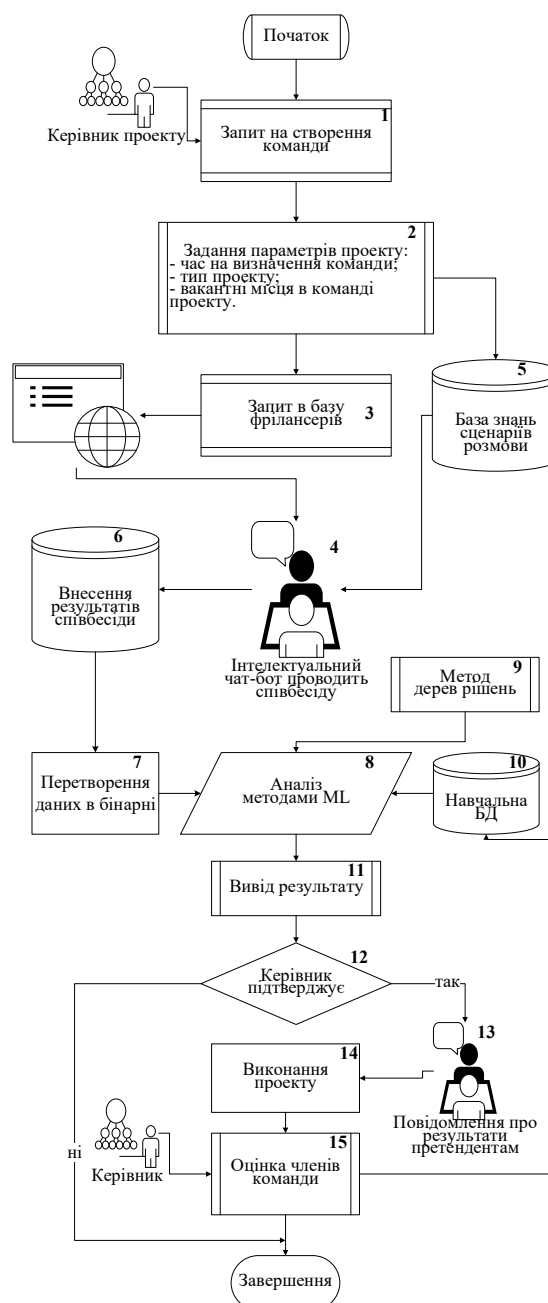
Стратегію управління персоналом розглядають залежно від умов виконання проекту: довгострокова, середньострокова та короткострокова. Короткострокова стратегія поширюється на період не більше одного року.

Одним із індикаторів критеріїв аналітичного оцінювання управління розвитком персоналу є визначення вартості проведення співбесіди [30]. Цей показник є сумою витраченого часу керівника на співбесіду та працівників кадрової служби на кожного з кандидатів, що пройшли інтерв’ю.

*Метод формування HR короткострокового проекту.* Для зменшення часових витрат на HR менеджмент авторами розроблено метод формування HR короткострокового проекту на основі машинного навчання. Запропонований метод ілюструється алгоритмом (рисунк 2).

Після надходження нового проекту йде надсилання запиту (блок 1) керівником проекту, йому надається можливість внесення параметрів проекту (блок 2), а саме: тип проекту, час на визначення команди, вакантні місця в команді, заробітна плата, терміни проекту, вимоги до команди, обов’язкове питання до претендента. Запит перенаправляється в базу фрілансерів (блок 3). Паралельно проводиться парсинг резюме з сайтів пошуку. Всім відібраним претендентам направляється запит на проходження співбесіди. Після чого претендент проходить співбесіду з чат-ботом (блок 4). На цьому етапі підключається чат-бот (блок 4) та починає проводити співбесіду з зацікавленими претендентами, формуючи питання на основі (блок 5) бази сценаріїв розмови і параметрів, заданих керівником при формуванні запиту. Результати співбесіди передаються в базу даних (блок 6). Отримані дані перетворюються в бінарні (блок 7). Далі проводиться аналіз отриманих результатів зі співбесіди за допомогою машинного навчання (блок 8) з підкріпленням методів дерев рішень (блок 9) та готової навчальної вибірки (блок 10). Виводяться результати (блок 11) сформованої команди для керівника (блок 12), який їх підтверджує або не підтверджує. Якщо не підтверджує, то процес переходить до уточ-

нення поставлених завдань. У позитивній відповіді чат-бот надсилає рішення керівника погодженим претендентам (блок 13). Далі відбувається виконання проекту (блок 14). Після завершення проекту керівник дає оцінку кожному учаснику команди (блок 15) – позитивну або негативну, що передається у навчальну вибірку для наступних формувань HR для короткострокового проекту на основі машинного навчання.



**Рисунок 2. Алгоритм формування HR короткострокового проекту на основі машинного навчання**

**Результати досліджень.** Оболонкою для співбесіди авторами обрано Telegram тому, що він найбільш популярний серед користувачів у світі. Є необхідні API, синхронізація зі сторонніми сервісами, регулярні оновлення. Для реалізації інтелекту чат-бота, запропонованого в алгоритмі (рисунок 2), обрано середовище розробки – DialogFlow [31]. DialogFlow працює, створюючи агентів – модулі NLU (Natural Language Understanding). Система перетворює природні слова-запити користувача в керовані дані, що дає можливість розробити чат-бот, що самонавчається з відповідних бібліотек.

Питання формувались на основі soft та hard skills [32]. Відповідно, питання розділені на три блоки – загальні питання, soft skills та hard skills. Два останні блоки формуються що-

до зазначеної бажаної посади в загальних питаннях.

В загальних питаннях чат-бот розпитує особисті, контактні дані, на яку посаду претендує людина, яку освіту має, стаж роботи на посадах, до останніх двох питань претендент може представити фото документів. У soft skills йде низка психологічних питань, які дають уявлення про особу в команді. Ну і звичайно в hard skills ставляться питання стосовно рівня основних навиків роботи, потрібних щодо заданого проекту.

Всі питання генеруються в базу даних (таблиця 1). Оскільки питання можуть бути додані і самим керівником, відповідно, завжди є можливість розширення переліку питань та корекції.

Таблиця 1. Зразок типових питань для розробників при співбесіді

| ID питання | Питання                                                      | Ідеальні відповіді | Тип даних |
|------------|--------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|
| 1 1        | Прізвище та ім'я, email                                      | name               | object    |
| 1 2        | Вік                                                          | 27                 | int64     |
| 1 3        | На яку посаду претендує?                                     | developer          | object    |
| 1 4        | Чи брали Ви участь у схожих проектах?                        | yes                | bool      |
| 1 5        | Скільки Вам років?                                           | 3                  | int64     |
| 1 6        | Якщо мали досвід у подібних проектах, то напишіть його назву | Project            | object    |
| 1 7        | Чи маєте освіту в ІТ-напрямі?                                | yes                | bool      |
| 1 8        | Чи одружені?                                                 | no                 | bool      |
| 1 9        | Чи працюєте на цей момент?                                   | no                 | bool      |
| 2 1        | Чи дотримуетесь дедлайнів у поставлених завданнях?           | yes                | bool      |
| 2 2        | Чи керували Ви проектами?                                    | no                 | bool      |
| 2 3        | Чи відомий Вам Agile та Scrum метод у проектах?              | yes                | bool      |
| 2 4        | Чи можете працювати віддалено?                               | yes                | bool      |
| 2 5        | Чи були у Вас проекти, які б Ви представляли на публіці?     | no                 | bool      |
| 2 6        | Чи можете передати клієнтську базу з попереднього проекту?   | no                 | bool      |
| 2 7        | Який колір Вам більше до вподоби – зелений чи червоний?      | yes                | bool      |
| 2 8        | Чи використовуєте червоний колір в одязі?                    | no                 | bool      |
| 2 9        | Який колір Вам більше до вподоби – сірий чи білий?           | yes                | bool      |
| 2 10       | Якщо Вас критикують, Ви покинете проект?                     | yes                | bool      |
| 3 1        | Чи володієте англійською мовою на розмовному рівні?          | yes                | bool      |
| 3 2        | Чи маєте досвід в три роки у програмуванні?                  | yes                | bool      |
| 3 3        | Чи маєте досвід в один рік у програмуванні?                  | yes                | bool      |
| 3 4        | Досвід у програмуванні менший одного року                    | yes                | bool      |
| 3 5        | Чи працюєте з GitHub?                                        | yes                | bool      |
| 3 6        | Чи є практичні навик з HTML, JavaScript?                     | yes                | bool      |
| 3 7        | Чи працюєте з Unity?                                         | yes                | bool      |
| 3 8        | Чи працюєте з C#?                                            | yes                | bool      |
| 3 9        | Чи працюєте з Wordpress?                                     | yes                | bool      |
| 3 10       | Чи працюєте з MySQL?                                         | yes                | bool      |
| 3 11       | Досвід роботи з Python, R                                    | yes                | bool      |

Всі питання сформовані так, щоб претендент міг дати конкретну відповідь, якій легко можна надати позитивну або негативну оцінку. Відповідно, для кожної посади потрібно розробити свій алгоритм перетворення. Для цього дослідження авторами використано перетворення даних для посади розробника на основі сформованої тестової вибірки з відповідями в чат-боті.

Мову обрано Python, тому що на ній найпростіше працювати з чат-ботами та аналізом даних на основі машинного навчання, за допомогою бібліотек pandas, numpy, train\_test\_split, RandomForestClassifier. Для оболонки самого чат-бота авторами обрано меседжер Telegram, тому що він найбільш популярний серед користувачів у світі, також має необхідні API, синхронізацію зі сторонніми сервісами та регулярні оновлення.

На рисунку 3 представлено початковий діалог з претендентом, який генерується з бази знань в DialogFlow та передається у базу даних по мітках до основних питань, що будуть використані в аналізі претендентів.

Після отримання бази даних проводимо перетворення даних в логічний тип даних та відповіді на питання 1\_4.

```
meat_HR = { 'developer' : 1, 'project
manedger' : 0, 'front-end' : 0 }
HR['F'] =
HR['1_4'].map(str.lower).map(meat_HR)
HR=HR.drop('1_4', axis = 1)
HR=HR*1
```

Запускаємо бібліотеку RandomForestClassifier, приєднуємо тестову вибірку та будуємо дерево рішень (рисунок 4).

```
clf=RandomForestClassifier(n_estimators=100)
clf.fit(train_HR, train_labels)
```



Рисунок 3. Діалог з претендентом у Telegram

**Обговорення результатів.** Обчислення показали, що параметр середньої квадратичної похибки mse = 9 на значенні 7.5 на 7-й вибірці, що і відповідає ID – 7. Точність передбачення становить 94%.

```
In: mape = 100 * (errors / test_labels)
accuracy = 100 - np.mean(mape)
print('Точність:',
      round(accuracy,2), '%.')
Out: Точність: 93.88 %.
```

З результатів дерева рішень видно, що претендент з ID = 7 (таблиця 2) має найкращі характеристики на посаду розробника. Цей претендент дав відповіді, найближчі до ідеальних (див. таблицю 1), що є у навчальній вибірці.

Далі цей результат відправляється керівнику і він приймає відповідне рішення,

яке надсилається через чат-бот усім претендентам.

На відміну від аналогів [5-13], розроблений алгоритм дає можливість сформувати закрите віртуальне середовище для вибору претендентів в команду короткострокового проекту без HR-менеджера.

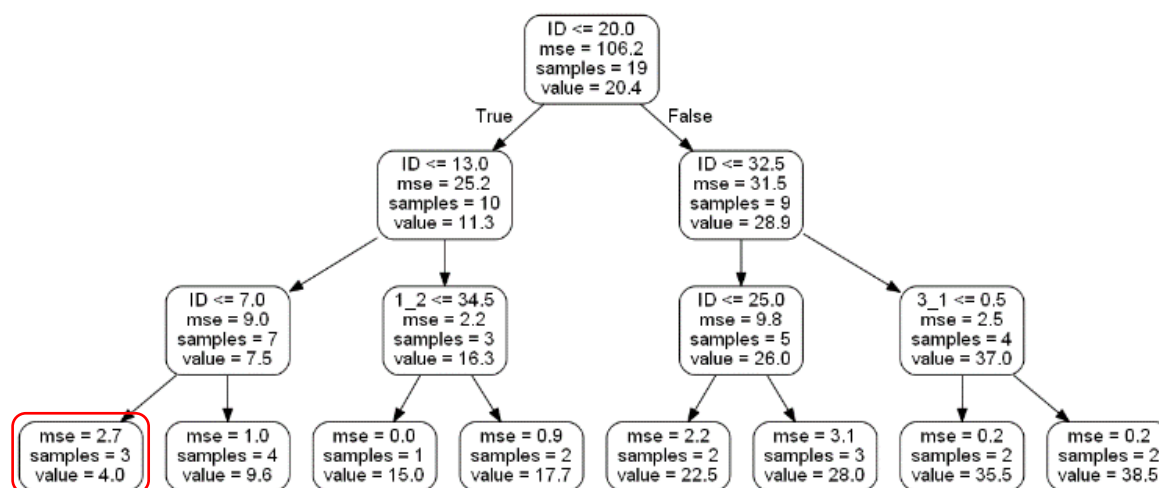


Рисунок 4. Дерево рішень з вибору найкращого претендента на посаду розробника

Таблиця 2. Порівняння відповідей претендента id7 з ідеальною вибіркою

| ID пит. | Ідеал.    | ID7            | ID пит. | Ідеал. | ID7 | ID пит. | Ідеал. | ID7 |
|---------|-----------|----------------|---------|--------|-----|---------|--------|-----|
| 1 1     | name      | Діана Петренко | 2 3     | yes    | no  | 3 3     | yes    | yes |
| 1 2     | 27        | 32             |         | yes    | yes | 3 4     | yes    | yes |
| 1 3     | developer | Developer      | 2 4     | yes    | no  | 3 5     | yes    | no  |
| 1 4     | yes       | yes            | 2 5     | no     | yes | 3 6     | yes    | yes |
| 1 5     | 3         | 10             | 2 6     | no     | yes | 3 7     | yes    | no  |
| 1 6     | Project   | Pr55           | 2 7     | yes    | no  | 3 8     | yes    | yes |
| 1 7     | yes       | yes            | 2 8     | no     | yes | 3 9     | yes    | yes |
| 1 8     | no        | yes            | 2 9     | yes    | yes | 3 10    | yes    | no  |
| 1 9     | no        | no             | 2 10    | yes    | no  | 3 11    | yes    | yes |
| 2 1     | yes       | yes            | 3 1     | yes    | yes | 3 12    | yes    | yes |
| 2 2     | no        | yes            | 3 2     | yes    | no  |         |        |     |

**Висновки.** У роботі сформовано стратегію управління HR короткостроковим IT-проектом, де виділено основні етапи формування команди та роботи з нею.

Для вибору претендентів для короткострокового IT-проекту розроблено метод формування HR короткострокового проекту на основі об'єднання інтелектуального чат-бота, парсингу сайтів з пошуку роботи та аналізу претендентів з використанням машинного навчання, що дає можливість, на відміну від аналогів, сформувати закрите віртуальне се-

редовище для вибору претендентів у команду короткострокового проекту без HR-менеджера. Перевагами цього є зменшення часових витрат на HR-менеджмент та, відповідно, зменшення витрат на оплату праці рекрутерів.

Результати проведених експериментальних досліджень підтвердили ефективність використання дерева рішень для вибору претендентів на посаду розробника, що має практичне значення при формуванні HR короткострокового проекту. Використання додатково парсеру резюме з сайтів пошуку роботи до-

звонило збільшити вибірку претендентів, що, в свою чергу, збільшило точність прогнозування з 94% до 98%.

У подальших наукових дослідженнях буде проведено вдосконалення інтелектуальної складової чат-бота для покращення спілкування між претендентом та системою.

### Список використаних джерел/References

- [1] J. Qin, Y. Liu, and R. Grosvenor, "A categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and beyond", *Procedia CIRP*, pp. 173-178, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>
- [2] J. Lee, B. Bagheri, and H. An Kao, "A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems", *Manufacturing Letters*, no. 3, pp. 18-23, 2015.
- [3] S. Mellor, L. Hao, and D. Zhang, "Additive manufacturing: A framework for implementation", *International Journal of Production Economics*, pp. 194-201, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.008>
- [4] H. Wandke, "Assistance in human-machine interaction: a conceptual framework and a proposal for a taxonomy", *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 6, no. 2, pp. 129-155, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/1463922042000295669>
- [5] B. E. V. Comendador, B. M. B. Francisco, J. S. Medenilla, and S. Mae, "Pharmabot: A pediatric generic medicine consultant chatbot", *Journal of Automation and Control Engineering*, vol. 3 (2), 2015.
- [6] R. B. Mathew, S. Varghese, S. E. Joy, and S. S. Alex, "Chatbot for disease prediction and treatment recommendation using machine learning", in *2019 3rd Int. Conf. on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*. doi: 10.1109/icoei.2019.8862707
- [7] I. G. Ndukwe, B. K. Daniel, and C. E. Amadi, "A machine learning grading system using chatbots", *Artificial Intelligence in Education*, pp. 365-368, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-23207-8\_67
- [8] C. S. Rajender Kumar Surana, Shriya, D. B. Gupta, and S. P. Shankar, "Intelligent chatbot for requirements elicitation and classification", in *2019 4th Int. Conf. on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT)*. doi: 10.1109/rteict46194.2019.9016907
- [9] S. A. Sheikh, V. Tiwari, and S. Singhal, "Generative model chatbot for human resource using deep learning", in *2019 Int. Conf. on Data Science and Engineering (ICDSE)*. doi: 10.1109/icdse47409.2019.8971795
- [10] L. Zhou, J. Gao, D. Li, and H. Y. Shum, "The design and implementation of xiaoice, an empathetic social chatbot", *Computational Linguistics*, vol. 46 (1), pp. 53-93, 2020.
- [11] L. Cui, S. Huang, F. Wei, C. Tan, C. Duan, and M. Zhou, "Superagent: A customer service chatbot for e-commerce websites", in *Proc. ACL 2017, System Demonstrations*, 2017, July, pp. 97-102.
- [12] M. Nuruzzaman, and O. K. Hussain, "IntelliBot: A dialogue-based chatbot for the insurance industry", *Knowledge-Based Systems*, 105810, 2020. doi: 10.1016/j.knosys.2020.105810
- [13] M. Nuruzzaman, and O. K. Hussain, "A survey on chatbot implementation in customer service industry through deep neural networks", in *2018 IEEE 15th Int. Conf. on e-Business Engineering (ICEBE)*. doi: 10.1109/icebe.2018.00019
- [14] Z. Xu, and B. Song, "A machine learning application for human resource data mining problem", *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 847-856, 2006. doi: 10.1007/11731139\_99
- [15] Q. Wang, B. Li, and J. Hu, "Feature selection for human resource selection based on affinity propagation and SVM sensitivity analysis", in *2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC)*, 2009. doi: 10.1109/nabic.2009.5393596
- [16] M. E. Tomassen, "Exploring the black box of machine learning in human resource management: An HR perspective on the consequences for HR professionals", M.S. thesis, University of Twente, 2016.
- [17] Z. Chuang, W. Ming, L. C. Guang, X. Bo, and L. Zhi-qing, "Resume parser: Semi-structured Chinese document analysis", in *Proc. 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*, pp. 12-16, 2009. doi: 10.1109/csie.2009.562.

- [18] D. Celik, A. Karakas, G. Bal, C. Gultunca, A. Elci, B. Buluz, and M. C. Alevli, "Towards an information extraction system based on ontology to match resumes and jobs", in *Proc. 2013 IEEE 37th Annual Computer Software and Applications Conf. Workshops*, pp. 333-338, 2013. doi: 10.1109/compsacw.2013.60.
- [19] Y. Wentan, and Q. Yupeng, "Chinese resume information extraction based on semi-structured text", in *Proc. 2017 36th Chinese Control Conf. (CCC)*, pp. 11177-11182, 2017. doi: 10.23919/chicc.2017.8029141
- [20] P. Das, M. Pandey, and S. S. Rautaray, "A CV parser model using entity extraction process and big data tools", *IJ Information Technology and Computer Science*, vol. 9, pp. 21-31, 2018.
- [21] B. C. L. Tobing, I. R. Suhendra, and C. Halim, "Catapa resume parser", in *Proc. 2019 3rd Int. Conf. on Natural Language Processing and Information Retrieval (NLPPIR'2019)*, pp. 68-74, 2019. doi: 10.1145/3342827.3342832
- [22] D. L. Lunsford, "An output model for human resource development analytics", *Performance Improvement Quarterly*, 2019. doi: 10.1002/piq.21284
- [23] Y. Long, J. Liu, M. Fang, T. Wang, and W. Jiang, "Prediction of employee promotion based on personal basic features and post features", in *Proc. Int. Conf. on Data Processing and Applications - ICDPA 2018*. doi: 10.1145/3224207.3224210
- [24] S.-C. Necula, and C. Strîmbei, "People analytics of semantic web human resource résumés for sustainable talent acquisition", *Sustainability*, vol. 11 (13), p. 3520, 2019. doi: 10.3390/su11133520
- [25] M. Armstrong, and S. Taylor. *Armstrong's Handbook of Human Resource Management Practice*. 13th ed. London, G.B.: Kogan Page; 2014.
- [26] J. Hentze, und J. Metzner. *Personalwirtschaftslehre 1 - Grundlagen, Personalbedarfsermittlung, -beschaffung, -entwicklung und -einsatz*. 5th ed. Bern, CH: Haupt Verlag, 1991.
- [27] O. Neuberger, *Personalwesen I- Grundlagen, Entwicklung, Organisation, Arbeitszeit, Fehlzeiten*. Stuttgart, DE: Ferdinand Enke Verlag, 1997.
- [28] H. J. Drumm, *Personalwirtschaft*. 6th ed. Berlin, DE: Springer-Verlag, 2008.
- [29] W. F. Cascio, *Managing human resources - Productivity, quality of work life, profits*. 7th ed. Boston, USA: McGraw-Hill/Irwin, 2006.
- [30] В. М. Жуковська, "Цифрові технології в управлінні персоналом: сутність, тенденції, розвиток", *Науковий вісник Міжнар. гум. ун-ту. Серія: Економіка і менеджмент*, т. 27 (2), с. 13-17, 2017.
- [31] Dialogflow. [Online]. Available: <https://dialogflow.com/>
- [32] J. Liebenberg, M. Huisman, and E. Mentz, "Knowledge and skills requirements for software developer students", *Int. Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering*, vol. 8 (8), pp. 2604-2609, 2014.

**Kh. V. Lipianina-Honcharenko, Ph. D., Associate Professor,**

e-mail: [xrustya.com@gmail.com](mailto:xrustya.com@gmail.com)

West Ukrainian National University

Lvivska St., 11, Ternopil, 46009, Ukraine

## INTELLIGENT METHOD OF FORMING HUMAN RESOURCES FOR A SHORT-TERM PROJECT

**Statement of the problem.** *With the amount of information that is available in the recruitment process, machine learning can recognize many more patterns than a recruiter and apply effective methods for identifying candidates. When combining machine learning with a chatbot, it will reduce routine work: resume selection, calls to applicants, answers to typical questions, interview invitations, etc. In this regard, it can be assumed that the study of ways to form an HR short-term project based on machine learning is one of the promising areas in the management of short-term projects.*

**Analysis of recent research and publications.** *It should be noted that mostly the authors analyze the work of chatbots or the selection of team members based on machine learning methods. However,*

*the combination of an intelligent chatbot with the generation of a response based on a detailed analysis of applicants and, accordingly, making goal-oriented management decisions in the formation of a team for a short-term project is an important point. The analysis of candidates can be expanded with the use of resume parsing from job search sites, which will allow to maximize the base of applicants.*

***The purpose of the article** is to develop an intelligent method of forming a short-term HR project based on machine learning, which allows to reduce the time spent on HR and, accordingly, reduce the cost of recruiters.*

***Presenting main material.** In the work, the HR management strategy of a short-term IT project, which highlights the main stages of team formation and work with it, has been formed. To select applicants for a short-term IT project, a method for forming an HR of a short-term project based on the combination of an intelligent chatbot, parsing of job search sites and analysis of applicants using machine learning has been developed. This makes it possible, unlike analogues, to form a closed virtual environment for selecting applicants for a short-term project team without an HR manager. The advantages of this are the reduction of time spent on HR management and, accordingly, the reduction of recruiters' labor costs.*

***Results.** Calculations have shown that the parameter of the average quadratic error  $mse = 9$  at a value of 7.5 on the 7th sample, which corresponds to ID – 7. The accuracy of the prediction is 94%. From the results of the decision tree, it can be seen that the applicant with ID =7 has the best characteristics for the position of developer. This applicant has given answers closest to the ideal ones in the training sample. Then this result is sent to the manager and he makes the appropriate decision, which is sent through the chatbot to all applicants.*

***Conclusion.** The results of the experimental studies have confirmed the effectiveness of using a decision tree to select applicants for the position of developer, which is of practical importance in the formation of HR of a short-term project. The use of additional resume parser from job search sites has allowed to increase the sample of applicants, which in turn increased the accuracy of forecasting from 94% to 98%.*

***Keywords:** HR, chatbot, machine learning, decision trees, IT project.*

УДК 681.884

[0000-0003-4279-7065] **С. І. Артемук**, аспірант,  
e-mail: serhii.i.artemuk@lpnu.ua

[0000-0002-7157-3725] **І. П. Микитин**, д-р техн. наук, професор  
e-mail: mykytynip@ukr.net

Національний університет «Львівська політехніка»  
вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, 79000, Україна

## МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛА АКУСТИЧНОГО СИГНАЛУ

У статті проведено літературний огляд і досліджено існуючі методи визначення координат розташування джерела акустичного сигналу. Виокремлено переваги і недоліки наведених у статті пасивних і активних методів. Ці методи можуть знайти застосування в авіації, космонавтиці, машинобудуванні й інших галузях науки та техніки, де використовують вимірювання, і призначені для визначення координат джерела акустичного сигналу. Останнім часом спостерігається тенденція зростання інтересу до використання нейронних мереж для вирішення різних завдань і застосування їх у різних сферах. За допомогою штучних нейронних мереж можна опрацьовувати, аналізувати та узагальнювати інформацію. Авторами статті було порівняно метод визначення координат розташування джерела акустичного сигналу із застосуванням штучної нейронної мережі із вже існуючими методами. У цьому методі визначають наявність сигналу від джерела акустичного сигналу у точках прийому шляхом приймання і реєстрації сигналу у просторово рознесених точках з відомими координатами та подальшого визначення різниці часу поширення сигналів від джерела до точок прийому сигналу. Наявність сигналу визначають за серединою площі прийнятого сигналу. Кількість точок прийому сигналу встановлюють на етапі навчання штучної нейронної мережі за критерієм мінімуму похибки визначення координат джерела акустичного сигналу. Різниці часу поширення сигналів від джерела до точок прийому сигналу визначають між усіма точками прийому, які розташовані впорядковано або випадковим чином, причому ці різниці часу подають на вхід попередньо навченої штучної нейронної мережі, на виході якої отримують координати джерела акустичного сигналу. Застосування цього методу дозволяє визначати координати джерела акустичного сигналу, не маючи при цьому попередньої інформації щодо відстані до джерела акустичного сигналу або будь-яких інших характеристик об'єкта, визначати координати неперіодичних сигналів, спростити процес вимірювання часових інтервалів та обчислення координат.

**Ключові слова:** визначення координат, акустичні сигнали, метод мінімуму, метод максимуму, радіолокація, пеленгація, штучна нейронна мережа, глибоке навчання, звук.

**Вступ.** Локалізація місця розташування джерела акустичного сигналу (ДАС) – це область досліджень, яка займається визначенням координат ДАС. Більшість розроблених систем визначення координат (СВК) ДАС переважно вимірюють потужність акустичного сигналу [1]. Крім того, у деяких випадках використовуються системи, які визначають координати ДАС за різницею часу надходження акустичного сигналу до сенсорів. Визначення координат ДАС використовується у таких галузях людської діяльності:

- Полегшення спілкування [2] (візуалізації) під час проведення відеоконференцій,

коли відеокамера, використовуючи СВК ДАС, повертається у бік людини, яка розмовляє на цей момент.

- Радіолокація та навігація. Прикладом застосування СВК ДАС є пасивний сонар, який використовується для пошуку перешкод та об'єктів [3].

- Технічна допомога в медицині. Одне із застосувань СВК ДАС – це слухові апарати [4], які дають можливість визначити розташування джерела голосового сигналу, що дозволяє людині з вадами слуху швидше візуально ідентифікувати співрозмовника.

• **Військова сфера.** За допомогою СВК ДАС можна визначити, з якої позиції було здійснено постріл [5] із військової техніки. За визначеними координатами можна провести ракетний або артилерійський обстріл для знищення техніки супротивника. Крім того, такі системи можуть використовуватися для самонаведення ракет за певним акустичним сигналом.

• **Сфера розваг.** СВК ДАС використовується в іграх та сценаріях віртуальної реальності для покращення реалістичності навколишнього середовища [6, 7] за рахунок об'ємного звуку. Тобто система визначає координати ДАС і залежно від його розташування змінює потужність звуку у динаміках звукової системи. У такому випадку під час гри лише за допомогою звуку можна визначити, зліва чи справа знаходиться ігровий об'єкт.

• **Робототехніка.** В робототехніці СВК ДАС використовується для реалізації технічного слуху [8]. Це дозволяє, наприклад, роботизованій системі ідентифікувати місце розташування людини, яка розмовляє з нею. Або, наприклад, робот-пилосос, який за допомогою спеціального акустичного сигналу знаходить місце розташування станції підзарядки.

• **Охоронні технології.** СВК ДАС можуть застосовуватися в інтелектуальних камерах відеоспостереження, які можуть швидко наводитися на координати джерела підозрілого акустичного сигналу.

• **Профілактика складних технічних виробів.** На заводах автомобілебудування СВК ДАС контролюють роботу великих пресів і визначають сторонні шуми в їх функціональних блоках. Це дозволяє швидко ідентифікувати і усунути несправності, що, в свою чергу, збільшує експлуатаційний ресурс обладнання та дозволяє попередити аварійні ситуації [9].

• **Дефектоскопія.** СВК ДАС можуть застосовуватися для неруйнівного контролю якості матеріалів і виробів з метою виявлення внутрішніх прихованих дефектів та визначення місця їх розташування [10, 11].

На сьогоднішній день існує чимало методів визначення координат ДАС, а саме:

• імпульсний метод [1, 12];

- метод вимірювання різниці фаз [1, 13];
- частотний метод [1, 14];
- доплерівський метод виявлення рухомого об'єкта та вимірювання його швидкості [1, 15];
- амплітудний метод за максимальним значенням прийнятого сигналу [1];
- амплітудний метод за мінімальним значенням прийнятого сигналу [1];
- амплітудний комбінований метод [1];
- метод вимірювання фази між сигналами двох сенсорів [1, 16];
- диференційний метод [17, 18];
- різницево-часовий метод з використанням нейронної мережі.

**Мета та задачі дослідження.** Метою цієї статті є дослідження характеристик існуючих методів визначення координат ДАС, порівняння їх переваг та недоліків.

**Активні методи визначення координат розташування об'єкта**

**Імпульсний метод.** Імпульсний метод полягає в тому, що в початковий момент часу випромінюється у середовище імпульс певної форми, а далі очікується надходження відбитого імпульсу від об'єкта вимірювання [1, 12]. Відстань  $R$  до об'єкта визначається за проміжком часу  $T$  між випромінюванням та прийнятим відбитим імпульсом:

$$R = c_0 \frac{T}{2}, \quad (1)$$

де  $c_0$  – швидкість поширення акустичного сигналу.

**Метод вимірювання різниці фаз.** Суть методу полягає у вимірюванні різниці фаз [1, 13]. У простір випромінюється акустичний сигнал у вигляді синусоїдальних коливань певної частоти, а далі очікується надходження відбитого від об'єкта вимірювання акустичного сигналу. Відстань до об'єкта визначається різницею фаз випромінюваного і прийнятого сигналу, яка розраховується за формулою

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 4\pi fR / c_0 + (\chi - \varphi_0), \quad (2)$$

де  $R$  – відстань до об'єкта,  $\varphi_0$  – початкова фаза,  $\chi$  – фаза акустичного сигналу при відбитті від поверхні об'єкта,  $4\pi f/c_0$  – запізнення по фазі внаслідок проходження відстані  $2r$ .

Враховуючи (2), відстань  $R$  можна знайти за формулою

$$R = \frac{\Delta\varphi - (\chi - \varphi_0)}{4\pi f / c_0}. \quad (3)$$

Значення фази  $\chi$  відбитого акустичного сигналу у (3) є невідомим, тому у практичних вимірюваннях використовується метод двох частот, в якому визначають різницю фаз для кожної частоти окремо, а потім знаходять різницю різниць фаз [1]:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = 4\pi\Delta f R / c_0 + 2\pi N, \quad (4)$$

де  $R$  – відстань до об'єкта,  $\Delta\varphi$  – різниця різниць фаз,  $N$  – кількість повних періодів синусоїдального акустичного сигналу,  $\Delta f = f_1 - f_2$  – різниця частот.

Виходячи з (4), отримаємо

$$R = \frac{\Delta\varphi - 2\pi N}{4\pi\Delta f} c_0. \quad (5)$$

**Частотний метод.** Цей метод базується на вимірюванні частоти биття, яка виникає в амплітудному детекторі при взаємодії випроміненого та відбитого від об'єкта вимірювання частотно-модульованих сигналів [1, 14]. Значення відстані розраховується за формулою

$$R = \frac{FTc_0}{4f_\delta}, \quad (6)$$

де  $R$  – відстань до об'єкта,  $T$  – період модуляції,  $F$  – частота биття,  $f_\delta$  – девіація частоти частотно-модульованого сигналу.

**Доплерівський метод виявлення рухомого об'єкта та вимірювання його швидкості.** Цей метод базується на ефекті Доплера, який описує зміну частоти відбитого акустичного сигналу від рухомого об'єкта відносно частоти випроміненого акустичного сигналу [1, 15]. Доплерівська частота визначається за формулою

$$f_\delta = f_0 \frac{2V_0}{c_0} \cos \theta_0, \quad (7)$$

де  $f_\delta$  – доплерівська частота,  $f_0$  – частота випроміненого акустичного сигналу,  $\theta$  – кут між

акустичним променем і напрямком руху,  $V_0$  – швидкість руху об'єкта.

Враховуючи (7), швидкість руху об'єкта описується формулою

$$V_0 = \frac{f_\delta c_0}{2f_0 \cos \theta}, \quad (8)$$

**Пасивні методи визначення координат ДАС**

**Метод вимірювання фази між сигналами двох сенсорів.** Фазовий метод полягає у вимірюванні різниці фаз акустичних сигналів, прийнятих двома сенсорами, які рознесені в просторі на певну відстань. Фазовий зсув  $\varphi$  між акустичними сигналами, які прийняті двома сенсорами [1], розраховується за формулою

$$\varphi = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \alpha, \quad (9)$$

де  $\varphi$  – фазовий зсув між двома сигналами,  $d$  – довжина акустичної бази (відстань між двома сенсорами),  $\lambda$  – довжина хвилі акустичного сигналу,  $\alpha$  – кут між перпендикуляром до акустичної бази та вектором на об'єкт вимірювання.

Враховуючи (9), кутову координату  $\alpha$  можна знайти за формулою

$$\alpha = \arcsin \frac{\varphi \lambda}{2\pi d}. \quad (10)$$

**Амплітудний метод за максимальним значенням прийнятого сигналу.** Метод полягає в тому, що визначається напрямок, для якого амплітуда прийнятого сигналу має максимальне значення [1]. Відповідно, у цьому напрямку розташоване ДАС. Для визначення напрямку на ДАС застосовується антена із вузькою діаграмою спрямованості в площині пеленгування (рисунок 1).

Якщо застосувати декілька пристроїв із такими антенами, які розташовані на певній відстані і координати яких відомі, то місце перетину (М) отриманих променів ( $a$  і  $b$ ) є місцем знаходження ДАС (рисунок 2).

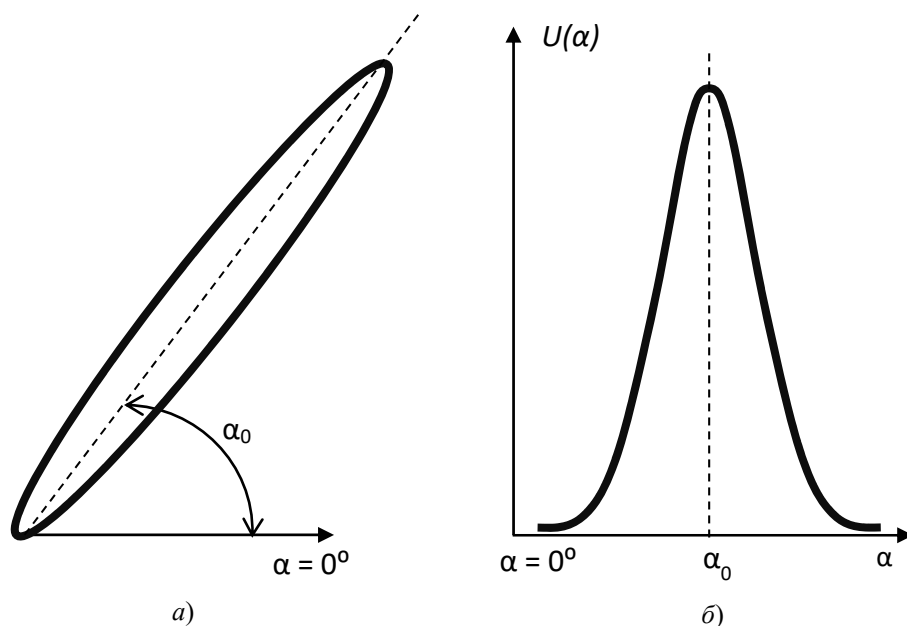


Рисунок 1. Характеристики антени для методу вимірювання відстані за максимальним значенням прийнятого сигналу:  
а) діаграма спрямованості; б) сигнальна функція

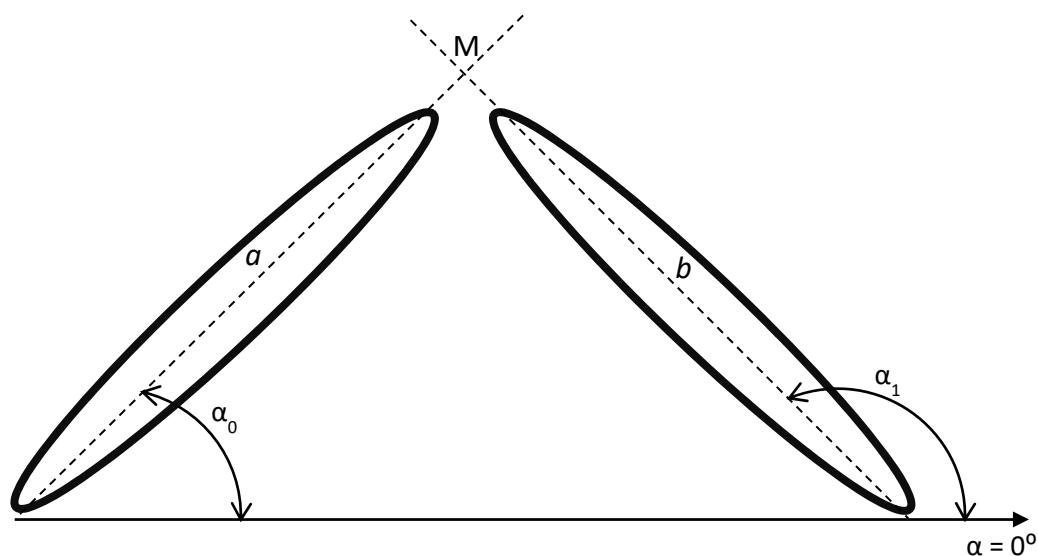
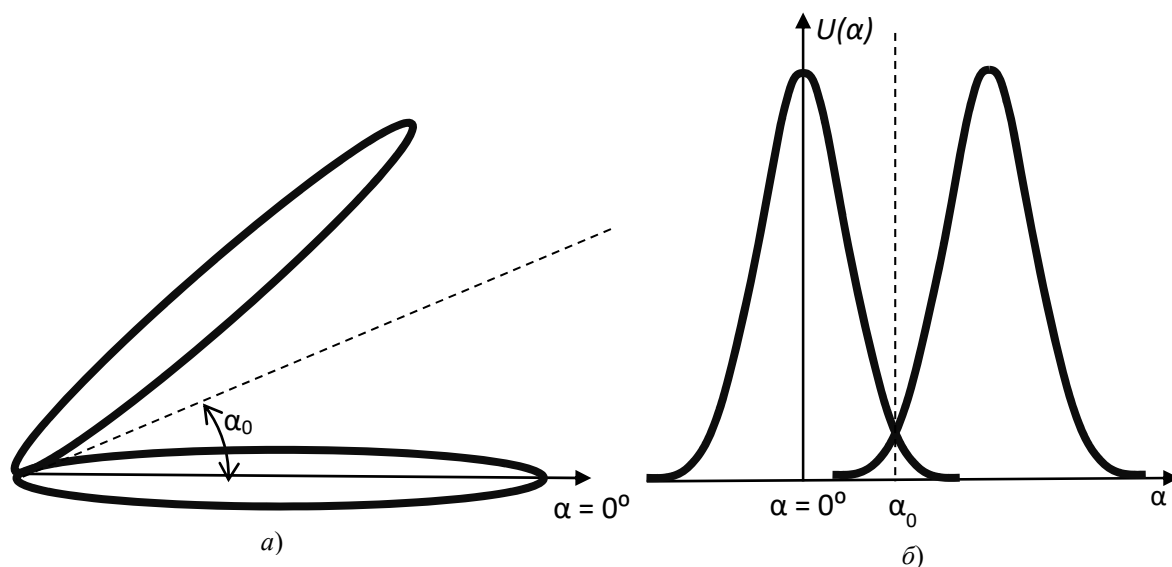


Рисунок 2. Визначення координат ДАС із використанням методу вимірювання відстані за максимальним значенням прийнятого сигналу

**Амплітудний метод за мінімальним значенням прийнятого сигналу.** У цьому методі [1] визначення кутової координати об'єкта вимірювання проводиться поворотом антени із діаграмою спрямованості у вигляді двох симетричних пелюсток (рисунок 3) доти,

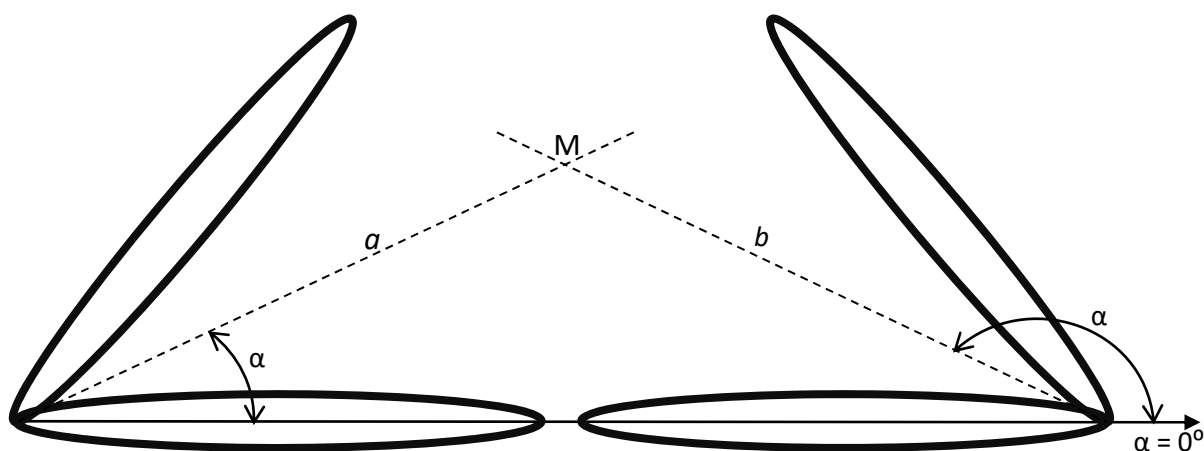
поки амплітуда прийнятого акустичного сигналу матиме мінімальне значення. Вісь антени збігається з віссю симетрії сигнальної функції (рисунок 3, б), і для мінімального значення кутова координата відповідає напрямку на об'єкт.



**Рисунок 3. Характеристики антени для методу вимірювання відстані за мінімальним значенням прийнятого сигналу:**  
 а) діаграма спрямованості; б) сигнальна функція

Для декількох пристроїв із такими антенами, які розташовані на певній відстані і координати яких відомі, місце перетину (М)

отриманих променів (а і б) є місцем знаходження ДАС (рисунок 4).



**Рисунок 4. Визначення координат ДАС із використанням методу вимірювання відстані за мінімальним значенням прийнятого сигналу**

**Амплітудний комбінований метод.**  
 У цьому методі [1] використано переваги двох попередньо розглянутих пасивних амплітудних методів: достатньо висока амплітуда в зоні визначення напрямку, як в амплітудному методі за максимальним значенням прийнятого сигналу, а також різке збільшення чутливості антени в зоні мінімального прийому, як в

амплітудному методі за мінімальним значенням. Для його реалізації необхідна антена з діаграмою спрямованості у вигляді двох пелюсток (рисунок 5, а), які частково перекриваються і створюють впадину, мінімальне значення якої є більшим за половину амплітуди сигнальної функції (рисунок 5, б).

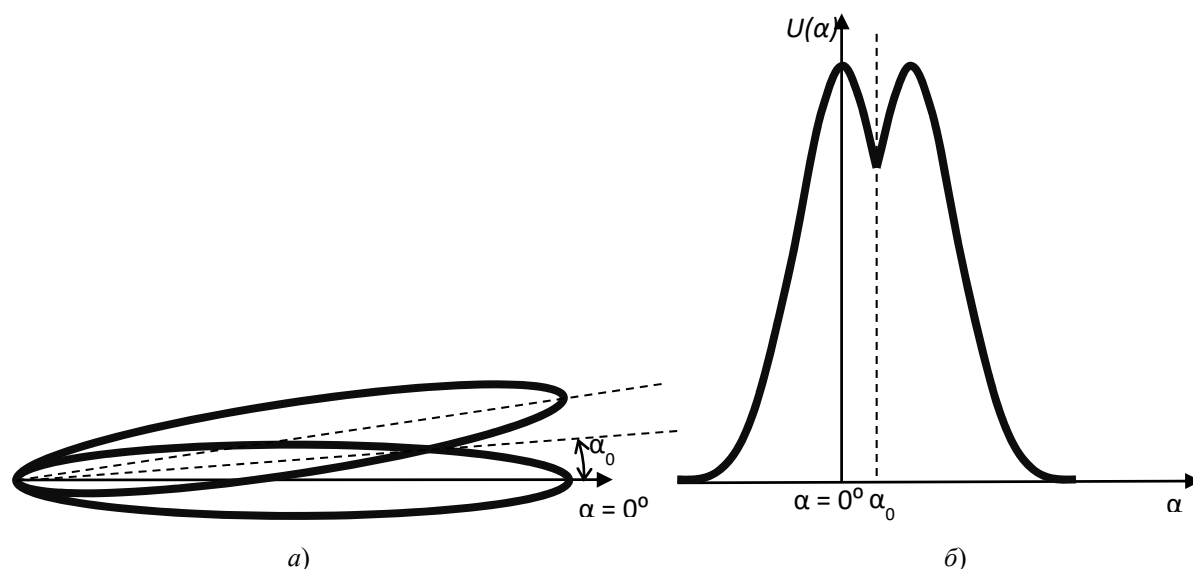


Рисунок 5. Характеристики антени для комбінованого методу:

а) діаграма спрямованості; б) сигнальна функція

Як і в попередніх методах, можна визначити координати ДАС, застосувавши дві і більше таких антен (рисунок 6).

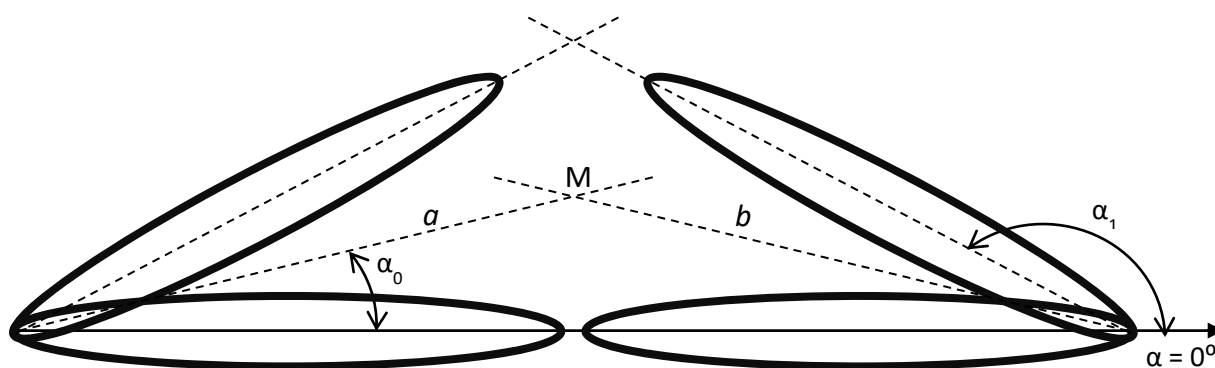
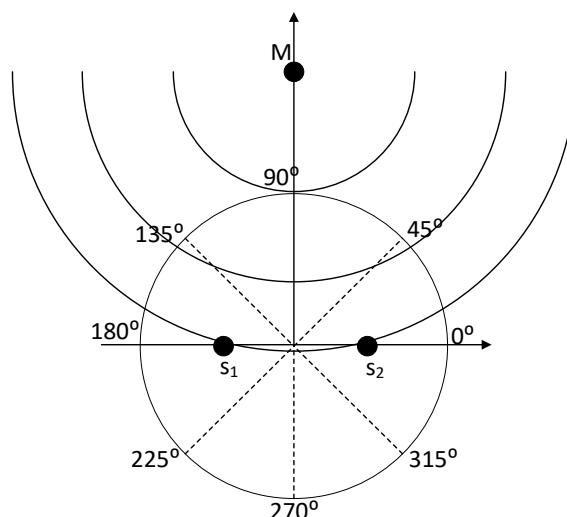


Рисунок 6. Визначення координат ДАС із використанням комбінованого методу

**Диференціальний метод.** Метод полягає у вимірюванні різниці часу реєстрації акустичного сигналу двома сенсорами, які розташовані на певній відстані (акустична база) [17, 18]. Оптимальні метрологічні параметри системи, яка побудована за цим методом, можна отримати, якщо різниця часу дорівнює нулю,

а, відповідно, координати ДАС знаходяться на перпендикулярі до акустичної бази (рисунок 7). Якщо різниця часу не дорівнює нулю, то суттєво ускладнюється залежність кутової координати від значення акустичної бази та різниці часу надходження акустичного сигналу до двох сенсорів.

Рисунок 7. Оптимальне розташування сенсорів  $s_1$ ,  $s_2$  та ДАС (точка М)

Якщо застосувати декілька пар сенсорів, які розташовані на певній відстані і координати яких відомі, то місце перетину (М)

отриманих променів ( $a$  і  $b$ ) є місцем розташування ДАС (рисунок 8).

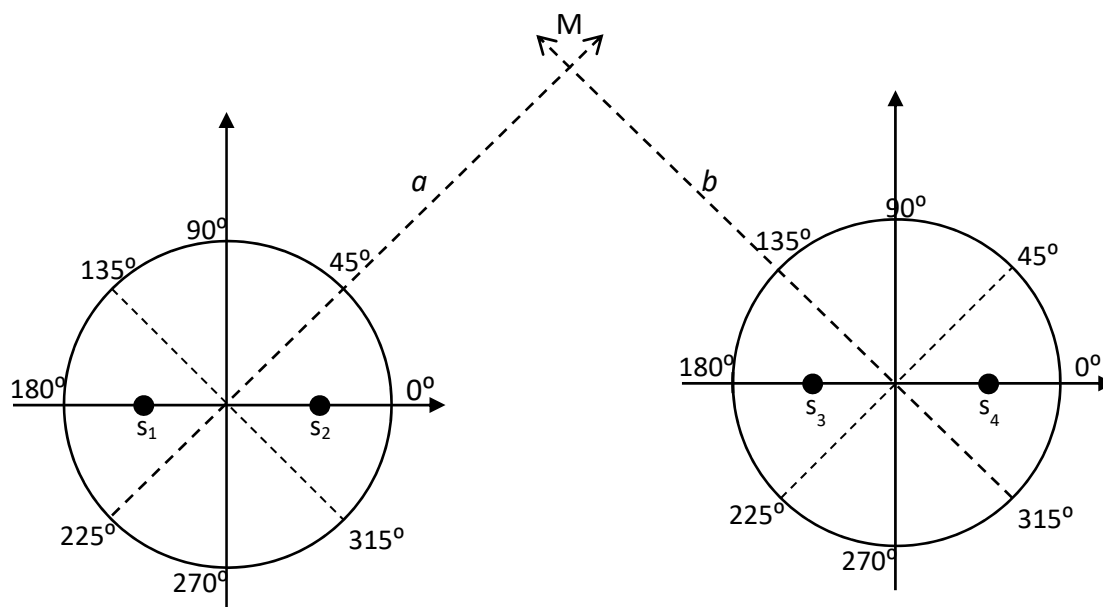


Рисунок 8. Визначення координат ДАС із використанням чотирьох сенсорів

**Різницево-часовий метод з використанням нейронної мережі.** Система визначення координат ДАС (рисунок 9), яка побудована на основі цього методу, використовує  $N_s$  сенсорів (мікрофонів) для реєстрації акустичного сигналу, джерело якого розміщене в точці М з координатами  $(x_M, y_M)$ . Сенсори розташовують у просторі або впорядковано (в одну лінію, прямокутником, трикутником тощо), або випадковим чином. Для обох ви-

дків координати розташування сенсорів  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots (x_i, y_i), \dots (x_{N_s}, y_{N_s})$  повинні бути відомими. Реєструється момент часу надходження акустичного сигналу  $t_1, t_2, \dots t_i, \dots t_{N_s}$  від джерела до кожного із сенсорів за серединою площі прийнятого сигналу. Зареєстровані значення моментів часу передаються на мікропроцесор (МП) зі штучною нейронною мережею (ШНМ).

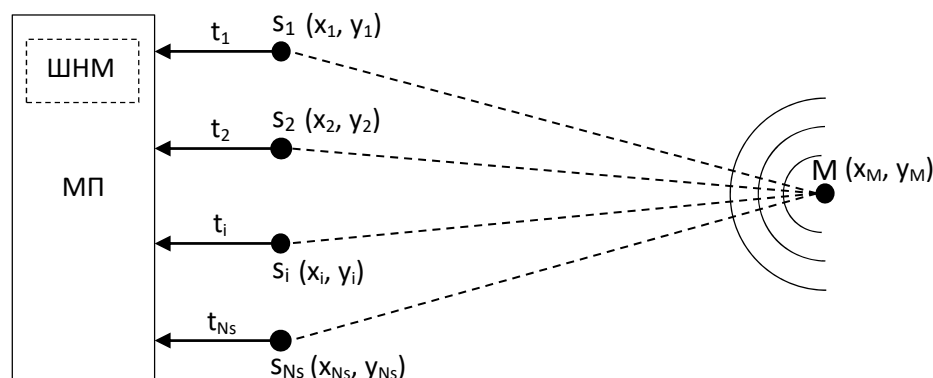


Рисунок 9. Система вимірювання координат ДАС з  $N_s$  сенсорами для реєстрації акустичного сигналу

МП розраховує різницю часу надходження акустичного сигналу для кожної пари сенсорів:

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j, \quad (11)$$

де  $\Delta t_{ij}$  – різниця часу реєстрації акустичного сигналу  $t_i$  і  $t_j$  сенсорами  $s_i$  і  $s_j$ .

Кількість значень  $\Delta t_{ij}$  розраховується за формулою [19]

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}, \quad (12)$$

де  $C_n^m$  – кількість комбінацій пар сенсорів,  $n$  – кількість сенсорів,  $m=2$  – кількість сенсорів, між якими розраховується різниця часу  $\Delta t_{ij}$ .

Для розрахунку координат  $(x_M, y_M)$  розташування ДАС використовується попередньо навчена ШНМ (рисунок 10). Так, наприклад, для чотирьох сенсорів на вхід ШНМ подаються значення  $\Delta t_{ij}$ , а саме:  $\Delta t_{12}, \Delta t_{13}, \Delta t_{14}, \Delta t_{23}, \Delta t_{24}, \Delta t_{34}$ . На виході ШНМ отримуємо координати  $(x_M, y_M)$ .

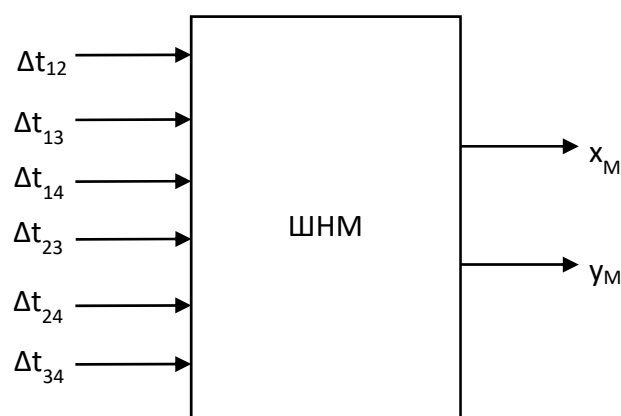


Рисунок 10. Структура ШНМ для чотирьох сенсорів

**Результати досліджень.** Результатом досліджень є аналіз переваг та недоліків розглянутих активних та пасивних методів визначення координат ДАС. Результати порівняння методів наведено в таблиці 1.

У таблиці виокремлено основні переваги і недоліки пасивних та активних методів визначення координат ДАС, які дозволяють зробити висновки про особливості їх застосування. Зокрема, доплерівський метод здатний визначати напрямок та швидкість руху об'єкта, проте не дозволяє визначити відстань

до об'єкта. Амплітудні методи визначають кутові координати, але неефективні у пеленгації короткочасних сигналів, а також передбачають використання складних конструкцій з рухомими елементами. Диференційний метод потребує розташування ДАС на перпендикулярі до акустичної бази, що реалізувати в реальному часі є достатньо складною технічною задачею. А метод вимірювання фази між сигналами двох сенсорів дозволяє вимірювати лише невеликі відстані за фіксованої акустичної бази.

Таблиця 1. Переваги та недоліки методів визначення координат ДАС

| Методи                                                         | Переваги                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Недоліки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Активні методи                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Імпульсний метод                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- метод можна реалізувати відносно простими технічними засобами;</li> <li>- дозволяє проводити одночасне спостереження та визначення відстані до багатьох об'єктів</li> </ul>                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- мінімальне значення вимірюваної відстані обмежується мінімально можливою тривалістю випромінюваного імпульсу і швидкістю поширення акустичних сигналів;</li> <li>- для збільшення вимірюваної відстані необхідно збільшувати потужність випромінюваного імпульсу</li> </ul>        |
| Метод вимірювання різниці фаз                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- дозволяє вимірювати малі відстані;</li> <li>- менша похибка вимірювання порівняно з імпульсним методом</li> </ul>                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- суттєво ускладнюється одночасне визначення відстані до декількох об'єктів;</li> <li>- малий діапазон вимірювання відстаней;</li> <li>- максимальна вимірювана відстань дорівнює половини довжини хвилі акустичного сигналу з більшою частотою</li> </ul>                           |
| Частотний метод                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- дозволяє вимірювати малі відстані;</li> <li>- краща роздільна здатність і менша похибка вимірювання порівняно з імпульсним методом</li> </ul>                                                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- необхідність забезпечення надійної акустичної ізоляції між приймачем та випромінювачем;</li> <li>- суттєво ускладнюється одночасне визначення відстані до декількох об'єктів</li> </ul>                                                                                            |
| Доплерівський метод                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- дозволяє визначити напрямок і швидкість руху об'єкта</li> </ul>                                                                                                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- не дозволяє визначити відстань до об'єкта;</li> <li>- не виявляє нерухомий об'єкт;</li> <li>- не можна визначити швидкість руху, якщо об'єкт рухається перпендикулярно до напрямку поширення акустичного сигналу</li> </ul>                                                        |
| Пасивні методи                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Метод вимірювання фази між сигналами двох сенсорів             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- не потребує використання антен порівняно з вище розглянутими методами;</li> <li>- менша похибка порівняно з пасивними амплітудними методами</li> </ul>                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- для забезпечення коректних результатів вимірювань фазовий зсув не повинен перевищувати <math>\pi</math>;</li> <li>- для мінімізації похибки вимірювання необхідно використовувати засоби перетворення двох сигналів з однаковими комплексно-частотними характеристиками</li> </ul> |
| Амплітудний метод за максимальним значенням прийнятого сигналу | <ul style="list-style-type: none"> <li>- відносно простий спосіб визначення кутової координати;</li> <li>- за напрямком максимуму сигналу отримуємо максимальне значення відношення сигнал/завада;</li> <li>- дозволяє визначити координати ДАС, яке розташоване на великій відстані</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- неефективний у випадку пеленгування короткочасних акустичних сигналів, тривалість яких менша періоду обертання антени;</li> <li>- зі збільшенням ширини діаграми спрямованості антени зростає похибка вимірювання кутової координати</li> </ul>                                    |

Продовження таблиці 1

| Методи                                                         | Переваги                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Недоліки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Амплітудний метод за мінімальним значенням прийнятого сигналу. | <ul style="list-style-type: none"> <li>- менша похибка визначення кутової координати порівняно з амплітудним методом за максимальним значенням прийнятого сигналу, оскільки невеликому відхиленню від лінії нульового прийому відповідає різке збільшення чутливості антени (рисунки 3, б)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- неефективний у випадку пеленгування короточасних акустичних сигналів, тривалість яких менша періоду обертання антени;</li> <li>- вимірювання суттєво меншої відстані порівняно з амплітудним методом за максимальним значенням прийнятого сигналу;</li> <li>- в зоні мінімуму чутливості антени, де значення вимірюваного сигналу є мінімальним, суттєво зростає вплив завад на визначення кутової координати, тому потрібно використовувати низькошумове обладнання</li> </ul> |
| Амплітудний комбінований метод                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- дозволяє визначити координати ДАС, яке розташоване на великій відстані, як і амплітудний метод за максимальним значенням прийнятого сигналу;</li> <li>- похибка визначення кутової координати практично дорівнює похибці амплітудного методу за мінімальним значенням</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- неефективний у випадку пеленгування короточасних акустичних сигналів, тривалість яких менша періоду обертання антени</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Диференціальний метод                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- метод можна реалізувати простими технічними засобами</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- найменшу методичну похибку можна отримати, якщо ДАС знаходиться на перпендикулярі до акустичної бази;</li> <li>- для визначення координат ДАС необхідно, щоб у реальному часі для кожної пари сенсорів вектор на ДАС був виставлений перпендикулярно до акустичної бази, що є технічно складною задачею</li> </ul>                                                                                                                                                              |
| Різницево-часовий метод з використанням нейронної мережі       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- не потребує жодної інформації про досліджуване джерело акустичного сигналу;</li> <li>- простий у реалізації та використанні;</li> <li>- не використовує антени або інші активні (рухомі) компоненти;</li> <li>- сенсори (мікрофони) можуть бути розташовані як зі збереженням геометричних пропорцій (впорядковано), так і випадковим чином;</li> <li>- доволі широкий діапазон визначення координат ДАС;</li> <li>- визначає координати ДАС – як періодичного, так і неперіодичного</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- похибка визначення координат ДАС залежить від конфігурації нейронної мережі і від кількості сенсорів;</li> <li>- для підвищення точності необхідно проводити калібрування системи безпосередньо на об'єкті дослідження;</li> <li>- для періодичних акустичних сигналів необхідно, щоб час проходження сигналу від ДАС до сенсорів був меншим за його період</li> </ul>                                                                                                          |

**Обговорення результатів.** З наведених у таблиці результатів можна зробити висновок, що активні методи є малоефективними для визначення координат ДАС, від якого погано або взагалі не відбивається сигнал. Такі системи переважно працюють з сигналами, які мають частоту, набагато більшу за частоту акустичного сигналу. Крім того, необхідним є застосування генераторів для формування певних хвиль, які спрямовуються в напрямку на об'єкт, а потім відбитий сигнал приймається певними пристроями.

Тому для цього завдання прийнятним є застосування пасивних методів. Вони позбавлені описаних вище недоліків активних методів. А основною їх перевагою є те, що не потрібно надсилати в навколишнє середовище достатньо потужний сигнал з певними характеристиками. Проте переважна більшість розглянутих пасивних методів потребує використання рухомих антен із певними діаграмами спрямованості. Для розглянутих пасивних методів з використанням сенсорів для реєстрації акустичних сигналів необхідно для кожної пари сенсорів забезпечувати напрямок вектора на ДАС перпендикулярно до акустичної бази. У випадку відхилення від перпендикуляра виникає додаткова похибка.

Представлений пасивний різницево-часовий метод із використанням штучних нейронних мереж містить більшість переваг як пасивних, так і активних методів. Зокрема, не потребує використання рухомих антен порівняно з активними та деякими пасивними методами. Технічна реалізація на основі цього методу є достатньо простою і потребує застосування лише акустичних сенсорів та мікроконтролерної системи опрацювання отриманої інформації. Дас змогу виявляти і визначати як короткочасні імпульси, так і періодичні сигнали, що є перевагою перед майже усіма пасивними методами. Проте для періодичних акустичних сигналів необхідно, щоб час проходження сигналу від ДАС до сенсорів був меншим за його період. Однією з визначальних переваг є те, що акустичні сенсори можуть розташовуватись випадковим чином, що неможливо для інших розглянутих методів визначення координат ДАС.

Зазначені в таблиці недоліки різницево-часового методу з використанням нейронної мережі суттєво не впливають на результати визначення координат ДАС порівняно з іншими методами. У випадку, коли не потрібна висока точність визначення координат, ДАС

калібрування є необов'язковим, що суттєво спрощує технічну реалізацію.

**Висновки.** У статті розглянуто методи визначення координат розташування джерела акустичного сигналу. Виокремлено переваги і недоліки наведених у статті пасивних і активних методів. Ці методи можуть знайти застосування в авіації, космонавтиці, машинобудуванні й інших галузях науки та техніки, де використовують вимірювання, і призначені для визначення координат джерела акустичного сигналу.

За результатами дослідження зроблено висновок, що активні методи є малоефективними для визначення координат ДАС, тому необхідно застосовувати пасивні методи. Вони позбавлені основних недоліків активних методів. А їх перевагою є те, що не потрібно надсилати в навколишнє середовище достатньо потужний сигнал з певними характеристиками.

Наукова новизна полягає в застосуванні штучних нейронних мереж для визначення координат джерела акустичного сигналу.

Практична цінність полягає в обґрунтуванні того, що різницево-часовий метод з використанням нейронних мереж є оптимальним для визначення координат джерела акустичного сигналу порівняно з іншими розглянутими активними та пасивними методами.

В подальших дослідженнях планується синтез структури системи та програмно-математичних моделей для навчання штучної нейронної мережі.

### Список використаних джерел

- [1] С. О. Козерук, О. І. Нижник, та Н. І. Лисенко, *Акустичні інформаційні системи*. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.
- [2] N. Roman, W. DeLiang, and G. J. Brown, "Speech segregation based on sound localization", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 14, no. 4, p. 2236, July 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/1.1610463>. Accessed on: Aug. 23, 2021.
- [3] F. Papi, D. Tarchi, M. Vespe, F. Oliveri, F. Borghese, G. Aulicino, and A. Vollero, "Radiolocation and tracking of automatic identification system signals for maritime situational awareness", *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 9, no. 5, pp. 568-580, June

2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-rsn.2014.0292>. Accessed on: Aug. 23, 2021.
- [4] D. Byrne, and W. Noble, "Optimizing sound localization with hearing AIDS", *Trends in amplification*, vol. 3, no. 2, pp. 51-73, June 1998. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/108471389800300202>. Accessed on: Sept. 1, 2021.
- [5] S. Cheinet, and Th. Broglin, "Sensitivity of shot detection and localization to environmental propagation", *Applied Acoustics*, vol. 93, pp. 97-105, June 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.01.021>. Accessed on: Dec. 10, 2021.
- [6] Ahrens, K. D. Lund, M. Marschall, and T. Dau, "Sound source localization with varying amount of visual information in virtual reality", *Plos One*, vol. 14, no. 3, March 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214603>. Accessed on: July 1, 2021.
- [7] M. A. Steadman, C. Kim, and J.-H. Lestang, "Short-term effects of sound localization training in virtual reality", *Scientific Reports*, vol. 9, Dec. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54811-w>. Accessed on: Dec. 11, 2021.
- [8] C. Rascon, and I. Meza, "Localization of sound sources in robotics: A review", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 96, pp. 184-210, Oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.07.011>. Accessed on: Jan. 15, 2022.
- [9] Richard Hammond's Big: Volkswagen Mega Factory, season 1, episode 1, m. 29:15, February 2020. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Richard-Hammonds-Big-Season-1/dp/B084NX8FLZ>. Accessed on: Oct. 21, 2021.
- [10] L. Chehami, E. Moulin, J. de Rosny, C. Prada, O. B. Matar, F. Benmeddour, and J. Assaad, "Detection and localization of a defect in a reverberant plate using acoustic field correlation", *Journal of Applied Physics*, American Institute of Physics, vol. 115, pp. 104901-1-7, March 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4867522>. Accessed on: June 1, 2022.
- [11] L. Sun, and Y. Li, "Acoustic emission sound source localization for crack in the pipeline", In *Proc. Chinese Control and Decision Conf.*, 2010, pp. 4298-4301. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CCDC.2010.5498373>. Accessed on: May 15, 2022.
- [12] D. Salvati, C. Drioli, and G. L. Foresti, "Sound source and microphone localization from acoustic impulse responses", in *Proc. IEEE Signal Processing Letters*, vol. 23, no. 10, pp. 1459-1463, Oct. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/LSP.2016.2601878>. Accessed on: Febr. 18, 2022.
- [13] C. Kim, A. Menon, M. Bacchiani, and R. Stern, "Sound source separation using phase difference and reliable mask selection selection", in *Proc. 2018 IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Apr. 2018, pp. 5559-5563. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8462269>. Accessed on: Sept. 1, 2021.
- [14] L. Wang, and A. Cavallaro, "Time-frequency processing for sound source localization from a micro aerial vehicle", in *Proc. 2017 IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, March 2017, pp. 496-500. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2017.7952205>. Accessed on: May 15, 2022.
- [15] Schasse, C. Tendyck, and R. Martin, "Source localization based on the doppler effect", in *Proc. 2012 Int. Workshop on Acoustic Signal Enhancement (IWAENC)*, Sept. 2012, pp. 1-4. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6309397>. Accessed on: Nov. 11, 2021.
- [16] J. Pak, and L. W. Shin, "Sound localization based on phase difference enhancement using deep neural networks", in *Proc. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, May 2019, pp. 1335-1345. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TASLP.2019.2919378>. Accessed on: Dec. 11, 2021.
- [17] M. Ranjkesh, and R. Hasanzadeh, "A fast and accurate sound source localization method using the optimal combination of SRP and TDOA methodologies", *Journal of Information Systems and Telecommunication*, vol. 3, no. 2, pp. 100-108, Apr. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7508/jist.2015.02.005>. Accessed on: Oct. 1, 2021.
- [18] M. Đurković, "Localization, tracking, and separation of sound sources for cognitive

robots", Dissertation, Technische Universität München, Munich, Germany, 2012.

- [19] R. A. Brualdi, *Introductory Combinatorics*, 5<sup>th</sup> ed. Reading, Pearson Prentice Hall, 2010. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/>

### References

- [1] S. O. Kozeruk, O. I. Nyzhnyk, and N. I. Lysenko, *Acoustic information systems*. Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018 [in Ukrainian].
- [2] N. Roman, W. DeLiang, and G. J. Brown, "Speech segregation based on sound localization", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 14, no. 4, p. 2236, July 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/1.1610463>. Accessed on: Aug. 23, 2021.
- [3] F. Papi, D. Tarchi, M. Vespe, F. Oliveri, F. Borghese, G. Aulicino, and A. Vollero, "Radiolocation and tracking of automatic identification system signals for maritime situational awareness", *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 9, no. 5, pp. 568-580, June 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-rsn.2014.0292>. Accessed on: Aug. 23, 2021.
- [4] D. Byrne, and W. Noble, "Optimizing sound localization with hearing AIDS", *Trends in amplification*, vol. 3, no. 2, pp. 51-73, June 1998. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/108471389800300202>. Accessed on: Sept. 1, 2021.
- [5] S. Cheinet, and Th. Broglin, "Sensitivity of shot detection and localization to environmental propagation", *Applied Acoustics*, vol. 93, pp. 97-105, June 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.01.021>. Accessed on: Dec. 10, 2021.
- [6] A. Ahrens, K. D. Lund, M. Marschall, and T. Dau, "Sound source localization with varying amount of visual information in virtual reality", *Plos One*, vol. 14, no. 3, March 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214603>. Accessed on: July 1, 2021.
- [7] M. A. Steadman, C. Kim, and J.-H. Lestang, "Short-term effects of sound localization training in virtual reality", *Scientific Reports*, vol. 9, Dec. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54811-w>. Accessed on: Dec. 11, 2021.
- [8] C. Rascon, and I. Meza, "Localization of sound sources in robotics: A review", *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 96, pp. 184-210, Oct. 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.07.011>. Accessed on: Jan. 15, 2022.
- [9] Richard Hammond's Big: Volkswagen Mega Factory, season 1, episode 1, m. 29:15, February 2020. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Richard-Hammonds-Big-Season-1/dp/B084NX8FLZ>. Accessed on: Oct. 21, 2021.
- [10] L. Chehami, E. Moulin, J. de Rosny, C. Prada, O. B. Matar, F. Benmeddour, and J. Assaad, "Detection and localization of a defect in a reverberant plate using acoustic field correlation", *Journal of Applied Physics*, American Institute of Physics, vol. 115, pp. 104901-1-7, March 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4867522>. Accessed on: June 1, 2022.
- [11] L. Sun, and Y. Li, "Acoustic emission sound source localization for crack in the pipeline", In *Proc. Chinese Control and Decision Conf.*, 2010, pp. 4298-4301. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/CCDC.2010.5498373>. Accessed on: May 15, 2022.
- [12] D. Salvati, C. Drioli, and G. L. Foresti, "Sound source and microphone localization from acoustic impulse responses", in *Proc. IEEE Signal Processing Letters*, vol. 23, no. 10, pp. 1459-1463, Oct. 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/LSP.2016.2601878>. Accessed on: Febr. 18, 2022.
- [13] C. Kim, A. Menon, M. Bacchiani, and R. Stern, "Sound source separation using phase difference and reliable mask selection selection", in *Proc. 2018 IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Apr. 2018, pp. 5559-5563. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8462269>. Accessed on: Sept. 1, 2021.
- [14] L. Wang, and A. Cavallaro, "Time-frequency processing for sound source localization from a micro aerial vehicle", in *Proc. 2017 IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, March 2017, pp. 496-500. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2017.7952205>. Accessed on: May 15, 2022.

- [15] A. Schasse, C. Tendyck, and R. Martin, "Source localization based on the doppler effect", in *Proc. 2012 Int. Workshop on Acoustic Signal Enhancement (IWAENC)*, Sept. 2012, pp. 1-4. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6309397>. Accessed on: Nov. 11, 2021.
- [16] J. Pak, and L. W. Shin, "Sound localization based on phase difference enhancement using deep neural networks", in *Proc. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, May 2019, pp. 1335-1345. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/TASLP.2019.2919378>. Accessed on: Dec. 11, 2021.
- [17] M. Ranjesh, and R. Hasanzadeh, "A fast and accurate sound source localization method using the optimal combination of SRP and TDOA methodologies", *Journal of Information Systems and Telecommunication*, vol. 3, no. 2, pp. 100-108, Apr. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.7508/jist.2015.02.005>. Accessed on: Oct. 1, 2021.
- [18] M. Đurković, "Localization, tracking, and separation of sound sources for cognitive robots", Dissertation, Technische Universität München, Munich, Germany, 2012.
- [19] R. A. Brualdi, *Introductory Combinatorics*, 5<sup>th</sup> ed. Reading, Pearson Prentice Hall, 2010. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/>

**S. I. Artemuk**, *Ph. D. student*,

e-mail: [serhii.i.artemuk@lpnu.ua](mailto:serhii.i.artemuk@lpnu.ua)

**I. P. Mykytyn**, *Dr. Sc., Professor*

e-mail: [mykytynip@ukr.net](mailto:mykytynip@ukr.net)

Lviv Polytechnic National University

Stepan Bandera St, 12, Lviv, 79000, Ukraine

## METHODS OF DETERMINING THE COORDINATES OF THE ACOUSTIC SIGNAL SOURCE

*The article carries out a literature review and investigates the existing methods of determining the coordinates of the location of the acoustic signal source. The advantages and disadvantages of passive and active methods given in the article are highlighted. These methods can be used in aviation, cosmonautics, mechanical engineering and other fields of science and technology, where measurements are used, and are designed to determine the coordinates of the acoustic signal source. Recently, there has been a growing interest in using neural networks to solve various problems and their application in various fields. With the help of artificial neural networks, it is possible to process, analyze and summarize information. The authors of the article have compared the method of determining the coordinates of the location of the acoustic signal source using an artificial neural network with existing methods. In this method, the presence of a signal from the acoustic signal source at the reception points is determined by receiving and registering the signal at spatially separated points with known coordinates and further determining the difference in signal propagation times from the source to the signal reception points. The presence of a signal is determined by the middle of the area of the received signal. The number of signal reception points is set at the training stage of the artificial neural network according to the minimum error criterion in determining the coordinates of the acoustic signal source. The time differences of signal propagation from the source to the signal reception points are determined between all reception points, which are located in an orderly or random manner, and these time differences are fed to the input of a previously trained artificial neural network, at the output of which the coordinates of the acoustic signal source are obtained. The application of this method allows to determine the coordinates of the acoustic signal source without having prior information about the distance to the acoustic signal source or any other characteristics of the object, to determine the coordinates of non-periodic signals, to simplify the process of measuring time intervals and calculating coordinates.*

**Keywords:** *determination of coordinates, acoustic signals, minimum method, maximum method, radiolocation, direction finding, artificial neural network, deep learning, sound.*

[0000-0002-2373-2429] **Є. П. Кириченко**<sup>1</sup>,  
e-mail: kyrychenkojp@gmail.com  
[0000-0003-2277-7972] **В. М. Гвоздь**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, професор,  
e-mail: chipb@dsns.gov.ua  
[0000-0002-0240-1807] **О. В. Кириченко**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, професор,  
e-mail: okskir@meta.ua  
[0000-0002-9479-669X] **В. О. Ковбаса**<sup>1</sup>,  
e-mail: victory101@ukr.net  
[0000-0003-0722-9353] **В. А. Ващенко**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, професор,  
e-mail: v.vaschenko@chdtu.edu.ua  
[0000-0003-3065-5772] **Т. І. Бутенко**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент,  
e-mail: but82016@gmail.com  
[0000-0002-2805-572X] **В. В. Цибулін**<sup>2</sup>  
e-mail: tsybulin22@gmail.com

<sup>1</sup>Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України,  
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

<sup>2</sup>Черкаський державний технологічний університет,  
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

## ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ СУМІШЕЙ ШЛЯХОМ ВВЕДЕННЯ ДОБАВОК ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

*Встановлено широкий клас органічних речовин, введення яких у вигляді невеликих добавок (до 10 %) у склад піротехнічних сумішей на основі порошків металевих палих та окиснювачів приводить до зменшення швидкості та підвищення стійкості процесу їх горіння до зовнішніх впливів (підвищені температури нагріву, зовнішні тиски) для різних діапазонів зміни технологічних параметрів сумішей (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення). Зі зменшенням коефіцієнта надлишку окиснювача у суміші залежність швидкості горіння від величини добавки підсилюється, незалежно від її дисперсності. Добавки стеарину та тіоколу у суміші  $Al + NaNO_3$  та  $Zr + NaNO_3$ , навпаки, призводять до збільшення швидкості горіння цих сумішей, що обумовлено підвищенням реакційної здатності  $Al$  та  $Zr$  у присутності газоподібних продуктів розкладання стеарину та тіоколу при підвищених температурах нагріву, які сприяють різкому зниженню температури займання частинок металевих палих та призводять до зниження стійкості процесу розвитку горіння сумішей, особливо в умовах підвищених зовнішніх тисків (збільшення показника  $\nu$  в законі горіння зі зростанням величини добавки).*

**Ключові слова:** піротехнічні суміші, органічні речовини, швидкість горіння, стійкість процесу горіння, зовнішні впливи.

**Вступ.** З кожним роком в Україні та у світі зростає кількість пожеж і вибухів в умовах зберігання, транспортування та застосування загальнопромислових піротехнічних виробів, які спричиняють руйнування об'єктів, людські жертви та завдають значних матеріальних збитків [1]. Аналіз зазначених випадків показує, що загорянню і подальшому пожежонебезпечному руйнуванню виробів, як правило, передують зовнішні термічні дії, яким вони піддаються, наприклад, при пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, в умовах їх транспортування при займанні близько розташованих об'єктів, а

також під час пострілу та польоту виробів в умовах їх запуску тощо. Це призводить до передчасного займання і вибухонебезпечного розвитку горіння зарядів на основі ущільнених сумішей з порошків окиснювачів (нітратів лужних та лужноземельних металів, фторопластів, оксидів металів та ін.) і металевих палих ( $Al$ ,  $Mg$ ,  $Ti$ ,  $Zr$  та ін.), що входять до складу виробів, та подальших пожежонебезпечних руйнувань.

Тому суттєвого практичного значення набуває попередження вимушених пожежонебезпечних руйнувань виробів у разі впливу зовнішніх термічних дій. Методи попере-

дження мають ґрунтуватися на дослідженнях процесів розвитку горіння зарядів піротехнічних сумішей у різних зовнішніх умовах.

Нині питання впливу різних технологічних параметрів (співвідношення компонентів та їх дисперсності, коефіцієнта ущільнення та ін.) і зовнішніх умов (температур нагріву, зовнішніх тисків тощо) на процеси розвитку горіння зазначених двокомпонентних піротехнічних сумішей достатньо досліджені [2-9]: встановлено закономірності їх впливу на швидкість горіння; визначено діапазони зміни параметрів для різних зовнішніх умов, у межах яких спостерігається стійкий вибухобезпечний розвиток процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. Однак відсутні систематизовані дослідження впливу на процес горіння зазначених сумішей добавок різних органічних речовин, які, як показують окремі дослідження для добавок парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену [9-17], сприяють не тільки покращенню технології виготовлення їх зарядів, а й приводять до уповільнення процесу горіння сумішей з подальшою його стабілізацією.

**Мета та задачі досліджень.** *Мета роботи:* встановлення закономірностей впливу добавок різних органічних речовин у склад піротехнічних сумішей з порошоків окиснювачів та металевих палих на швидкість та стійкість процесу розвитку їх горіння.

Задачами досліджень є:

- визначення сукупності добавок органічних речовин, що приводять до зниження швидкості горіння сумішей та підвищення стійкості процесу їх горіння для різних технологічних параметрів та зовнішніх умов;
- встановлення добавок органічних речовин, введення яких у суміші може призводити до зростання швидкості та зниження стійкості процесу розвитку їх горіння в умовах зовнішніх дій (підвищені температури нагріву, зовнішні тиски).

**Виклад основного матеріалу.** Зразки піротехнічних сумішей виготовлялися з використанням стандартних методів пресування порошоків окиснювачів (нітрати лужних та лужноземельних металів ( $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Sr(NO}_3)_2$ ,  $\text{Ba(NO}_3)_2$  та ін.), фторопласти (Ф-3 та ін.), оксиди металів ( $\text{MnO}_2$ ,  $\text{BaO}_2$  та ін.) та металевих палих (Mg, Al, Ti, Zr та ін.) з добавками органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, тіоколу, уротропіну, метальдегіду, гексогену, каніфолі та ін.) [7, 8]. Співвідношення компонентів у сумішах ха-

рактеризується коефіцієнтом надлишку окиснювача  $\alpha$ , їх густина – коефіцієнтом ущільнення  $K_y$ , а дисперсність використовуваних промисловістю порошоків окиснювачів та металевих палих – середніми розмірами частинок окиснювачів  $d_{ок}$  (мкм) та металевих палих  $d_m$  (мкм), які розраховувалися за прийнятими у піротехнічній промисловості методиками.

Середнє значення швидкості горіння сумішей визначалося за формулою  $u = \frac{h}{\tau}$  ( $h$  – висота зразка, м;  $\tau$  – середній час згоряння зразка, с); при цьому відносна похибка вимірювання  $u$  не перевищувала 5...7 %. Експериментальні криві будувалися з використанням сучасних методів регресійного та кореляційного аналізів.

**Результати досліджень.** У результаті проведених досліджень встановлено, що у випадку суміші Mg +  $\text{NaNO}_3$  усі вивчені добавки органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену) приводять тільки до зменшення швидкості горіння. При одному й тому ж значенні  $\alpha$  та вмісті добавки  $\varepsilon$  ефективність зниження швидкості горіння зростає у ряду нафталін – парафін – антрацен – стеарин (рис. 1). При цьому найбільш сильно на залежність  $u = f(\varepsilon)$  впливає коефіцієнт надлишку окиснювача. Так, на прикладі суміші з добавкою нафталіну видно, що зі зменшенням  $\alpha$  залежність  $u = f(\varepsilon)$  підсилюється. Дисперсність добавки нафталіну на її ефективності практично не позначається (таблиця 1). Крім цього, введення у суміші Mg +  $\text{NaNO}_3$  добавок органічних речовин у деяких випадках призводить також до зміни характеру залежності швидкості горіння від параметрів вихідної суміші та зовнішніх умов (таблиця 2, рисунки 2, 3). Особливість впливу стеарину на різке зменшення швидкості горіння сумішей Mg +  $\text{NaNO}_3$  може бути пов'язана з тим, що  $\text{CO}_2$ , CO та  $\text{H}_2\text{O}$ , які виділяються при розкладанні стеарину [2], здатні окиснювати Mg ще до початку розкладання  $\text{NaNO}_3$  з утворенням на його поверхні товстої оксидної плівки, що погіршує взаємодію Mg з киснем. Результати дослідження окиснення Mg у вуглекислому газі при розкладанні  $\text{NaNO}_3$  [4] показали, що процес підпорядковується лінійному закону й енергія активації дорівнює 155,5 кДж/моль, тоді як енергія активації окиснення у кисні та у повітрі дорівнює 211,4 кДж/моль. Порівняння енергій активації показує, що швидкість окиснення Mg у вуглекислому газі може бути навіть вищою, ніж у кисні та у повітрі.

Таблиця 1. Значення швидкості горіння  $u$  ( $10^{-3}$  м/с) суміші 65 % МПФ-4 + 25 %  $\text{NaNO}_3$  + 10 % нафталіну для різної дисперсності органічної добавки (при атмосферному тиску)

| Розмір частинок нафталіну, мкм | $K_Y = 0,9$ | $K_Y = 0,8$ |
|--------------------------------|-------------|-------------|
| 450 та більше                  | 14          | 16          |
| 250...450                      | 14          | 17          |
| 150...250                      | 14          | 16          |

Примітка.  $d_{ок} \leq 280$  мкм;  $T_0 = 293$  К; діаметр зразків – 0,145 м; висота – 0,230 м; оболонка паперова;  $K_Y = 0,94$ .

Таблиця 2. Залежність швидкості горіння сумішей  $\text{NaNO}_3$  + МПФ-4 + органічна добавка від параметрів вихідної суміші та зовнішніх умов

| Добавка  | Вміст добавок, % (понад 100 %) | $\alpha$ вихідної суміші | Діапазон зміни тиску | Закон швидкості горіння ( $u$ , $10^{-3}$ м/с) |
|----------|--------------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------------------------------|
| Нафталін | 10                             | 0,35                     | 0,1...1,0 МПа        | $u = 14,7\bar{P}^{0,13}$                       |
|          | 20                             | 0,38                     | 0,1...1,0 МПа        | $u = 11,7\bar{P}^{0,12}$                       |
|          | 40                             | 0,85                     | 0,1...1,0 МПа        | $u = 5,9\bar{P}^{0,23}$                        |
| Парафін  | 10                             | 0,35                     | 0,1...1,0 МПа        | $u = 14,2\bar{P}^{0,22}$                       |
|          | 35                             | 0,54                     | 0,1...1,0 МПа        | $u = 7,3\bar{P}^{0,27}$                        |
| Стеарин  | 5                              | 1,1                      | 13,3...101 кПа       | $u = 0,2\bar{P}^{0,34}$                        |
|          | 10                             | 0,35                     | 13,3...101 кПа       | $u = 0,4\bar{P}^{0,54}$                        |

Примітка.  $\bar{P} = \frac{P}{P_a}$  ( $P$  – поточний тиск,  $P_a$  – атмосферний тиск);  $d_{ок} \leq 280$  мкм;  $T_0 = 293$  К; діаметр зразків –  $1,8 \cdot 10^{-2}$  м; висота зразків –  $5,5 \cdot 10^{-2}$  м; оболонка металева;  $K_Y = 0,98$ .

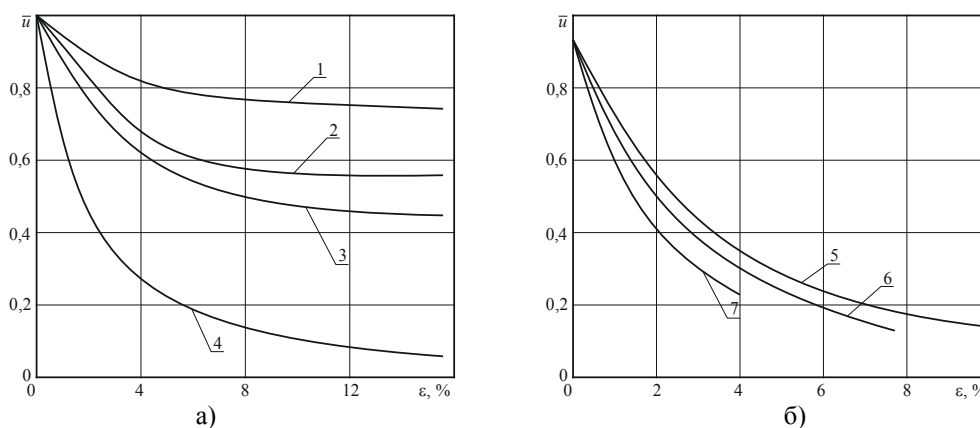


Рисунок 1. Залежність відносної швидкості горіння  $\bar{u}$  ( $\bar{u} = \frac{u}{u_0}$ , де  $u_0 = u|_{\epsilon=0}$ ) суміші  $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$  при атмосферному тиску від масової частки органічної добавки ( $K_Y = 0,9$ ; МПФ-4;  $d_m = 74,5$  мкм;  $d_{ок} = 100...140$  мкм;  $T_0 = 293$  К):  
а) нафталіну (1), парафіну (2), антрацену (3), стеарину (4) при  $\alpha = 0,3$ ;  
б) нафталіну при  $\alpha = 0,7$  (5),  $0,37$  (6),  $0,21$  (7)

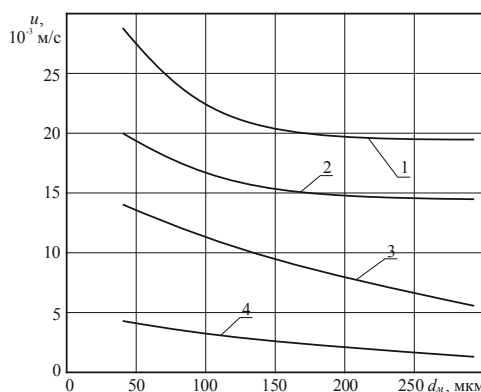
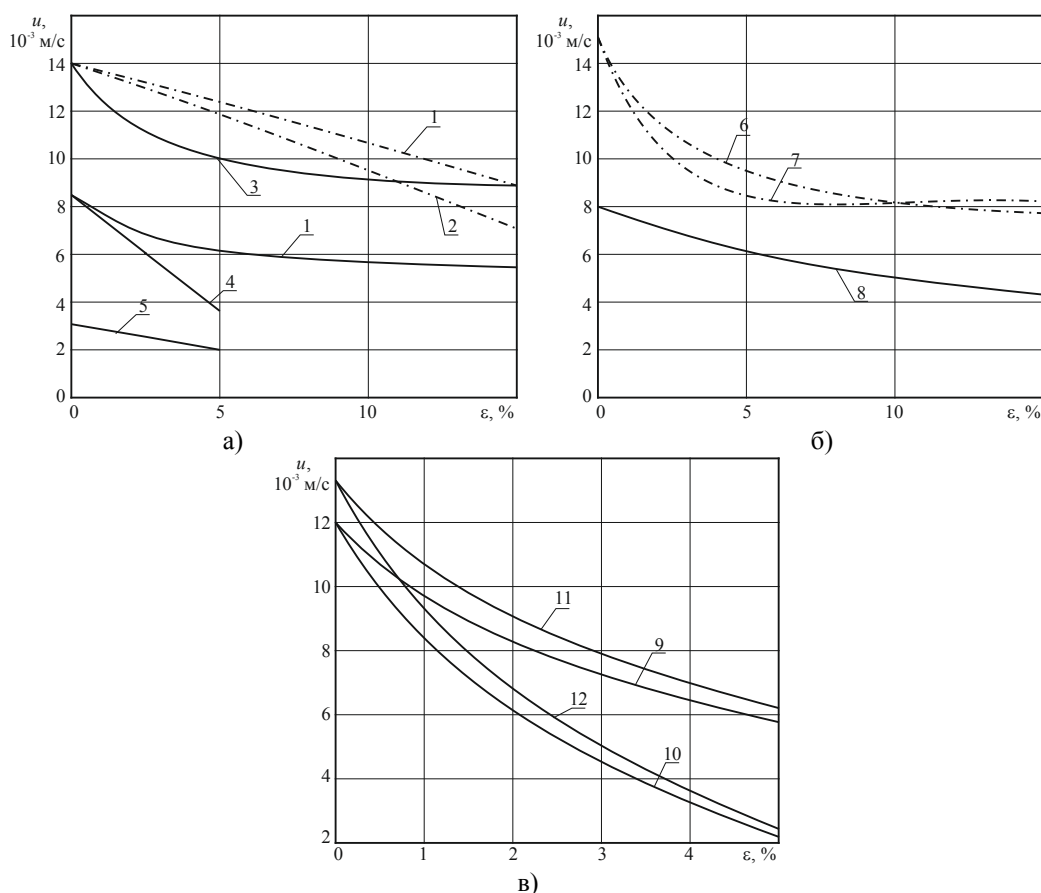


Рисунок 2. Вплив добавки парафіну на залежність швидкості горіння суміші  $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$  від дисперсності порошку  $\text{Mg}$  ( $\alpha = 1,0$ ;  $d_{ок} = 250$  мкм;  $K_Y = 0,8$ ):  
1 – без добавки; 2–5 % добавки; 3–10 % добавки; 4–15 % добавки



**Рисунок 3. Вплив співвідношення компонентів у суміші  $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$  на залежність швидкості горіння від масової частки органічної добавки ( $K_y = 0,9$ ; МПФ-2;  $d_m = 182 \text{ мкм}$ ;  $d_{ок} = 250 \text{ мкм}$ ):**

а) уротропін (1); метальдегід (2); гексоген (3); каніфоль (4); ідитол (5)

(— — суміш 58,3 %  $\text{NaNO}_3$  + 41,7 % МПФ-2; - - - - суміш 40 %  $\text{NaNO}_3$  + 60 % МПФ-2;

б) паранітробензолдегід (6); ПДМАБ (7); гексахлорбензол (8)

(— — суміш 58,3 %  $\text{NaNO}_3$  + 41,7 % МПФ-2; - - - - суміш 40 %  $\text{NaNO}_3$  + 60 % МПФ-2;

в) стехіометрична суміш  $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$  з добавкою ідиолу (9) ( $d_m = 94 \text{ мкм}$ ;  $d_{ок} = 260 \text{ мкм}$ );

стеарину (10) ( $d_m = 94 \text{ мкм}$ ;  $d_{ок} = 260 \text{ мкм}$ ); ідиолу (11) ( $d_m = 94 \text{ мкм}$ ;  $d_{ок} = 54 \text{ мкм}$ );

стеарину (12) ( $d_m = 94 \text{ мкм}$ ;  $d_{ок} = 54 \text{ мкм}$ )

**Обговорення результатів.** Встановлено, що, на відміну від суміші  $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ , добавки стеарину у суміш  $\text{Ti} + \text{NaNO}_3$  впливають на швидкість горіння значно слабше. Це можна пов'язати з відсутністю хімічних реакцій між  $\text{CO}_2$  та  $\text{Ti}$  аж до 973 К. Крім цього, добавки стеарину у суміш  $\text{Zr} + \text{NaNO}_3$ , навпаки, можуть викликати зростання швидкості горіння.

Аномальне збільшення швидкості горіння сумішей при введенні добавки стеарину обумовлене підвищенням реакційної здатності  $\text{Zr}$  у присутності газоподібних продуктів розкладання стеарину, що сприяють різкому зниженню температури його займання. Таким чином, природа металевих пального помітно змінює характер впливу органічних добавок на швидкість горіння.

Результати експериментальних досліджень щодо впливу добавок органічних речовин на швидкість горіння інших сумішей металевих палив (магнію та титану) з окиснювачами (нітратами стронцію та барію, перекисами марганцю та барію, фторопластами) наведено у таблиці 3 і на рисунках 4–7. З цих даних видно, що органічні добавки можуть істотно впливати не тільки на величину швидкості горіння, але й на характер її залежностей від різних параметрів. За дією на швидкість горіння суміші  $\text{Mg}$  з Ф-3 органічні добавки можуть бути розташовані в ряд: стеаринова кислота, себацінова кислота, сечовина, уротропін, фталева кислота, нітрогуанідин, парафін. При цьому для парафіну спостерігається суттєва залежність від вмісту добавки  $\varepsilon$ : при  $\varepsilon \leq 8,5 \%$  він за ефективністю останній у за-

значеному ряду; при  $\varepsilon > 8,5\%$  його ефективність різко зростає. Добавки органічних речовин у суміші Mg з Ф-3 різко послаблюють залежність швидкості горіння від тиску, причому у деяких випадках реалізується закон горіння з  $\nu = 0$ . Цікаво відзначити, що органіч-

ні добавки (парафін, стеарин, антрацен та нафталін) зазвичай приводять до зниження швидкості горіння сумішей Al +  $\text{NaNO}_3$ , а добавки тіоколу в тих же кількостях, навпаки, можуть призводити до підвищення швидкості горіння.

Таблиця 3. Значення швидкості горіння  $u$  ( $10^{-3}$  м/с) нітратно-титанових сумішей з різними органічними добавками (масова частка добавки  $\varepsilon = 0,06$ ; тиск атмосферний)

| Добавка             | $\text{NaNO}_3 + \text{Ti}$ |             |             |             | $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + \text{Ti}$ |             |             |             |
|---------------------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|----------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                     | Ti – 41 %                   |             | Ti – 59 %   |             | Ti – 32 %                              |             | Ti – 52 %   |             |
|                     | $K_y = 0,7$                 | $K_y = 0,9$ | $K_y = 0,7$ | $K_y = 0,9$ | $K_y = 0,7$                            | $K_y = 0,9$ | $K_y = 0,7$ | $K_y = 0,9$ |
| Без добавки         | 11,8                        | 7,2         | 18,1        | 12,8        | 12,3                                   | 10,3        | 24,0        | 20,8        |
| Смола 214           | 8,5                         | 5,9         | 12,0        | 9,7         | 8,9                                    | 7,1         | 13,6        | 11,7        |
| Ідитол              | 6,7                         | 5,6         | 11,4        | 7,9         | 7,4                                    | 6,2         | 11,7        | 10,1        |
| Нітроплівка         | 9,6                         | 7,2         | 14,1        | 10,1        | 10,7                                   | 8,9         | 15,3        | 13,8        |
| Тіокол              | 6,8                         | 4,9         | 10,2        | 7,4         | 6,6                                    | 6,7         | 10,1        | 7,3         |
| Бутилкаучук         | 5,9                         | 4,6         | 8,9         | 6,3         | 6,2                                    | 5,4         | 10,4        | 7,6         |
| Уротропін           | 4,8                         | 3,4         | 7,2         | 5,9         | 5,4                                    | 4,3         | 9,1         | 7,9         |
| Полівінілхлорид     | 6,3                         | 4,8         | 8,3         | 6,4         | 7,1                                    | 5,6         | 10,7        | 8,8         |
| Гексахлорпарахлорид | 6,9                         | 4,7         | 7,1         | 5,1         | 7,6                                    | 6,1         | 11,2        | 8,5         |
| Пентахлорфенол      | 4,2                         | 3,3         | 6,2         | 5,9         | 5,3                                    | 4,1         | 7,3         | 6,1         |
| Фторопласт 32 – Л   | 6,8                         | 5,4         | 8,5         | 7,0         | 8,8                                    | 7,2         | 14,7        | 12,0        |
| Фторкаучук СКФ – 32 | 5,9                         | 4,6         | 7,7         | 6,7         | 8,1                                    | 6,7         | 12,7        | 10,9        |

Примітка. Питома поверхня порошку титана (ПТМ)  $S_{\text{птт}} = 222 \text{ м}^2/\text{кг}$ ;  $d_{\text{ок}} \leq 250 \text{ мкм}$ ;  $T_0 = 293 \text{ К}$ ; діаметр зразків –  $2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ; висота зразків –  $2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ; оболонка паперова.

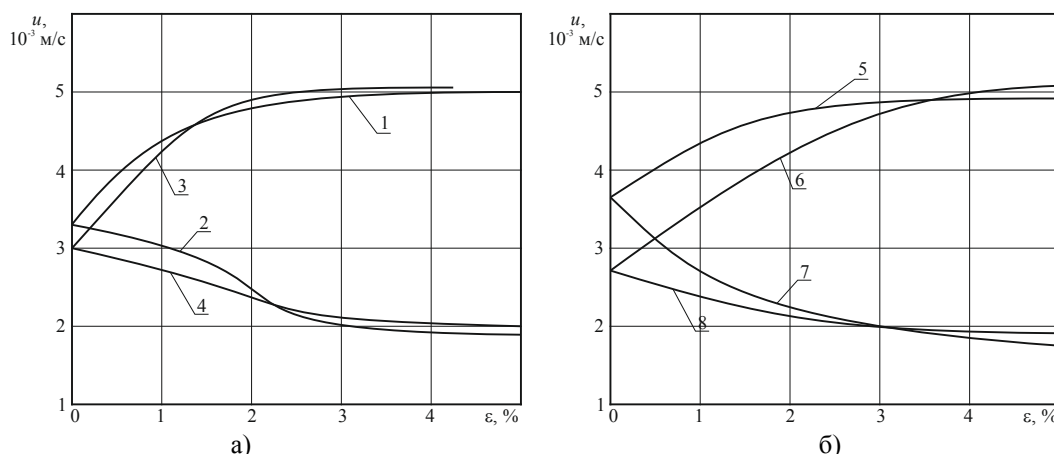


Рисунок 4. Залежності швидкості горіння стехіометричних сумішей Mg +  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  (а) та Mg +  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  (б) від масової частки органічної добавки ( $K_y = 0,9$ ;  $d_m = 94 \text{ мкм}$ ; оболонка паперова):

- а) суміш Mg +  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  + ідитол (1) ( $d_{\text{ок}} = 260 \text{ мкм}$ ); суміш Mg +  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  + стеарин (2) ( $d_{\text{ок}} = 260 \text{ мкм}$ ); суміш Mg +  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  + ідитол (3) ( $d_{\text{ок}} = 54 \text{ мкм}$ ); суміш Mg +  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  + стеарин (4) ( $d_{\text{ок}} = 54 \text{ мкм}$ );  
 б) суміш Mg +  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  + ідитол (5) ( $d_{\text{ок}} = 260 \text{ мкм}$ ); суміш Mg +  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  + ідитол (6) ( $d_{\text{ок}} = 54 \text{ мкм}$ ); суміш Mg +  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  + стеарин (7) ( $d_{\text{ок}} = 260 \text{ мкм}$ ); суміш Mg +  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  + стеарин (8) ( $d_{\text{ок}} = 54 \text{ мкм}$ )

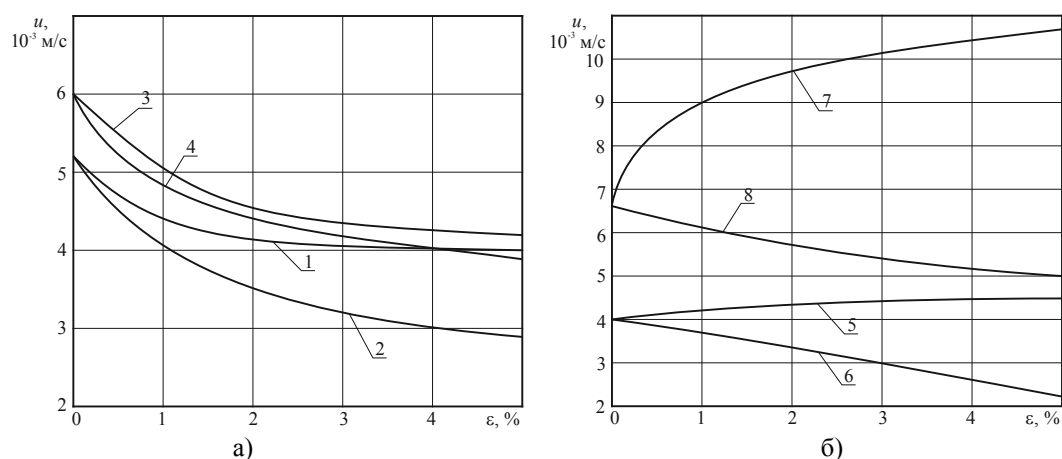


Рисунок 5. Залежності швидкості горіння стехіометричних сумішей  $\text{Mg} + \text{MnO}_2$  (а) та  $\text{Mg} + \text{BaO}_2$  (б) від масової частки органічної добавки ( $K_y = 0,9$ ;  $d_m = 94$  мкм):

- а) суміш  $\text{Mg} + \text{MnO}_2$  + ідитол (1) ( $d_{ок} = 260$  мкм); суміш  $\text{Mg} + \text{MnO}_2$  + стеарин (2) ( $d_{ок} = 260$  мкм); суміш  $\text{Mg} + \text{MnO}_2$  + ідитол (3) ( $d_{ок} = 54$  мкм); суміш  $\text{Mg} + \text{MnO}_2$  + стеарин (4) ( $d_{ок} = 54$  мкм);  
 б) суміш  $\text{Mg} + \text{BaO}_2$  + ідитол (5) ( $d_{ок} = 260$  мкм); суміш  $\text{Mg} + \text{BaO}_2$  + стеарин (6) ( $d_{ок} = 260$  мкм); суміш  $\text{Mg} + \text{BaO}_2$  + ідитол (7) ( $d_{ок} = 54$  мкм); суміш  $\text{Mg} + \text{BaO}_2$  + стеарин (8) ( $d_{ок} = 54$  мкм)

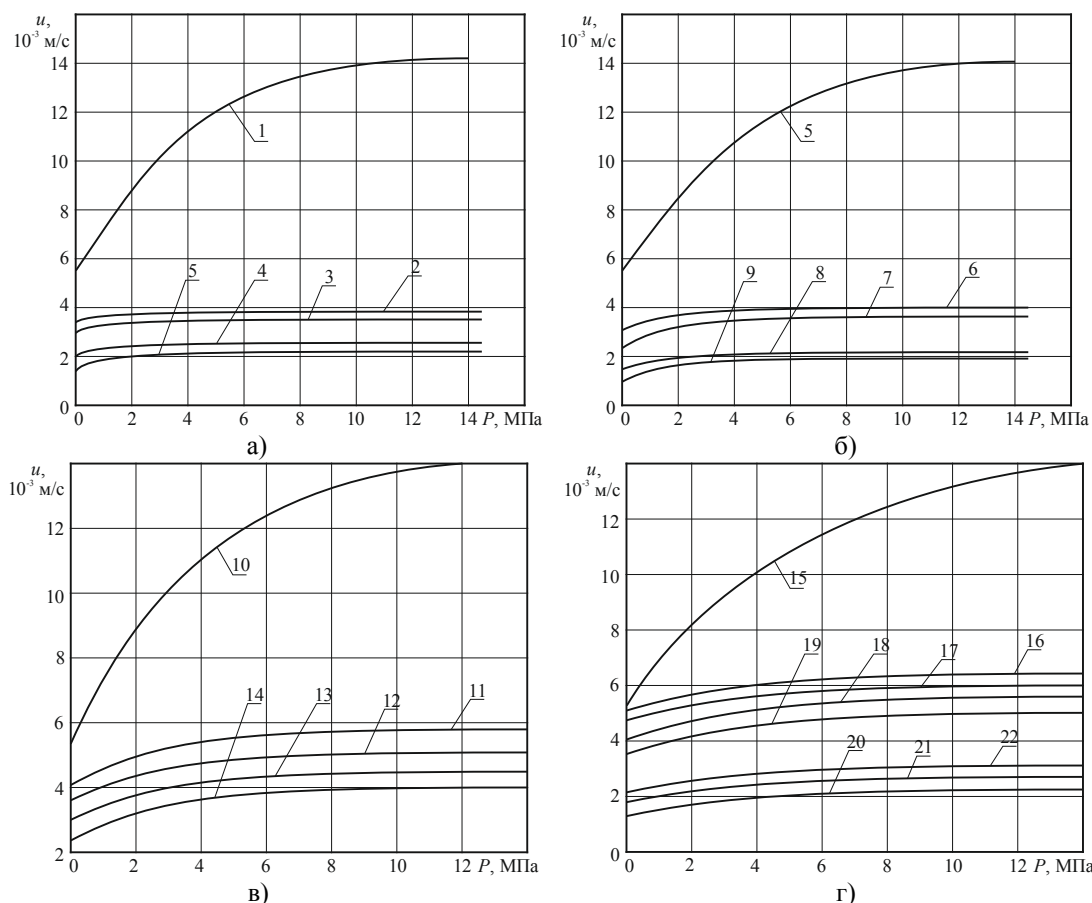
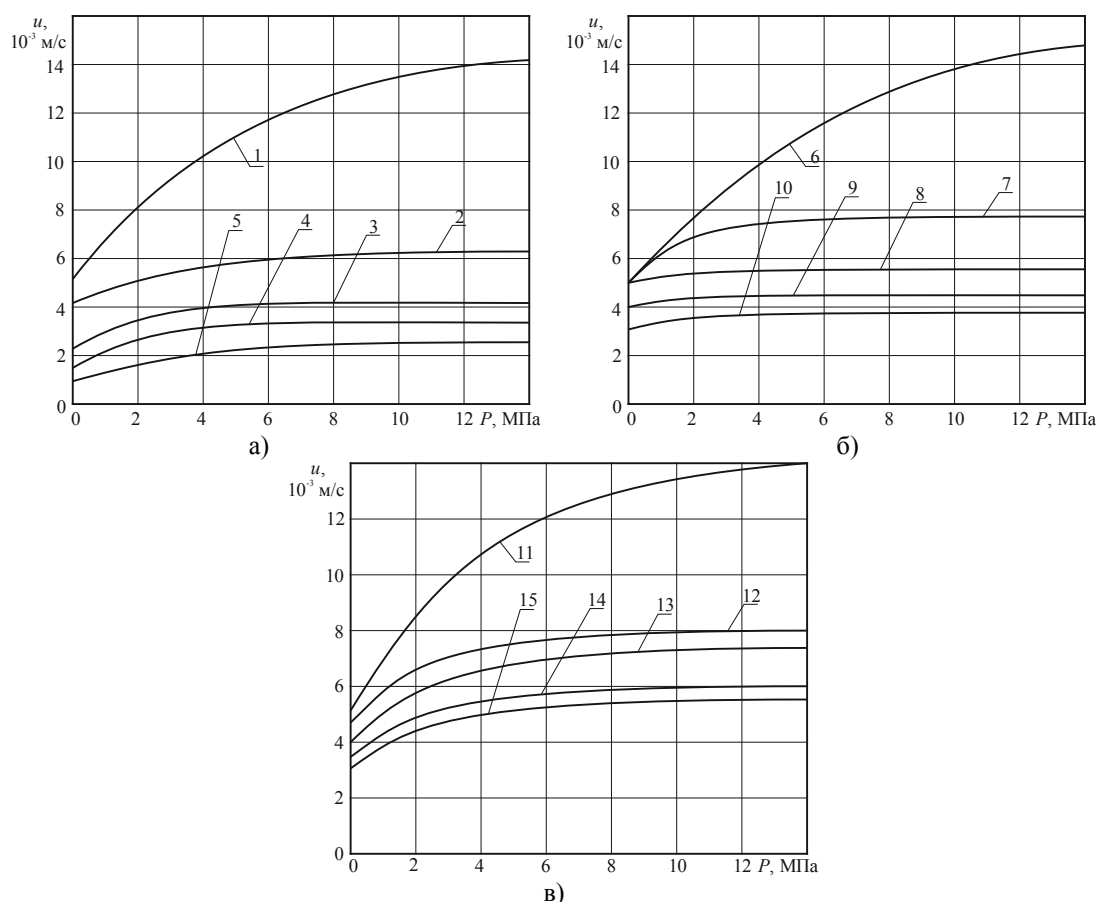


Рисунок 6. Залежності швидкості горіння суміші 75 % МПФ-3 + 25 % Ф-3 від зовнішнього тиску при різному вмісті органічної добавки ( $K_y = 0,9$ ;  $d_m = 135$  мкм):

- а) відносний вміст епоксидної смоли ЕД-5:  $\varepsilon = 0$  (1);  $\varepsilon = 0,05$  (2);  $\varepsilon = 0,07$  (3);  $\varepsilon = 0,1$  (4);  $\varepsilon = 0,13$  (5);  
 б) відносний вміст каучуку СКН-10-1:  $\varepsilon = 0$  (6);  $\varepsilon = 0,05$  (7);  $\varepsilon = 0,07$  (8);  $\varepsilon = 0,1$  (9);  $\varepsilon = 0,13$  (10);  
 в) відносний вміст тіоколу:  $\varepsilon = 0$  (11);  $\varepsilon = 0,05$  (12);  $\varepsilon = 0,07$  (13);  $\varepsilon = 0,1$  (14);  $\varepsilon = 0,13$  (15);  
 г) відносний вміст добавок:  $\varepsilon = 0$  (16);  $\varepsilon = 0,05$  ПГН (17);  $\varepsilon = 0,07$  ПГН (18);  $\varepsilon = 0,1$  ПГН (19);  $\varepsilon = 0,13$  ПГН (20);  $\varepsilon = 0,07$  П-9 (21);  $\varepsilon = 0,1$  П-9 (22);  $\varepsilon = 0,13$  П-9 (23)



**Рисунок 7. Вплив вмісту стеарину (а), парафіну (б) та уротропіну (в) суміші 75 % МПФ-3 + 25 % Ф-3 на залежність швидкості горіння від зовнішнього тиску ( $K_y = 0,9$ ;  $d_m = 135$  мкм):**

- а)  $\varepsilon = 0$  (1);  $\varepsilon = 0,05$  (2);  $\varepsilon = 0,07$  (3);  $\varepsilon = 0,1$  (4);  $\varepsilon = 0,13$  (5);  
 б)  $\varepsilon = 0$  (6);  $\varepsilon = 0,05$  (7);  $\varepsilon = 0,07$  (8);  $\varepsilon = 0,1$  (9);  $\varepsilon = 0,13$  (10);  
 в)  $\varepsilon = 0$  (11);  $\varepsilon = 0,05$  (12);  $\varepsilon = 0,07$  (13);  $\varepsilon = 0,1$  (14);  $\varepsilon = 0,13$  (15)

**Висновки.** На основі проведених експериментальних досліджень закономірностей впливу широкого класу добавок органічних речовин на швидкість горіння піротехнічних сумішей на основі порошків окиснювачів та металевих палив отримано такі нові результати:

1. При введенні у склад сумішей з порошків металевих палив та окиснювачів більшості з досліджених добавок органічних речовин (нафталін, парафін, антрацен, уротропін, метальдегід, гексоген, каніфоль, ідитол, паранітробензолдегід, ПДМАБ, гексахлорбензол, епоксидна смола ЕД-5, каучук СКН-10-1, ПГН, П-9, сечовина, фталева кислота, нітрогуанідин, смола 214, нітроплівка, тіокол, бутилкаучук, полівінілхлорид, гексахлорпарахлорол, пентахлорфенол, фторопласт 32-Л, фторкаучук СКФ-32), що використовуються у піротехнічному виробництві, відбувається зниження швидкості горіння та підвищення стійкості

процесу горіння в умовах зовнішніх впливів. При цьому зі зменшенням коефіцієнта надлишку окиснювача у суміші залежність швидкості горіння від величини добавки підсилюється, незалежно від її дисперсності. У деяких випадках змінюється характер залежності швидкості горіння від параметрів вихідної суміші (коефіцієнта ущільнення, дисперсності металевих палив) та зовнішніх чинників (температури нагріву, зовнішнього тиску).

2. Добавки стеарину та тіоколу у суміші  $Al + NaNO_3$  та  $Zr + NaNO_3$ , навпаки, призводять до збільшення швидкості горіння цих сумішей, що обумовлено підвищенням реакційної здатності  $Al$  та  $Zr$  у присутності газоподібних продуктів розкладання стеарину та тіоколу при підвищених температурах нагріву, які сприяють різкому зниженню температури займання частинок металевих палив та призводять до зниження стійкості процесу розвитку горіння сумішей, особливо в умовах

підвищених зовнішніх тисків (збільшення показника  $\nu$  в законі горіння зі зростанням величини добавки).

**Перспективи подальших досліджень.** Надалі планується проведення досліджень щодо регулювання швидкості горіння піротехнічних металізованих сумішей шляхом введення у їх склад добавок неорганічних речовин (наприклад оксидів металів, фторидів металів та ін.), які можуть бути інгібіторами та каталізаторами горіння зазначених сумішей, роблячи суттєвий вплив на час згорання та, в кінцевому підсумку, на час дії піротехнічних виробів різного призначення в умовах бойового застосування.

### Список використаних джерел

- [1] Звіт про науково-дослідну роботу "Дослідження тенденцій і закономірностей динаміки основних показників статистики пожеж в Україні за територіальним принципом", УкрНДІЦЗ, Київ, 2018.
- [2] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, and S. O. Kolinko, "Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels", *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, no. 2 (8), pp. 81-85, 2019.
- [3] 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.
- [4] О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, та В. А. Ващенко, "Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій", *Internauka*, № 5/5799, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.internauka.com>
- [5] 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.internauka.com>
- [6] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, "Вплив технологічних параметрів на залежності швидкості розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей", на *XI Міжнар. наук.-практ. конф. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*, Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2020.
- [7] Р. Б. Мотрічук та ін., "Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру та склад продуктів згорання піротехнічних нітратно-металевих сумішей", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 131-142, 2020.
- [8] Є. П. Кириченко, В. М. Гвоздь, В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, О. О. Дядюшенко, та В. П. Мельник, "Закономірності впливу технологічних параметрів і зовнішніх чинників на температуру займання та час згорання частинок магнію та алюмінію в продуктах розкладання оксидів металів", *Цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (12), с. 112-122, 2021.
- [9] Є. П. Кириченко, "Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах пострілу та польоту", *Пожежна безпека: теорія і практика: зб. наук. праць ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля*, т. 5, № 2, с. 87-102, 2021.
- [10] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, and O. L. Mirus, "Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5 (95), pp. 68-76, 2018.
- [11] В. М. Фатєєв, Ю. П. Приходько, та Л. І. Таборов, *Піротехніка*. Київ, Україна: Наук. думка, 2017.
- [12] В. М. Баланюк, Н. М. Козяр, та О. І. Гарасим'юк, "Застосування газозаерозольно-порошкових вогнегасних сумішей для захисту від запалювальних сумішей", *Science Rise*, № 2 (22), с. 11-14, 2016.
- [13] В. М. Марич, В. В. Ковалишин, та Я. Б. Кирилів, "Оптимізація складу вогнегасних порошків для гасіння магнію", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*, Черкаси, 2018.
- [14] В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Т. М. Войтович, та Б. М. Гусар, "Використання еко-

- логічно прийнятних вогнегасних речовин", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи*, ДУБЖД, 2018.
- [15] В. М. Марич, В. В. Ковалишин, та Я. Б. Кирилів, "Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошків для гасіння магнію та його сплавів", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*, Черкаси, 2017.
- [16] 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.
- [17] О. В. Кириченко та ін., "Визначення критичних режимів розвитку процесів горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 123-133, 2020.
- ### References
- [1] Report on research work "Study of trends and patterns of dynamics of the main indicators of fire statistics in Ukraine on a territorial basis", UkrNDICZ, Kyiv, 2018 [in Ukrainian].
- [2] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, and S. O. Kolinko, "Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels", *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, no. 2 (8), pp. 81-85, 2019.
- [3] O. V. Kirichenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, E. 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].
- [4] O. S. Dibrova, O. V. Kirichenko, R. B. Motrichuk, and V. A. Vashchenko, "Improving fire safety of pyrotechnic nitrate-metal mixtures in the conditions of external thermal actions", *Internauka*, no. 5/5799, 2020 [Online]. Available: <http://www.inter-nauka.com> [in Ukrainian].
- [5] 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].
- [6] O. V. Kirichenko, O. S. Dibrova, and R. B. Motrichuk, "Influence of technological parameters on the dependence of the rate of development of the combustion process of pyrotechnic mixtures", in *Proc. XI Int. Sci. and Pract. Conf. Theory and Practice of Fire Extinguishing and Liquidation of Emergency Situations*, ChIPB im. Heroyiv Chornobylya, Cherkasy, 2020 [in Ukrainian].
- [7] R. B. Motrichuk et al., "Regularities of the influence of technological parameters and external factors on temperature and composition of combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 4, pp. 131-142, 2020 [in Ukrainian].
- [8] E. P. Kirichenko, V. M. Gvozd, V. A. Vashchenko, O. V. Kirichenko, O. O. Dyadyushenko, and V. P. Melnik, "Regularities of the influence of technological parameters and external factors on the ignition temperature and combustion time of magnesium and aluminum particles in the decomposition products of metal oxides", *Tsyvilnyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, no. 2 (12), pp. 112-122, 2021 [in Ukrainian].
- [9] E. P. Kirichenko, "Research of processes of external thermal shock actions on pyrotechnic metal oxide products in the conditions of a shot and flight", *Fire Safety: Theory and Practice: coll. of sci. works of the Institute of Chornobyl Heroes*, vol. 5, no. 2, pp. 87-102, 2021 [in Ukrainian].
- [10] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, and O. L. Mirus, "Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5 (95), pp. 68-76, 2018.
- [11] V. M. Fateev, Yu. P. Prikhodko, and L. I. Taborov, *Pyrotechnics*. Kyiv, Ukraine: Nauk. dumka, 2017 [in Ukrainian].

- [12] V. M. Balanyuk, N. M. Kozyar, and O. I. Garasymyuk, "Application of aerosol-powder fire-extinguishing mixtures for protection against incendiary mixtures", *Science Rise*, no. 2 (22), pp. 11-14, 2016 [in Ukrainian].
- [13] V. M. Marich, V. V. Kovalishyn, and Ya. B. Kirillov, "Optimization of fire extinguishing powders for magnesium extinguishing", in *Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. Theory and Practice of Fire Extinguishing and Liquidation of Emergency Situations*, Cherkasy, 2018 [in Ukrainian].
- [14] V. V. Kovalishyn, V. M. Marich, T. M. Voitovych, and B. M. Husar, "Use of environmentally friendly fire extinguishers", in *Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. Environmental safety as the basis of sustainable development of society. European experience and perspectives*, DUBZhD, 2018 [in Ukrainian].
- [15] V. M. Marich, V. V. Kovalishyn, and Ya. B. Kirillov, "Investigation of chemicals as components of fire-extinguishing powders for extinguishing magnesium and its alloys", in *Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. Theory and Practice of Fire Extinguishing and Liquidation of Emergency Situations*, Cherkasy, 2017 [in Ukrainian].
- [16] 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.
- [17] O. V. Kirichenko et al., "Determination of critical modes of development of combustion processes of pyrotechnic nitrate-metal mixtures in the conditions of external thermal actions", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 2, pp. 123-133, 2020 [in Ukrainian].

**E. P. Kirichenko<sup>1</sup>,**  
**V. M. Gvozdz<sup>1</sup>, Ph. D., Professor,**  
**O. V. Kirichenko<sup>1</sup>, Dr. Tech. Sc., Professor,**  
**V. O. Kovbasa<sup>1</sup>,**  
**V. A. Vaschenko<sup>2</sup>, Dr. Tech. Sc., Professor,**  
**T. I. Butenko<sup>2</sup>, Ph. D., Associate Professor,**  
**V. V. Tsybulin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Cherkasy Institute of Fire Safety,  
 Onoprienko st., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

<sup>2</sup>Cherkasy State Technological University,  
 Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

## INCREASE OF THE STABILITY OF THE PROCESS OF PYROTECHNIC MIXTURES COMBUSTION THROUGH THE ADDITION OF ORGANIC SUBSTANCES

*Ignition and subsequent fire-hazardous destruction of products are usually preceded by external thermal effects to which they are subjected. This leads to premature ignition and explosive development of burning charges based on compacted mixtures of oxidizing powders and metal combustibles and further fire-hazardous destruction.*

*Prevention of forced fire-hazardous destruction of products in the event of external thermal effects becomes of significant practical importance. Prevention methods should be based on studies of the development processes of the combustion of pyrotechnic mixture charges in various external conditions.*

*Prevention of forced fire-hazardous destruction of products in the event of external thermal effects acquires significant practical importance. Prevention methods should be based on studies of the development processes of the combustion of pyrotechnic mixture charges in various external conditions.*

*Currently, the issue of the influence of various technological parameters and external conditions on the processes of development of combustion of two-component pyrotechnic mixtures has been sufficiently investigated. However, there are no systematic studies of the influence on the combustion process of the indicated mixtures of additives of various organic substances, which, as shown by sepa-*

rate studies for paraffin, stearin, naphthalene, anthracene additives, not only contribute to the improvement of the technology of manufacturing their charges, but also lead to a slowdown in the combustion process of the mixtures with further its stabilization.

The purpose of the work is to establish the regularities of the influence of additives of various organic substances in the composition of pyrotechnic mixtures of oxidizing powders and metal fuels on the speed and stability of the development of their combustion.

A wide class of organic substances has been established, the introduction of which in the form of small additives (up to 10%) into the composition of pyrotechnic mixtures based on powders of metal fuels and oxidizers leads to a decrease in the speed and increase in the resistance of their combustion process to external influences (increased heating temperatures, external pressures) for different ranges of changes in technological parameters of mixtures (ratio and dispersion of components, compaction coefficient). With a decrease in the coefficient of excess oxidant in the mixture, the dependence of the burning rate on the amount of the additive increases, regardless of its dispersion. Additions of stearin and thiocol in the mixture of  $Al + NaNO_3$  and  $Zr + NaNO_3$ , on the contrary, lead to an increase in the burning rate of these mixtures, which is due to an increase in the reactivity of  $Al$  and  $Zr$  in the presence of gaseous decomposition products of stearin and thiocol at elevated heating temperatures, which contribute to a sharp decrease in ignition temperature of metal fuel particles and lead to a decrease in the stability of the combustion process of mixtures, especially under conditions of increased external pressure (an increase in the index  $v$  in the combustion law with an increase in the amount of the additive).

**Keywords:** pyrotechnic mixtures, organic substances, burning speed, stability of the burning process, external influences.

[0000-0001-8975-851X] **Л. Б. Ящук**, канд. хім. наук, доцент  
e-mail: l\_yashchuk@ukr.net

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

## МОНІТОРИНГ ШКІДЛИВИХ ЧИННИКІВ, ДИНАМІКИ І ТЕНДЕНЦІЙ ТЮТЮНОПАЛІННЯ СЕРЕД УКРАЇНСЬКОЇ МОЛОДІ

*У статті досліджено особливості тютюнопаління серед учнівської та студентської молоді м. Черкаси. Проаналізовано поширеність вживання електронних сигарет серед черкаської молоді, проведено порівняльний аналіз нікотиновмісних та безнікотинових сумішей в сучасних електронних засобах паління за токсичними складовими. Картриджі вейпів містять багато потенційно канцерогенних речовин, концентрація яких збільшується в кілька разів при перегріванні електронної сигарети.*

*Встановлено, що поширеність звички використання електронних сигарет серед студентської молоді черкаських університетів відносно невелика, хоча досвід одноразового вейпінгу високий. З'ясовано, що головними причинами використання електронних сигарет є цікавість та впевненість у відносній безпечності вживання сучасних електронних засобів для паління. Вейпінг вважають безпечною альтернативою класичним цигаркам. Інформацію про вміст картриджів та їх безпеку споживачі отримують з реклами або при спілкуванні в соціальних мережах, серед студентських груп. Кожного п'ятого опитаного взагалі не цікавила інформація про безпеку вейпінгу, оскільки їх цікавість була задоволена одноразовим досвідом використання вейпу. На поширення електронних сигарет серед молоді впливає відносно велика ціна електронних гаджетів, тому опитування показало більше їх використання саме серед працюючої молоді.*

**Ключові слова:** електронна сигарета, вейпінг, молодь, токсикологічна небезпека, тютюнопаління.

**Вступ.** На захворюваність людства у сучасному суспільстві все більший вплив чинять негативні звички в харчуванні й поведінці населення. Розвиток цивілізації породжує такі зміни в способі життя, які підвищують ризик виникнення «хвороб сучасної цивілізації», що найбільш розповсюджені в індустріально розвинутих країнах. Згідно з базою даних ВООЗ «Здоров'я для всіх» (HFA) в Україні 56,8 % усіх причин смертей відносять на рахунок причин, пов'язаних із вживанням тютюну (56,3 % та 59,9 % серед чоловіків та жінок відповідно) [1].

Скоординована на світовому рівні просвітницька діяльність ВООЗ стосовно шкідливості тютюнопаління привела до позитивних тенденцій у цьому питанні. Більше 80 % країн Європейського регіону мають тенденцію до зниження споживання тютюну, і Україна – серед цих держав. Так, до 2025 р. очікується,

що зниження поширеності поточного споживання тютюну на глобальному рівні становитиме 23,6 %, в Європейському регіоні ВООЗ – 18,9 %, в Україні – 25,9 % [2].

Разом з тим залишається загрозливим зниження віку початку щоденного паління, який становить нині 16 років. У молодшій віковій групі курців у чотири рази більше, ніж в інших [3]. Урядові та громадські заходи, що активно проводяться в нашій країні, інформують населення, а особливо учнівську молодь, щодо негативного впливу тютюну та ризики для здоров'я від його вживання.

Останнім часом у світі й в Україні почали з'являтися альтернативні способи паління: електронні сигарети чи пристрої для нагрівання тютюну. Вони стають дедалі популярнішими серед підлітків, проте такі пристрої не є безпечнішими. За даними ВООЗ, Україна має

один із найвищих показників рівня споживання електронних сигарет – 18,4 % [2].

3 січня 2022 р. в Україні вейпи, електронні сигарети, кальяни, вироби з тютюну для електричного нагріву (ТВЕНи) знаходяться в одному статусі з традиційними сигаретами, продаж яких заборонено особам, яким не виповнилося 18 років. Українське законодавство передбачає вимоги щодо маркування пакувань електронних сигарет, бездимних тютюнових виробів, рідин та заправних контейнерів. Крім того, у рідинах для електронних сигарет забороняється використовувати ароматизатори [4].

Наразі клінічних доказів безпечності використання електронних сигарет недостатньо, а тютюнові компанії проводять масштабну маркетингову політику, особливо серед молоді, щодо популяризації вейпів. Нові електронні засоби тютюнопаління рекламуються виробниками як безпечні сучасні гаджети, які часто зображуються на фоні демонстрації здорового способу життя. Опитування значної кількості людей про ставлення до електронних сигарет свідчить, що підлітки та молодь не розглядають таке паління як фактор ризику для здоров'я. Тому визначення потенційної небезпеки електронних засобів паління та їх токсикологічних складових для молодих верств населення є досить актуальним.

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є розроблення концептуальних засад моніторингу й аналізу сучасних тенденцій і шкідливих чинників тютюнопаління, зокрема дослідження поширеності вживання електронних сигарет та стіків серед учнівської та студентської молоді м. Черкаси. Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі завдання:

- 1) визначити причини та вікові особливості формування звички тютюнопаління серед обраного контингенту дослідження;
- 2) дослідити поширеність вживання електронних засобів паління серед учнівської та студентської молоді м. Черкаси;
- 3) порівняти токсикологічні загрози для організму при вживанні класичних та електронних засобів паління;
- 4) розробити обґрунтування та рекомендації для моніторингу і профілактики вейпінгу серед молоді.

**Матеріал та методи досліджень.** Поширеність тютюнопаління серед учнівської та студентської молоді визначалась шляхом анкетування з подальшою статистичною обробкою результатів. Протягом квітня-травня 2020–2022 років проведено опитування учнівської (14–17 років) і студентської (18–22 роки) молоді через соціальні мережі Facebook, Telegram та особисті контакти під час відвідування міських та сільських шкіл. Всього опитано 300 осіб (180 хлопців та 120 дівчат), серед яких 100 школярів, що навчались у 8–11-х класах загальноосвітніх шкіл, та 200 студентів різних курсів Черкаського державного технологічного університету і Черкаського національного університету ім. Б. Хмельницького. Використовувались також методи порівняння, експертних оцінок і системного аналізу.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Аналіз результатів проведеного анкетування показав, що рівень знайомства молоді з тютюном досить великий: 59 % респондентів зазначили, що пробували палити, зробили хоча б декілька затягувань. Серед опитаних школярів половина опитаних хлопців і третина дівчат спробували палити сигарету принаймні раз у житті у віці до 14 років. З віком респондентів цей показник значно зростає. Серед молоді у віці 15–22 років 83 % хлопців та 59 % дівчат зазначили, що мають досвід тютюнопаління.

Показники систематичного паління є значно нижчими. За результатами опитування, впродовж останнього місяця близько п'ятої частини респондентів випалювали менше однієї цигарки на день, що може свідчити про епізодичний характер паління і його залежність від зовнішніх чинників. 8 % хлопців та 3 % дівчат зазначили, що за останні 30 днів палили в середньому 5 цигарок на день, що свідчить про утворення стійкої залежності від паління (таблиця 1).

Перша спроба тютюнопаління припадає на 13–14 років: 11 % хлопців та 8 % дівчат зазначили, що вперше спробували паління саме в цьому віці. Підлітковий вік завжди супроводжується намаганням молоді заявити себе вже дорослими. Переважна кількість дівчат (77 %) почала палити після 17 років, що, на нашу думку, збігається в часі з перехо-

дом до більш самостійного життя та зменшенням залежності від батьків. Більшість опитаних у віці 17–18 років вже в середньому

мають досвід паління 2 роки, що свідчить про використання цигарок ще у старшій школі (таблиця 2).

Таблиця 1. Віковий та статевий розподіл респондентів за інтенсивністю паління (%)

| Кількість цигарок в день | Школярі |         | Студенти |         |
|--------------------------|---------|---------|----------|---------|
|                          | Хлопці  | Дівчата | Хлопці   | Дівчата |
| 0                        | 53      | 73      | 49       | 57      |
| Менше 1                  | 22      | 14      | 18       | 26      |
| 1–5                      | 12      | 9       | 15       | 12      |
| 6–10                     | 8       | 3       | 9        | 4       |
| 11–15                    | 5       | 1       | 7        | 1       |
| 16–20                    | -       | -       | 1        | -       |
| Більше 20                | -       | -       | -        | -       |

Таблиця 2. Досвід першого паління серед опитаних респондентів (%)

| (Вік) роки      | Хлопці | Дівчата |
|-----------------|--------|---------|
| Від 5 до 10     | 0,5    | 0,3     |
| Від 11 до 12    | 1      | 0,5     |
| Від 13 до 14    | 11     | 8       |
| Від 15 до 16    | 24     | 14      |
| Від 17 і більше | 63,5   | 77,2    |

Результати опитування свідчать, що, незважаючи на усвідомлення шкідливості куріння, споживання тютюнових виробів молоддю досить поширене. Велике занепокоєння викликає раннє знайомство з тютюновими виробами. Слід зауважити, що до інтенсивного паління більш схильні хлопці.

Серед поведінкових і психологічних чинників формування звички тютюнопаління у старшокласників нами виділено такі причини: можливість усвідомити себе дорослими, соціальне оточення, паління батьків. Більшість студентської молоді палить для зняття стресу, в компаніях чи на роботі (рисунок 1).

Аналізуючи вплив соціальних чинників, зауважимо, що вплив соціального оточення на тютюнопаління серед учнівської та студентської молоді зростає з віком (з 20 % до 35 %), проте із дорослішанням зменшується вплив наслідування батьків (35 % і 10 % відповідно).

Натомість роль фізіологічних чинників зростає після вступу до університету і настан-

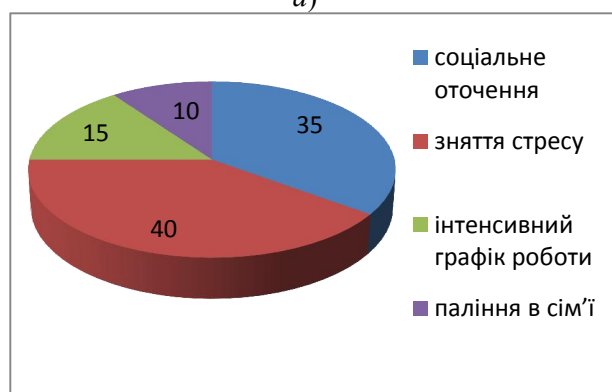
ням трудової діяльності, яка досить часто зараз суміщена з навчанням. Так, 55 % опитаних вважають, що процес паління допомагає їм подолати стрес і наслідки надмірного навантаження, втамувати відчуття голоду.

Психологічний фактор цікавості не втрачає з віком актуальності, проте зміщуються його акценти. Якщо учнів цікавить тютюнопаління взагалі, спонукавши 17 % опитаних спробувати цигарку (рисунок 1), то 48 % студентів зазначили цікавість щодо вейпінгу спонукальним чинником (рисунок 3), щоб спробувати електронний аналог.

На запитання «Чи хотіли б ви кинути палити?» більшість молоді відповідає позитивно, не усвідомлюючи своєї можливої потенційної ніотинової залежності. Вони вважають, що можуть кинути паюти у будь-який момент, виявивши силу волі. Молодь добре обізнана із можливими наслідками тютюнопаління і хворобами, які ним спричинені.



а)



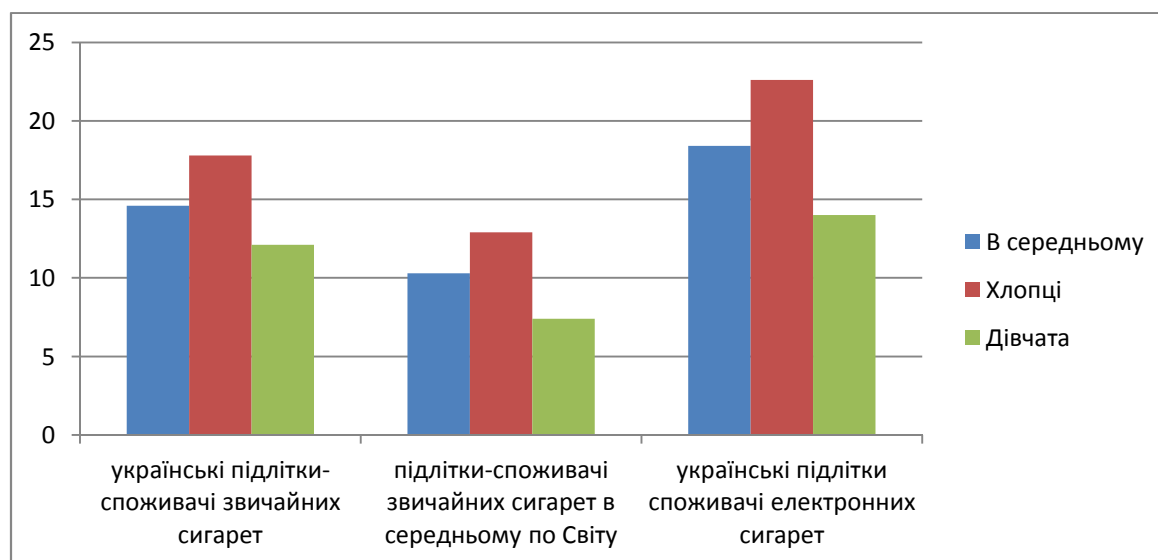
б)

**Рисунок 1. Чинники формування звички до тютюнопаління серед учнівської (а) та студентської (б) молоді (%)**

Більшість старшокласників купує цигарки за рахунок економії кишенькових коштів; студенти заробляють самостійно, лише деякі з них беруть гроші у батьків.

Динаміка поширення електронного паління все більше турбує останнім часом українське суспільство. За даними Глобального опитування української молоді, майже 20 % респондентів мають досвід використання електронних сигарет (рисунок 2) [5]. Опитування Київського міжнародного інституту соціології [7] показало, що в Україні 3,2 % жінок є курцями електронних цигарок, а 10,5 % використовують тютюнові вироби електричного нагрівання. При цьому е-цигаркам надають перевагу 6,4 % чоловіків, приблизно стільки ж (6,1 %) використовують ТВЕНи.

Фахівцями й експертами відзначено, що загалом електронні цигарки у 2020 р. стали вдвічі популярнішими, ніж за рік до цього. Крім того, тенденція збільшення поширеності паління спостерігається серед молоді віком від 18 до 30 років [3].



**Рисунок 2. Рівень споживання тютюнових виробів підлітками в Україні та світі (у відсотках) [5]**

Опитування студентської молоді в м. Черкаси стосовно вживання електронних цигарок у рамках цього дослідження показало, що відносно невеликий відсоток респондентів

користуються вейпами постійно (6 %), але досвід вживання електронних цигарок мають більше половини опитаних (68 %). Причини, які спонукають студентів, що хоча б один раз

скористались вейпінгом, різні. За нашим дослідженням, головним чинником є цікавість, на другому місці – впевненість у безпечності такого досвіду (рисунок 3). Деякі студенти розглядають вживання вейпу як належність до певної авангардної субкультури серед молоді і хочуть відчувати себе її частиною. Зовсім невелика група просто приєдналась до вейпінгу на вечірці ситуативно (рисунок 3).

Зауважимо, що вартість вейпів та рідин до них є відносно високою. Ціни на електронні цигарки в Україні спостерігаємо найрізноманітніші. Наприклад, популярний торговельний майданчик «Розетка» пропонує електронні цигарки вартістю 600–700 грн. [6]. Картридж

до них коштує у середньому 200–300 грн. Пропонується дуже багато стартових наборів для електронного паління, ціна яких коливається у діапазоні 1500–2500 грн. На нашу думку, враховуючи регіональний і вартісний аспекти, саме ціни є стримувальним фактором щодо поширеності електронного паління серед черкаської молоді.

Разом з тим, намагаючись зменшити власні витрати на цю шкідливу звичку, з огляду на відносно високу вартість електронного паління, деякі споживачі використовують картриджі багаторазово, що підвищує небезпеку від негативних наслідків їх вживання.

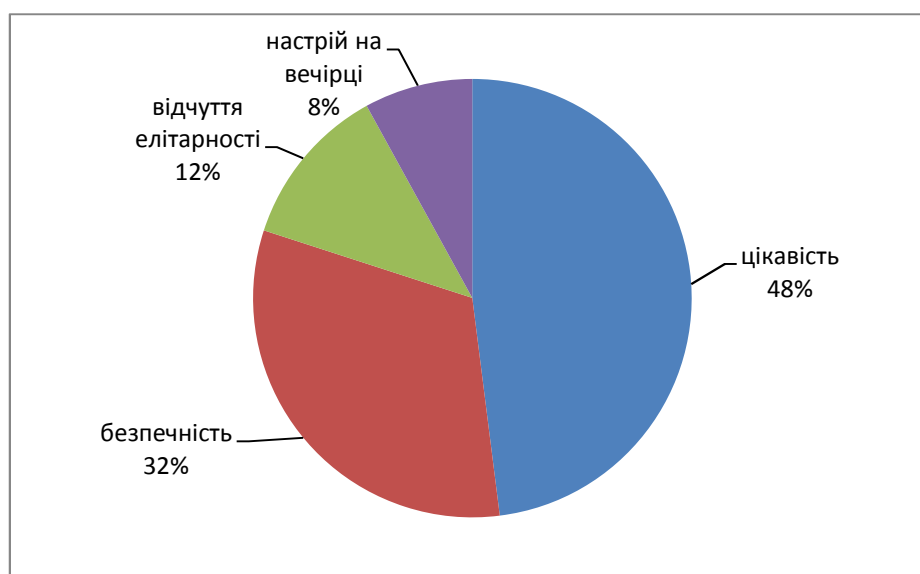


Рисунок 3. Причини вживання електронних сигарет серед студентської молоді м. Черкаси

Опитування молоді показало також, що студенти вважають такий спосіб паління безпечним порівняно з класичним вживанням сигарет. Обізнаність молодих споживачів у безпечності вейпінгу базується переважно на перегляді реклами та колективному обгово-

ренні у контактних студентських групах в соціальних мережах (таблиця 2). Спостерігається ігнорування наукових публікацій з цього питання. Кожного п'ятого респондента взагалі це питання не цікавило, оскільки вони пробували вейп один раз – лише з цікавості.

Таблиця 3. Обізнаність студентів стосовно безпечності електронних сигарет

| Джерела інформації                 | Кількість респондентів | % опитаних студентів |         |
|------------------------------------|------------------------|----------------------|---------|
|                                    |                        | хлопці               | дівчата |
| Реклама                            | 44                     | 54                   | 46      |
| Соціальні мережі                   | 77                     | 35                   | 65      |
| Інтернет                           | 56                     | 55                   | 45      |
| Спілкування з досвідченими курцями | 13                     | 67                   | 33      |
| Наукові публікації                 | -                      | -                    | -       |
| Взагалі не цікавилися              | 10                     | 80                   | 20      |

Дослідження складових електронної сигарети та вейпів свідчить, що вони становлять загрозу для здоров'я підлітків, які стали значною категорією населення, що споживає електронні засоби паління. Електронна сигарета складається з трьох частин: акумулятора, парогенератора і картриджа. З рідини, що міститься у картриджі, утворюється суспензія, котра імітує сигаретний дим, який вдихає курець. На відміну від традиційних сигарет, у цих пристроях немає тютюну, але рідина у картриджі, крім нікотину, який виробляють з тютюнового листа, складається з пропіленглі-

колю, гліцерину та ароматизаторів – тютюну, ментолу, кави, фруктів, солодоців чи алкоголю [7].

Порівняльний аналіз токсичних складових в електронних та звичайних сигаретах наведено в таблиці 4. Концентрація усіх цих сполук збільшується в декілька разів при перегріванні електронної сигарети. Кожний змінний картридж для електронної сигарети зазвичай містить від 6 до 24 мг нікотину, але деякі з них можуть містити більш як 100 мг [8].

Таблиця 4. Порівняльний аналіз токсичних складових в електронних та звичайних сигаретах

| Електронна сигарета |              | Звичайна сигарета |                   |
|---------------------|--------------|-------------------|-------------------|
| Нікотин             | Формальдегід | Нікотин           | Формальдегід      |
| Ацетилацетон        | Нітрозаміни  | Ацетальдегід      | Монооксид вуглецю |
| Діацетил            | Свинець      | Ароматичні аміни  | Оксид азоту       |
| Нікель              | Кадмій       | Бутадієн          | Метанол           |
| Хром                | Цинк         | Бензол            | Понад 200 сполук  |

Негативним аспектом використання електронних сигарет також є наявність токсичних металів (кадмій, нікель, свинець) і силікатів у парах пристрою. В аерозолі були знайдені олово, нікель та інші важкі метали в концентрації більш ніж у 100 разів, порівнюючи з тютюновим димом звичайних сигарет. Поява наночастинок нікелю і хрому в аерозолі картриджа пов'язана із покриттям парогенератора. У такому вигляді важкі метали легко проникають в альвеоли легень та в артеріальну кров, створюючи локальний токсичний ефект [8].

На ринку для картриджів електронних цигарок продають безнікотинові суміші, але з певною концентрацією пропіленгліколю. Останній при нагріванні шкодить органам дихальної системи та сприяє розвитку чи загостренню хронічних хвороб (астми, бронхіту, алергії), бронхоспазмам. Гліцерин, що міститься в таких картриджах, погіршує кровообіг у людини [9].

Діти від 8 до 13 років, які починають використовувати вейпи, частіше мають проблеми з концентрацією уваги, запам'ятовуванням, прийняттям рішень порівняно з тими, хто набув цю звичку після

14 років. Більш молодий вік виявився найбільш вразливим, проте курці різного віку мали аналогічні проблеми [10].

Порівняно невелике за терміном появи на ринку використання вейпів вже призвело до появи нової хвороби під назвою EVALI, або вейпасоційоване ушкодження легень, яка призвела майже до 1900 випадків тяжкої хвороби легень та щонайменше 37 смертей на цей час. Середній вік померлих пацієнтів становив від 15 до 75 років. Встановлено, що в умовах пандемії COVID-19 курці в 1,4 разу частіше мають важкі симптоми коронавірусної інфекції і приблизно в 2,4 разу частіше потрапляють до відділень інтенсивної терапії [10, 11].

Тютюнові вироби електронного нагрівання виробники позиціонують як продукти «зниженого ризику», аргументуючи тим, що у стіках немає смол та значно менше різних домішок порівняно зі звичайними сигаретами, однак наголошують на тому, що цільовою аудиторією є дорослі курці. Разом із тим ці вироби не позиціонують як засоби відмови від паління, а швидше як «менш шкідливу альтернативу» для тих, кому складно або в кого немає бажання кидати палити. Сьогодні

на українському ринку представлені два бренди систем для нагрівання тютюну: IQOS (I Quit Ordinary Smoking) та Glo. Всі стіки для IQOS не виділяють смол при нагріванні і містять однакову кількість нікотину, а «міцність» визначається насиченістю й інтенсивністю смаку. До речі, IQOS істотно відрізняється за смаком від сигарет. Ця різниця обумовлена нагріванням тютюну замість підпалювання, а також відсутністю диму і гару (рисунок 4) [8].

Таким чином, хоча тютюнові вироби для нагрівання виділяють шкідливі речовини у

менших кількостях, це не означає, що вони безпечніші для здоров'я. Усі стіки для ТВЕНів містять нікотин, кількість якого незначно відрізняється від його вмісту у звичайних сигаретах.

Паління бездимного тютюну може провокувати розвиток раку легень, ротової порожнини та стравоходу. Особливо небезпечним є вживання ТВЕНів для нервової системи школярів та студентської молоді, тому що звичка тютюнопаління, хоча й електронними засобами, негативно впливає на нервову систему [12].

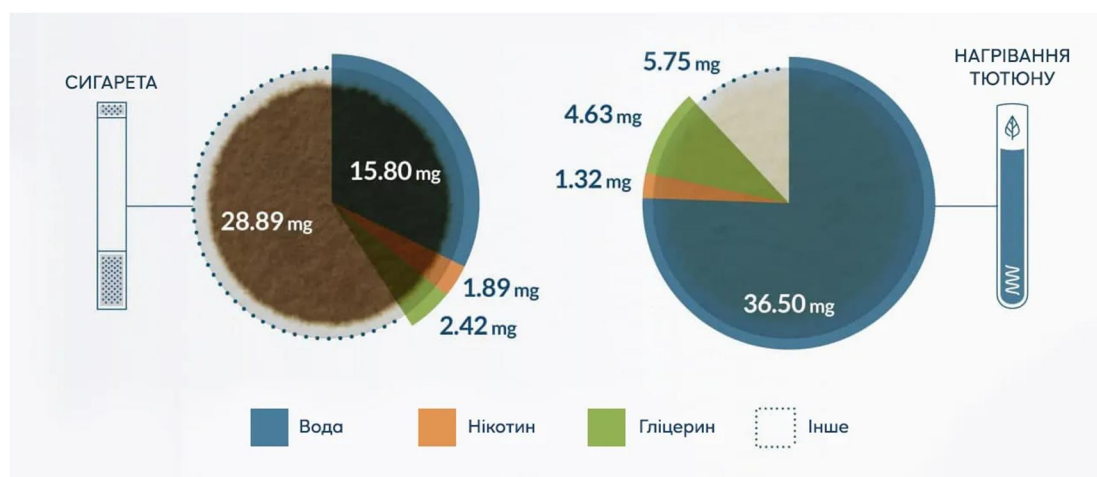


Рисунок 4. Порівняльна характеристика складників диму класичної та електронної сигарет

**Висновки.** Проведено порівняльний аналіз токсикологічних ризиків для здоров'я від використання нікотиновмісних та безнікотинових сумішей у сучасних електронних засобах паління. Досліджено вікові та гендерні особливості тютюнопаління серед учнівської і студентської молоді, виокремлено спонукальні та стримувальні чинники.

Аналіз причин переходу студентів на електронні засоби паління дає змогу поліпшити профілактику паління в студентському середовищі та сформувати дбайливе ставлення до підтримання фізичного та психологічного здоров'я юнаків та дівчат.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні концептуальних засад моніторингу тенденцій і дослідження загроз для молоді від появи на ринку сучасних електронних засобів паління, а також ризиків виникнення залежності від їх використання та інших потенційно шкідливих наслідків.

Порівняльний аналіз нікотиновмісних та безнікотинових сумішей в сучасних електронних засобах паління свідчить про те, що вейпінг становить загрозу для здоров'я, як і класичні сигарети.

Серед причин формування звички тютюнопаління у старшокласників виділяють: можливість усвідомити себе дорослими, соціальне оточення, паління батьків. Більшість студентської молоді палить для зняття стресу, в компаніях, на роботі.

Поширеність звички використання електронних сигарет серед студентської молоді черкаських університетів відносно невелика, хоча досвід одноразового вейпінгу ми оцінюємо як високий. Головними причинами використання електронних сигарет, як показало опитування, є цікавість та впевненість у відносній безпечності вживання сучасних електронних засобів для паління. Деякі вважають

це безпечною альтернативою використанню тютюновмісних класичних цигарок.

Інформацію про вміст картриджів та їх безпеку молодь отримує переважно через рекламу або при спілкуванні в соціальних мережах, серед студентських груп. Кожного п'ятого опитаного взагалі не цікавила інформація про безпеку вейпінгу, оскільки їх цікавість була задоволена одноразовим досвідом використання вейпу. На поширення електронних сигарет серед молоді впливає відносно велика ціна електронних гаджетів, тому їх не кожний студент може собі дозволити.

Зауважимо, що вміст картриджів вейпів не є абсолютно безпечним для здоров'я, бо там багато канцерогенних речовин, і концентрація цих сполук збільшується в кілька разів при перегріванні електронної сигарети. Усі тютюнові вироби для нагрівання містять нікотин, кількість якого не набагато менша від його вмісту у звичайних сигаретах. Зауважимо, що куріння бездимного тютюну так само підвищує ризик виникнення онкологічних захворювань і недуг порожнини рота, стравоходу, як і звичайні сигарети.

Практичне значення дослідження полягає в обґрунтуванні задач і методів систематичного моніторингу для оптимізації боротьби зі зростанням залежності молоді від вейпінгу та зниження темпів використання електронних засобів паління.

З'ясування пріоритетів молоді під час вибору електронних засобів паління, дослідження ймовірнісних, вікових, гендерних та інших чинників вживання нікотинвмісних виробів дає змогу розробити більш ефективні методи профілактики тютюнозалежності серед учнів та студентів, на протидію глобальній тютюновій епідемії.

Необхідне проведення подальших досліджень причин формування та негативних наслідків вейпінгу у різних вікових категоріях населення. Зокрема логічним продовженням нашої роботи є інструментальне підтвердження – як сучасними, так і класичними методами – вмісту потенційно шкідливих для здоров'я людини сполук у нікотинвмісних виробах і компонентах електронних засобів паління.

### Список використаних джерел

- [1] *Основні причини високого рівня смертності в Україні*. Київ, Україна: Версо-04, 2010.
- [2] "WHO report on the global tobacco epidemic 2021: addressing new and emerging products". [Online]. Available: <https://www.who.int/teams/health-promotion/tobacco-control/global-tobacco-report-2021>
- [3] О. М. Балакірева, Т. В. Бондар, та Д. М. Павлова, "Динаміка поширення куріння, вживання алкоголю та наркотичних речовин серед молоді, яка навчається", *Український соціум*, № 4 (59), с. 21-41, 2016.
- [4] Закон України "Про внесення змін до деяких законів України щодо вдосконалення окремих положень про обмеження місць куріння тютюнових виробів". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/484-4-17#Text>
- [5] Доповідь Всесвітньої організації охорони здоров'я про глобальну тютюнову епідемію, 2017 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.eur-lex.europa.eu bit.ly/2CVTUe0, bit.ly/2Xn8fcQ>
- [6] "Порядок визначення вартості продажів електронних сигарет в Україні". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.tax.gov.ua>
- [7] An Overview of Global Regulatory Practices in Controlling Waterpipe Tobacco Use. Prepared by the WHO FCTC Secretariat's Knowledge Hub on Waterpipe Tobacco Smoking under the grant from the Convention Secretariat, WHO FCTC. July 2018. [Online]. Available: [https://www.eur-lex.europa.eu bit.ly /control\\_waterpipe](https://www.eur-lex.europa.eu bit.ly /control_waterpipe)
- [8] Аналітичний звіт ВООЗ "Електронні сигарети: оцінка ситуації та потреб: Регулювання в Україні". Україна, 2018.
- [9] Звіт Європейської Комісії перед Європарламентом та Радою щодо потенційних ризиків для громадського здоров'я, асоційованих із використанням перезарядних електронних сигарет, 2016 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu>.

- [10] І. М. Волошина, "Тютюнопаління vs е-сигарети: підміна гравців. Доказове лікування нікотинової залежності", *Артеріальна гіпертензія*, т. 13, № 1, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.pfizermed.com.ua/public/products-content>
- [11] О. В. Пікас, "Куріння цигарок серед населення та його роль у розвитку захворювань", *Вісник проблем біології і медицини*, № 1, 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.vpbm.com.ua>
- [12] В. Хоміцька, О. Підвальна, та О. Булейченко, "Стан проблеми тютюнопаління серед студентів перших курсів ЗВО", *Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова. Сер. 15. Науково-педагогічні проблеми фізичної культури (фізична культура і спорт)*, № 5 (150), с. 109-112, 2022.
- [6] "The procedure for determining the cost of sales of electronic cigarettes in Ukraine". [Online]. Available: <https://www.tax.gov.ua> [in Ukrainian].
- [7] An Overview of Global Regulatory Practices in Controlling Waterpipe Tobacco Use. Prepared by the WHO FCTC Secretariat's Knowledge Hub on Waterpipe Tobacco Smoking under the grant from the Convention Secretariat, WHO FCTC. July 2018. [Online]. Available: [https://www.eur-lex.europa.eu/bit.ly/control\\_waterpipe](https://www.eur-lex.europa.eu/bit.ly/control_waterpipe)
- [8] Analytical report of the WHO "Electronic cigarettes: assessment of the situation and needs: Regulation in Ukraine". Ukraine, 2018 [in Ukrainian].
- [9] Report of the European Commission to the European Parliament and the Council on the potential risks to public health associated with the use of rechargeable e-cigarettes, 2016. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu> [in Ukrainian].
- [10] І. М. Волошина, "Smoking vs e-cigarettes: changing players. Evidence-based treatment of nicotine addiction", *Артеріальна гіпертензія*, vol. 13, no. 1, 2020. [Online]. Available: <https://www.pfizermed.com.ua/public/products-content> [in Ukrainian].
- [11] О. В. Пікас, "Cigarette smoking among the population and its role in the development of diseases", *Вісник проблем біології і медицини*, no. 1, 2016. [Online]. Available: <https://www.vpbm.com.ua> [in Ukrainian].
- [12] В. Хоміцька, О. Підвальна, and О. Булейченко, "The state of the problem of smoking among students of the first years of higher education", *Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова. Сер. 15. Науково-педагогічні проблеми фізичної культури (фізична культура і спорт)*, no. 5 (150), pp. 109-112, 2022 [in Ukrainian].

### References

- [1] *The main reasons for the high mortality rate in Ukraine*. Kyiv, Ukraine: Verso-04, 2010 [in Ukrainian].
- [2] "WHO report on the global tobacco epidemic 2021: addressing new and emerging products." [Online]. Available: <https://www.who.int/teams/health-promotion/tobacco-control/global-tobacco-report-2021>
- [3] O. M. Balakireva, T. V. Bondar, and D. M. Pavlova, "Dynamics of smoking, alcohol and drug use among young people studying", *Ukrainskyi sotsium*, no. 4 (59), pp. 21-41, 2016 [in Ukrainian].
- [4] The Law of Ukraine "On amendments to certain Laws of Ukraine on improvement of certain provisions on limiting smoking places for tobacco products". [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4844-17#Text> [in Ukrainian].
- [5] World Health Organization report on global tobacco epidemic, 2017. [Online]. Available:

L. B. Yashchuk, Ph. D., Associate Professor  
e-mail: l\_yashchuk@ukr.net  
Cherkasy State Technological University  
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

## MONITORING OF HARMFUL FACTORS, DYNAMICS AND TRENDS OF SMOKING AMONG UKRAINIAN YOUTH

*The peculiarities of tobacco smoking among pupils and students in Cherkasy have been researched. The prevalence of electronic cigarette use among Cherkasy youth is analyzed and a comparative analysis of toxicological components of nicotine-containing and nicotine-free mixtures in modern electronic smoking devices is conducted.*

*The prevalence of the habit of using electronic cigarettes among student youth of Cherkasy universities is relatively small, although the experience of one-time vaping is high. The main reasons for using electronic cigarettes are curiosity and confidence in the relative safety of using modern electronic smoking devices. Some students consider it a safe alternative to using classic cigarettes. The use of e-cigarettes is more common among working youth.*

*Among the reasons for the formation of the habit of smoking among pupils, the following stand out: the opportunity to perceive oneself as an adult, social environment, parents' smoking. Most students smoke to relieve stress, in companies, at work.*

*Information about the content of cartridges and their safety is sought mainly through advertising, or when communicating in social networks, among student groups. One in five respondents were not at all interested in information about the safety of vaping, as their curiosity was satisfied by a one-time experience of using a vape. The spread of electronic cigarettes among young people is influenced by the relatively high price of electronic gadgets, which not every student can afford.*

*The contents of vape cartridges contain many carcinogenic substances. The concentration of all these compounds increases several times when the electronic cigarette is overheated.*

*All vape-gadgets for heating contain nicotine, the amount of which is not much less than its content in ordinary cigarettes. Smoking smokeless tobacco also increases the risk of cancer, diseases of the oral cavity, esophagus, as well as regular cigarettes.*

**Keywords:** *electronic cigarette, vaping, youth, toxicological danger, tobacco smoking.*

**ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ НАНОКОМПОЗИТІВ  
НА ОСНОВІ ПОЛІЕТИЛЕНОКСИДУ ТА НАНОЧАСТИНОК СРІБЛА  
В ОБЛАСТІ НИЗЬКИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ НАПОВНЮВАЧА**

*Робота присвячена розробці нового матеріалу на основі поліетиленоксиду (ПЕО) та синтезованих і стабілізованих наночастинок срібла, а також дослідженню його електричних властивостей в області низьких концентрацій наповнювача. Розроблено новий підхід до синтезу наночастинок срібла. Використовуючи цей підхід, синтезовано стабілізовані наночастинок срібла. Використовуючи метод імпедансної спектроскопії, досліджено електричні властивості полімерних наноккомпозитних матеріалів на основі ПЕО та синтезованих частинок срібла в області низьких концентрацій наповнювача. Зроблено припущення, що в системах на основі ПЕО існує два механізми переносу зарядів: перескок зарядів у кристалічній фазі ПЕО та перенос, який забезпечується сегментальною рухливістю поліетерних ланцюгів в аморфній фазі ПЕО. У результаті встановлено, що стабілізовані наночастинок срібла істотно впливають на електричні властивості наноккомпозитного матеріалу при відносно низьких концентраціях нанонаповнювача (1 %). Електропровідність досліджуваних матеріалів екстремально залежала від вмісту наповнювача. Така залежність пояснюється агрегаційними процесами наночастинок у полімерній матриці, що змінює частку міжфазного шару за рахунок додаткової аморфізації системи. Зроблено припущення, що при 1 % вмісті наночастинок срібла сумарна площа міжфазного шару є максимальною.*

**Ключові слова:** електропровідність, міжфазний шар, агрегація, композит, нанонаповнювач, імпедансна спектроскопія.

**Вступ.** Полімерні композитні матеріали, наповнені частинками металів, дедалі активніше використовуються у світовій практиці. Практичне застосування таких матеріалів постійно зростає, що викликано тим, що вони поєднують оптимальні властивості полімерів та неорганічних частинок [1, 2]. Особливе місце серед металополімерних композитів займають матеріали із включенням наночастинок срібла (AgNPs). Показано, що властивості наносрібла відрізняються від властивостей макроматеріалу [3]. Для виготовлення матеріалів на основі полімеру та наночастинок срібла існують багато методів. Серед цих методів є плазмове нанесення, іонна імплантація, обробка розплавом, пошарового нанесення на волокно, лиття розчину та органо-неорганічне гібридне покриття тощо [4]. Ці методи мають як свої переваги, так і недоліки. Тому підбір методу виготовлення є складною задачею і потребує подальшого вивчення.

Особливу увагу також приділяють вибору полімерної матриці. Цей вибір безпосередньо залежить від бажаного комплексу фізико-механічних та функціональних властивостей матеріалу. Серед матриць для створення полімерних наноккомпозитів використовують як термопластичні, так і термореактивні полімери. Поліетиленоксид (ПЕО) серед інших добре вивчених полімерів є матрицею, яка добре підходить для інкапсуляції металевих наночастинок [5], таких як срібло.

Відомо, що введення електропровідних наночастинок до складу полімерних наноккомпозитних матеріалів приводить до значного покращення цілого комплексу їх властивостей, зокрема електричних характеристик, при значно низькому вмісті наповнювача (~1-2 %) [6]. Однак для полімерних систем, які містять наночастинок срібла, більшість авторів фіксують зміни лише в області високих концентрацій [7-9]. Так, у роботі [7] було

отримано та досліджено новий тип електро- та теплопровідних композитів на основі поліетилену та наночастинок срібла. Композити з високим вмістом наповнювача мали високу електропровідність. Встановлено, що поріг електричної перколяції, тобто концентрація наповнювача, при якій відбувається найбільш різке зростання електропровідності, для таких систем становив 10 об. %. В той же час області низьких концентрацій наповнювача залишилися недослідженою. Автори роботи [8] досліджували електропровідність композитних плівок на основі полівінілового спирту та наночастинок срібла. При цьому вони спостерігали пропорційне збільшення електропровідності при збільшенні концентрації наповнювача. Найбільш різке зростання електропровідності спостерігалось в області 10-20 мас. %. Аналогічні ефекти проявляються і для системи на основі поліетеретеркетону та наночастинок срібла [9]. Введення металевих наночастинок у матрицю значно впливає на електропровідність у широкому інтервалі концентрацій. Автори приділили більшу увагу дослідженню області концентрацій вище порога перколяції, який становить 10,8 об. %. Проте в області низьких концентрацій наповнювача спостерігається нелінійна зміна електропровідності, природа якої не встановлена.

**Мета та задачі дослідження.** Поєднання матриці поліетиленоксиду та стабілізованих наночастинок срібла у невеликій кількості у новому матеріалі є перспективним і потребує подальшого вивчення. Тому метою роботи була розробка нового матеріалу на основі поліетиленоксиду та синтезованих і стабілізованих наночастинок срібла, а також дослідження його електричних властивостей. Досягнення мети дослідження передбачало виконання низки завдань:

1. Синтезувати стабілізовані наночастинок срібла.
2. Виготовити серію нанокомпозитних матеріалів, які містять наночастинок срібла, методом ультразвукового диспергування.
3. Дослідити особливості впливу наночастинок срібла при низьких концентраціях на електричні характеристики отриманих матеріалів.

**Виклад основного матеріалу.** Для дослідження було синтезовано стабілізовані наночастинок срібла та виготовлено серію полімерних нанокомпозитів на основі поліетиленоксиду.

#### *Вихідні матеріали.*

Поліетиленоксид (ПЕГ 1000),  $HO[-CH_2-CH_2-O-]_nH$  ( $n \approx 22$ ) молекулярної маси  $M_w = 1000$ , виробництва компанії Aldrich, був обраний полімерною матрицею. При  $T = 298$  К ПЕГ-1000 є твердою речовиною з густиною  $\rho = 1070$  кг/м<sup>3</sup>. Температура плавлення  $T_{пл} \approx 34-35$  °С.

Циклічний ангідрид 2-сульфобензойної кислоти ("Aldrich"  $\geq 95$  %), N-метилімідазол ("Aldrich", 99 %),  $AgNO_3$  (фарм.) і тринатрійцитрат ( $C_6H_5O_7Na_3$ , фарм.) використовували без додаткового очищення; гіперрозгалужений аліфатичний олігоестерполіол Boltorn®H30 ("Perstorp", Sweden) ММ 3500 (еквівалентна ММ олігомеру за гідроксильними групами, визначена методом ацилювання, становить 117 г/екв) очищали шляхом переосадження з ацетону в етер з наступним сушінням у вакуумі (1-3 мм. рт. ст.) при температурі 25-30 °С протягом 6 год; диметилформамід (ДМФА) переганяли при залишковому тиску 1-3 мм. рт. ст, а етанол та діетиловий етер використовували без перегонки.

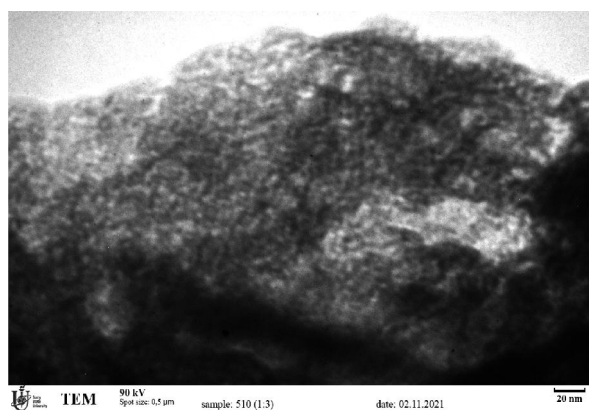
Синтез аніонної протонної олігомерної іонної рідини гіперрозгалуженої будови ГР- $([SO_3]^-[HMim^+])_{32}$  здійснювали в дві стадії відповідно до раніше розробленої нами методики [10]. На першій стадії проводили вичерпне ацилювання олігоестерполіолу (містить 32 кінцеві первинні гідроксильні групи) циклічним ангідридом 2-сульфобензойної кислоти в ДМФА при 80-90 °С з наступним частковим видаленням розчинника при зниженому тиску, висаджуванням продукту реакції в етер та сушінням у вакуумі. На другій стадії отриманий продукт реакції нейтралізували N-метилімідазолом в етанолі за кімнатної температури з наступним частковим випарюванням розчинника, висаджуванням отриманої сполуки в етер, очищенням переосадженням зі спирту в етер та сушінням у вакуумі.

#### *Синтез та структура наночастинок.*

Синтез наночастинок  $Ag(0)$  здійснювали відновленням іонів  $Ag(I)$  у складі  $AgNO_3$  тринатрійцитратом в присутності розробленого нами іонвмісного олігомеру гіперрозгалуженої будови ГР- $([SO_3]^-[HMim^+])_{32}$  як стабілізатора їх поверхні. До 0,941 г (0,002202 екв) ГР- $([SO_3]^-[HMim^+])_{32}$  в 22 мл води добавляли 0,125 г (0,000734 екв)  $AgNO_3$  в 8 мл води, перемішували суміш 10 хв за кімнатної температури, добавляли 0,731 г (0,002833 екв)  $C_6H_5O_7Na_3$  в 30 мл води та перемішували ще

10 хв. Далі температуру розчину піднімали до 100 °С та кип'ятили зі зворотним холодильником 1 год. При цьому колір розчину змінювався від жовтого до коричневого. Розчин фільтрували, воду випарювали при 70-75 °С, отриманий у вигляді коричневого осаду продукт вакуумували при залишковому тиску 1-3 мм. рт. ст. і температурі 75-80 °С, промивали етанолом та сушили у вакуумі (1-3 мм. рт. ст.) при 75-80 °С. Вихід продукту – 0,868 г (85,2 %). Отриманий продукт являє собою коричневий порошок, розчинний у воді та нерозчинний в органічних розчинниках.

На рисунку 1 наведено мікрофотографію для синтезованих наночастинок срібла. На фотографії спостерігаються росподібна структура, що складається із нанорозмірних частинок. Видно, що частинки мають структуру типу ядро-оболонка, де наночастинка срібла є ядром, а органічний стабілізатор – оболонкою. Аналіз мікрофотографій показав, що середній розмір отриманих наночастинок становить 8-10 нм.



**Рисунок 1. Фотографія наночастинок срібла у порошкоподібному стані**

#### *Приготування зразків для досліджень.*

Наноккомпозити були приготовлені методом ультразвукового змішування у розплаві полімеру при  $T = 60$  °С за допомогою ультразвукового диспергатора УЗД-А650. Час диспергування становив 5 хв, потужність – 150 Вт.

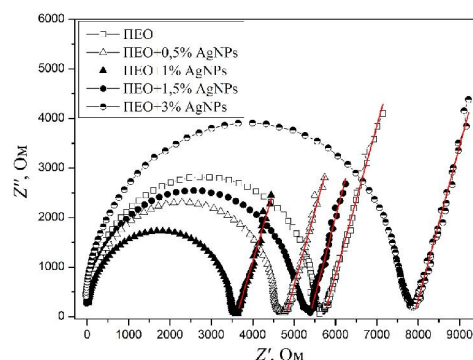
#### *Методи досліджень.*

Електричні властивості досліджували методом імпедансної спектроскопії, реалізованої на базі вимірювача іммітансу Е7-20. При цьому вимірювали дійсну ( $Z'$ ) та уявну ( $Z''$ ) частини імпедансу у частотному інтервалі від 25 Гц до 1 МГц. Зразок поміщали між електродами із нержавіючої сталі, відстань між якими була однаковою і становила 100 мкм.

Моделювання спектрів імпедансу методом еквівалентних схем проводили за допомогою програмного забезпечення EIS Spectrum Analyser.

**Результати досліджень і обговорення результатів.** Імпедансна спектроскопія є одним із ефективних методів вивчення електрофізичних характеристик різних матеріалів, зокрема полімерних наноккомпозитів. Залежності дійсної та уявної частин імпедансу від частоти полімерних наноккомпозитних матеріалів визначаються переважним механізмом транспорту зарядів, який значною мірою залежить від їх складу, структури та морфології [11].

На рисунку 2 зображено залежності дійсної частини імпедансу від уявної для систем ПЕО-AgNPs. Залежності  $Z''(Z')$  (діаграма Найквіста) у класичному варіанті являють собою півкола, що мають відхилення в низькочастотній області. Ці відхилення є наслідком поверхневих поляризаційних ефектів, які стають більш очевидними зі зростанням температури, а отже, з посиленням сегментальної рухливості в полімерній системі.



**Рисунок 2. Діаграми Найквіста для наноккомпозитів на основі ПЕО та AgNPs. Червоними суцільними лініями показані лінійні ділянки імпедансного спектра**

На рисунку 2 для всіх досліджуваних зразків діаграми Найквіста являють собою одне півколо та лінійну ділянку з певним нахилом. Відповідно до підходу, що був запропонований у [12], за нахилом прямолінійної ділянки імпедансного спектра можна зробити висновок про процеси переносу зарядів у досліджуваній системі. При нахилі прямої, рівної 45°, у системі існує єдиний механізм переносу зарядів. Якщо ж нахил прямолінійної ділянки відмінний від 45°, то можна сказати про появу додаткового транспортного механізму, при-

чому, чим більше відхилення від  $45^\circ$ , тим внесок додаткового механізму є більшим.

Визначені значення нахилів лінійних ділянок імпедансних спектрів для досліджуваних систем, зображених на рисунку 2, відмінні від  $45^\circ$  і варіюються в області  $70-73^\circ$ . Оскільки кути нахилу відмінні від  $45^\circ$ , то можна припустити, що в системах на основі ПЕО існує два механізми переносу зарядів: перескок зарядів у кристалічній фазі ПЕО та перенос, який забезпечується сегментальною рухливістю поліетерних ланцюгів в аморфній фазі ПЕО. Для ненаповненого ПЕО та системи, яка містить 3 % AgNPs, кут нахилу лінійної ділянки спектра становить  $73^\circ$ , тоді як для системи, яка містить 1 % AgNPs, це значення дорівнює  $70^\circ$ . Це свідчить про те, що при вмісті 1 % наповнювача внесок механізму сегментальної передачі заряду є найбільшим, що є наслідком утворення додаткових аморфних областей навколо частинок срібла.

Для подальшого аналізу електричних властивостей досліджуваних систем проводили моделювання спектрів імпедансу методом еквівалентних схем. Цей метод та відповідне програмне забезпечення дозволяють поставити діаграму Найквіста у відповідність деякому набору найпростіших електричних елементів або їх комбінації – еквівалентній схемі. У більшості досліджень еквівалентна схема для моделювання імпедансу полімерної матриці являє собою паралельно з'єднані резистор та конденсатор. Оскільки матриця ПЕО є частково-кристалічною та складається із аморфних та кристалічних областей, то для опису її імпедансу необхідно додавати ще елементи, які б описували неоднорідності у шляхах переносу зарядів. З цією метою при моделюванні до складу еквівалентної схеми включають елемент постійної фази (constant phase element (CPE)), що є узагальненням і універсальним засобом для моделювання імпедансу широкого класу електрохімічних систем. Цей елемент може відображати як експоненціальний розподіл параметрів цієї електрохімічної реакції, пов'язаної з подоланням енергетичного бар'єру при переносі заряду і маси, так і імпедансну поведінку, викликану фрактальною структурою поверхні шляхів переносу зарядів. У цій моделі CPE використовується для компенсування неоднорідностей у системі. Імпеданс CPE визначається такою емпіричною формулою:

$$Z_{CPE} = \frac{1}{C(i\omega)^\alpha}, \quad (1)$$

де  $C$  – електроємність;

$\alpha$  – експоненційний показник, який характеризує фазове відхилення.

Для моделювання спектра імпедансу ненаповненого ПЕО та нанокомпозитів на його основі використовували еквівалентну схему, зображену на рисунку 3.

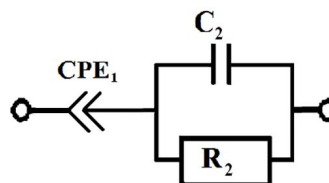


Рисунок 3. Еквівалентна схема для моделювання імпедансних спектрів нанокомпозитів на основі ПЕО та AgNPs

Згідно з наведеною еквівалентною схемою повний імпеданс системи запишеться як

$$Z = \frac{1}{(i\omega)^\alpha C_1} + \frac{1}{i\omega C_2 + \frac{1}{R_2}}, \quad (2)$$

де  $C_1$  – «істинна» електроємність перехідного шару;

$R_2$  – повний об'ємний опір;

$C_2$  – електроємність матеріалу;

$\alpha = \varphi_{CPE} / 90^\circ$ ,

$\varphi_{CPE}$  – зсув фаз, який не залежить від частоти, тому показник степеня CPE ( $\alpha$ ) також не залежить від частоти. Фаза  $\varphi_{CPE}$  майже завжди менша  $90^\circ$ , тому значення  $\alpha$  менше за 1. За умови  $\alpha = 1$  CPE перетворюється на конденсатор.

Отже, як видно з рисунка 4, моделювання імпедансу досліджуваних систем ПЕО-AgNPs, використовуючи еквівалентну схему (рисунки 3), приводить до повного збігу моделі з експериментальними даними. Це свідчить про достовірність запропонованої моделі. Підгонюючи параметри моделі, яка описується рівнянням (2), наведено в таблиці 1. З таблиці 1 видно, що зі зростанням вмісту AgNPs у системі всі параметри моделі змінюються екстремально, проходячи через екстремум при 1 % вмісту наповнювача. Це може свідчити про вирішальний вплив поверхні наночастинок на процеси переносу зарядів у досліджуваних системах.

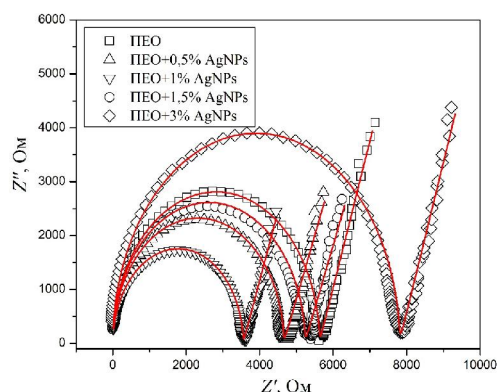


Рисунок 4. Діаграми Найквіста для систем на основі ПЕО з різним вмістом AgNPs.

Пусті кола – експериментальні дані, суцільна лінія – модель

Більшість наночастинок при введенні у полімерну матрицю, в результаті дії на них потужних ван-дер-ваальсівських сил притягання, об'єднуються між собою (агрегують), утворюючи фрактальні структури. Переважно, при низьких концентраціях наповнювача, фрактальна поведінка наночастинок не впливає на електричні властивості системи. Проте, якщо взяти до уваги, що електропровідність у досліджуваних системах реалізується переважно в аморфних областях, які утворюються на межі між матрицею та наночастиною, то фрактальність поверхні агрегатів наночастинок відіграє ключову роль.

Таблиця 1. Підгоночні параметри моделі, описаної рівнянням (2)

| Зразок          | Міжфазний шар |          |       | Об'ємна фаза |            |
|-----------------|---------------|----------|-------|--------------|------------|
|                 | $C_1$ , мкФ   | $\alpha$ | $D_1$ | $R_2$ , кОм  | $C_2$ , нФ |
| ПЕО             | 9,7           | 0,775    | 2,290 | 5,6          | 18,3       |
| ПЕО+0,5 % AgNPs | 16,6          | 0,745    | 2,342 | 5,2          | 29,3       |
| ПЕО+1 % AgNPs   | 17,2          | 0,744    | 2,345 | 3,5          | 32,0       |
| ПЕО+1,5 % AgNPs | 16,2          | 0,764    | 2,308 | 4,6          | 19,9       |
| ПЕО+3 % AgNPs   | 8,8           | 0,781    | 2,280 | 7,7          | 19,0       |

Оскільки СРЕ зазвичай використовують для компенсування неоднорідностей на межах розподілу фаз, в деяких моделях пропонується описувати поведінку імпедансу у рамках фрактального підходу [13]. Одна з таких тео-

рій, теорія електроду з фрактальною поверхнею, встановлює взаємозв'язок між  $\alpha$  та ефективною фрактальною розмірністю  $D$  [13]:

$$\alpha = 1 / (D - 1) . \quad (3)$$

Відповідно до фрактального підходу для неоднорідної фрактальної поверхні фрактальна розмірність ( $D$ ) лежить в межах від 2 до 3. Значення фрактальної розмірності для досліджуваних систем наведено в таблиці 1 та на рисунку 5.

З таблиці 1 та рисунка 5 видно, що  $D$  міжфазного шару варіюється у межах від 2,74 до 2,81. Це свідчить про те, що поверхня міжфазних шарів проявляє фрактальну поведінку.

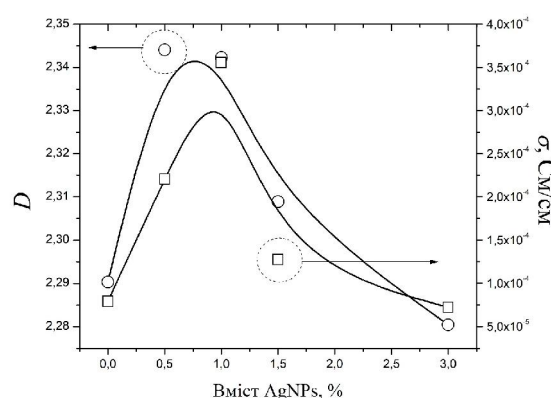


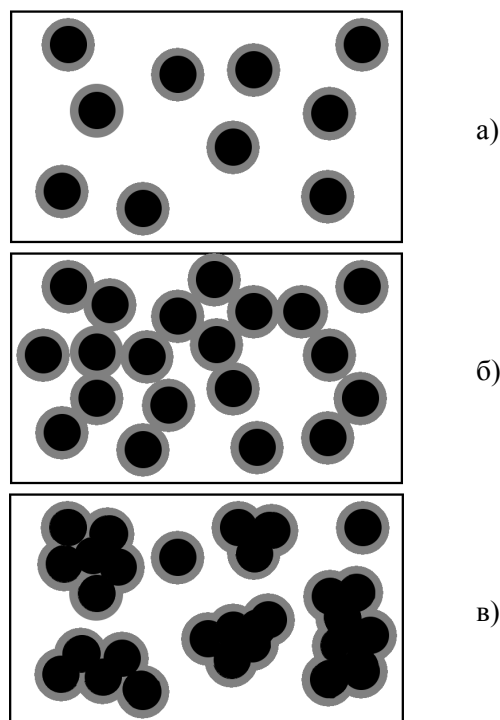
Рисунок 5. Залежності фрактальної розмірності та питомої електропровідності при постійному струмі від вмісту наповнювача для систем на основі ПЕО

За частот, нижчих за частоту, що відповідає мінімуму  $Z''$ , поверхневі процеси домінують над об'ємними, а значення  $Z'$  цих мінімумів відповідають об'ємному опору матеріалу  $R_{dc}$ . Із імпедансних спектрів було визначено провідність при постійному струмі

$$\sigma_{dc} = \frac{d}{SR_{dc}}, \text{ де: } S - \text{площа зразка; } d - \text{товщина}$$

зразка. Залежність електропровідності при постійному струмі від вмісту наповнювача для систем ПЕО-AgNPs наведено на рисунку 5.

Із графіка видно, що електропровідність, як і більшість параметрів, встановлених за допомогою інших підходів, проявляє екстремальну поведінку. Вона спочатку зростає, досягаючи максимуму при 1 % вмісті AgNPs, а потім спадає. Таку поведінку вивчених характеристик можна пояснити зміною характеру розподілу частинок наповнювача у полімерній матриці. Схематично характер розподілу частинок наповнювача у матриці зображено на рисунку 6.



**Рисунок 6. Схематичне зображення розподілу AgNPs у матриці ПЕО. Чорним кольором показано ядро зі срібла, а сірим – оболонку міжфазного шару**

Відомо, що навколо неорганічної наночастинки у нанокompозитній системі утворюється міжфазний шар [14]. Цей шар складається із іммобілізованих макромолекул полімеру, які не здатні утворювати компакту упаковку, тобто цей шар є повністю аморфним. Зі зростанням частки такого шару система більше аморфізується. При невеликому вмісті наповнювача (менше 1 %) завдяки потужній ультразвуковій обробці частинки AgNPs рівномірно розподіляються у матриці (рисунок 6, а). При цьому частка міжфазного шару зростає і досягає максимуму при вмісті наповнювача, рівному 1 %. При такому наповненні частинки ще не агрегують, а сумарна поверхня взаємодії між матрицею та наповнювачем є максимальною (рисунок 6, б). Після зростання вмісту наповнювача (більше 1 %) частинки AgNPs починають інтенсивно агрегувати (рисунок 6, в), що приводить до зменшення площі взаємодії матриця-наповнювач [15]. У результаті частка міжфазного шару знижується, що приводить до зниження фрактальної розмірності й електропровідності, яка реалізується переважно завдяки переносу зарядів через аморфну область полімеру. Також на поверхні AgNPs знаходяться

макромолекули іонної рідини, які також роблять свій внесок у загальну електропровідність системи.

**Висновки.** У роботі було запропоновано новий підхід до синтезу стабілізованих наночастинок срібла та досліджено електричні властивості полімерних нанокompозитних матеріалів на основі поліетиленоксиду. Отримані наночастинок являють собою об'єкти типу «ядро-оболонка», всередині частинки знаходиться ядро із срібла, вкрите оболонкою із гіперрозгалуженої іонної рідини.

Встановлено, що стабілізовані наночастинок срібла суттєво впливають на електричні властивості полімерної матриці при відносно низьких концентраціях нанонаповнювача (~ 1 %). При цьому електропровідність проявляє екстремальну поведінку зі збільшенням вмісту наповнювача у системі. Визначено, що найбільший вплив на електричні властивості досліджуваних систем спостерігається при концентрації наночастинок срібла, рівній 1 %. Зроблено припущення, що у системах на основі ПЕО існує два механізми переносу зарядів: перескок зарядів у кристалічній фазі ПЕО та перенос, який забезпечується сегментальною рухливістю поліетерних ланцюгів в аморфній фазі ПЕО. Встановлено, що вирішальний вплив на електричні властивості нанокompозитних систем на основі ПЕО при низьких концентраціях наночастинок срібла мають процеси агрегації наповнювача і частка міжфазного шару. Виявлено, що при вмісті наповнювача, рівному 1 %, частка міжфазного шару у системі є максимальною. Перспективою подальших досліджень є встановлення впливу високих концентрацій наночастинок срібла на електричні властивості та перколяційну поведінку систем на основі поліетиленоксиду. Також цікавим, з практичної точки зору, стане введення наночастинок срібла в еластомерні полімерні матриці, наприклад поліетеруретани, для створення на їх основі багатофункціональних покриттів із поліпшеними властивостями.

Робота виконувалася у рамках науково-дослідної теми «Розробка інноваційних технологій створення новітніх срібловмісних антимікробних нанокompозитних полімерних матеріалів із заданими багатофункціональними характеристиками спеціального призначення», що фінансується з державного бюджету України. Номер державної реєстрації 0122U002326.

**Список використаних джерел / References**

- [1] J. Wan, B. Fan, and S. H. Thang, "Sonochemical preparation of polymer-metal nanocomposites with catalytic and plasmonic properties", *Nanoscale Adv.*, vol. 3, pp. 3306-3315, 2021.
- [2] D. Giliopoulos, A. Zamboulis, D. Giannakoudakis, D. Bikiaris, and K. Triantafyllidis, "Polymer/metal organic framework (MOF) nanocomposites for biomedical applications", *Molecules*, vol. 25, no. 1, p. 185, 2020.
- [3] D. Olmos, and J. González-Benito, "Polymeric materials with antibacterial activity: A review". *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 4, p. 613, 2021.
- [4] M. Jokar, K. Loeschner, and A. M. Nafchi, "Modeling of silver migration from polyethylene nanocomposite package response surface methodology", *International Journal of Food Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 96-102, 2016.
- [5] M. O. Farea, A. M. Abdelghany, and A. H. Oraby, "Optical and dielectric characteristics of polyethylene oxide/sodium alginate-modified gold nanocomposites", *RSC Adv.*, vol. 10, p. 37621, 2020.
- [6] E. A. Lysenkov, E. V. Lobko, V. V. Klepko, and I. P. Lysenkova, "Influence of the various preparation methods on percolation behavior of the systems based on cross-linked polyurethanes and carbon nanotubes", *Functional materials*, vol. 25, no. 1, pp. 75-81, 2018.
- [7] M. Jouni, A. Boudenne, G. Boiteux, V. Massardier, B. Garnier, and A. Serghei, "Electrical and thermal properties of polyethylene/silver nanoparticle composites", *Polymer Composites*, vol. 34, no. 5, pp. 778-786, 2013.
- [8] S. Sirohi et al., "Effect of nanoparticle shape on the conductivity of Ag nanoparticle poly(vinyl alcohol) composite films", *Polym. Int.*, vol. 68, no. 12, pp. 1961-1967, 2019.
- [9] L. Rivière, N. Causse, A. Lonjon, E. Dantras, and C. Lacabanne, "Specific heat capacity and thermal conductivity of PEEK/Ag nanoparticles composites determined by modulated-temperature differential scanning calorimetry", *Polymer Degradation and Stability*, vol. 127, pp. 98-104, 2016.
- [10] V. V. Shevchenko, A. V. Stryutsky, N. S. Klymenko et al., "Protic and aprotic anionic oligomeric ionic liquids", *Polymer*, vol. 55, no. 16, pp. 3349-3359, 2014.
- [11] S. A. Grammatikos, R. J. Ball, M. Evernden, and R. G. Jones, "Impedance spectroscopy as a tool for moisture uptake monitoring in construction composites during service", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 105, pp. 108-117, 2018.
- [12] J. R. Macdonald, and W. B. Johnson, "Fundamentals of impedance spectroscopy", in *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications, Third Edition*. John Wiley & Sons, Inc., 2018, pp. 1-20.
- [13] A. Singh et al., "Galvanostatic deposition of manganese oxide films for super capacitive application and their fractal analysis", *Ionics*, vol. 27, pp. 2193-2202, 2021.
- [14] J. Huang, J. Zhou, and M. Liu, "Interphase in polymer nanocomposites", *JACS Au*, vol. 2, no. 2, pp. 280-291, 2022.
- [15] S. Shrestha, B. Wang, and P. Dutta, "Nanoparticle processing: Understanding and controlling aggregation", *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 279, p. 102162, 2020.

**E. A. Lysenkov, Dr. Sc., Professor,**

e-mail: ealysenkov@ukr.net

Petro Mohyla Black Sea National University,  
68 Desantnykiv St., 10, Mykolaiv, 54003, Ukraine

**O. V. Strutkyi, Ph. D.**

Institute of Macromolecular Chemistry of NAS of Ukraine,  
Kharkivske Highway, 48, Kyiv, 02160, Ukraine

**ELECTRICAL PROPERTIES OF POLYMER NANOCOMPOSITES  
BASED ON POLYETHYLENE OXIDE AND SILVER NANOPARTICLES  
IN THE AREA OF LOW FILLER CONCENTRATIONS**

*Polymer nanocomposite materials filled with silver nanoparticles are promising because they combine the properties of polymers and inorganic substances. Such materials have wide practical applications, in particular as antimicrobial and electrostatic coatings. The vast majority of works study*

*the polymer-silver nanoparticles system with a high filler content. However, due to the nanosize of the filler in the area of low concentrations, effects may appear that require detailed study. The purpose of this work has been the development of a new material based on polyethylene oxide (PEO) and synthesized and stabilized silver nanoparticles, as well as the study of its electrical properties in the area of low filler concentrations. The paper has developed a new approach to the synthesis of silver nanoparticles. Using this approach, stabilized silver nanoparticles have been synthesized. Using the method of impedance spectroscopy, the electrical properties of polymer nanocomposite materials based on PEO and synthesized silver particles in the area of low filler concentrations have been investigated. It is assumed that in systems based on PEO, there are two mechanisms of charge transfer: charge hopping in the crystalline phase of PEO and transfer provided by the segmental mobility of polyether chains in the amorphous phase of PEO. As a result, it is established that stabilized silver nanoparticles significantly affect the electrical properties of the nanocomposite material at relatively low concentrations of the nanofiller (1%). The electrical conductivity of the studied materials depends extremely on the content of the filler. This dependence is explained by the aggregation processes of nanoparticles in the polymer matrix, which changes the proportion of the interfacial layer due to additional amorphization of the system. It is assumed that with a 1% content of silver nanoparticles, the total area of the interfacial layer is maximal.*

**Keywords:** *electrical conductivity, interfacial layer, aggregation, composite, nanofiller, impedance spectroscopy.*

**Е. А. Лисенков**, д-р фіз.-мат. наук, професор,  
e-mail: ealysenkov@ukr.net

Чорноморський національний університет імені Петра Могили,  
вул. 68 десантників, 10, м. Миколаїв, 54003, Україна

**О. В. Стрюцький**, канд. хім. наук

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України,  
Харківське шосе, 48, м. Київ, 02160, Україна

### **ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ПОЛІЕТИЛЕНОКСИДУ ТА НАНОЧАСТИНОК СРІБЛА В ОБЛАСТІ НИЗЬКИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ НАПОВНЮВАЧА**

*Полімерні наноккомпозитні матеріали, наповнені наночастинками срібла, є перспективними, адже поєднують у собі властивості полімерів та неорганічних речовин. Такі матеріали мають широке практичне застосування, зокрема як антимікробні та електростатичні покриття. Переважна більшість робіт вивчає систему полімер-наночастинки срібла при високому вмісті наповнювача. Однак через нанорозміри наповнювача в області низьких концентрацій можуть проявлятися ефекти, які потребують детального вивчення. Метою роботи була розробка нового матеріалу на основі поліетиленоксиду (ПЕО) та синтезованих і стабілізованих наночастинок срібла, а також дослідження його електричних властивостей в області низьких концентрацій наповнювача. У роботі розроблено новий підхід до синтезу наночастинок срібла. Використовуючи цей підхід, синтезовано стабілізовані наночастинки срібла. Використовуючи метод імпедансної спектроскопії, досліджено електричні властивості полімерних наноккомпозитних матеріалів на основі ПЕО та синтезованих частинок срібла в області низьких концентрацій наповнювача. Зроблено припущення, що в системах на основі ПЕО існує два механізми переносу зарядів: перескок зарядів у кристалічній фазі ПЕО та перенос, який забезпечується сегментальною рухливістю поліетерних ланцюгів в аморфній фазі ПЕО. У результаті встановлено, що стабілізовані наночастинки срібла істотно впливають на електричні властивості наноккомпозитного матеріалу при відносно низьких концентраціях нанонаповнювача (1 %). Електропровідність досліджуваних матеріалів екстремально залежала від вмісту наповнювача. Така залежність пояснюється агрегаційними процесами наночастинок у полімерній матриці, що змінює частку міжфазного шару за рахунок додаткової аморфізації системи. Зроблено припущення, що при 1 % вмісті наночастинок срібла сумарна площа міжфазного шару є максимальною.*

**Ключові слова:** *електропровідність, міжфазний шар, агрегація, композит, нанонаповнювач, імпедансна спектроскопія.*

Наукове видання

ВІСНИК  
Черкаського державного  
технологічного університету  
3 • 2022

VISNYK  
Cherkaskogo derzhavnogo  
tehnologichnogo universitetu  
3 • 2022

BULLETIN  
of Cherkasy State  
Technological University  
3 • 2022

*Статті друкуються в авторській редакції.*

*За точність і коректність посилань та достовірність фактичного матеріалу  
відповідальність несуть автори. Точка зору редколегії не завжди збігається  
з позицією авторів. Матеріали друкуються з максимальним збереженням  
авторської стилістики та орфографії.*

*Технічний редактор К. В. Давиденко  
Коректура: Т. В. Костенко*

Видавець – Черкаський державний технологічний університет  
бульвар Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006.  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 896 від 16.04.2002 р.

Виготівник – ФОП ГОРДІЄНКО Є.І.  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,  
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції Серія ДК № 4518 від 04.04.2013 р.  
Україна, 18000, м. Черкаси тел./факс: (0472) 56-56-12, (067) 444-28-94  
e-mail: [book.druk@gmail.com](mailto:book.druk@gmail.com)

---

Формат 60x84 1/8. Гарнітура Times New Roman.  
Умовн. друк. арк. 11,8. Обл.-вид. арк. 12,8. Наклад 60 прим. Вид. № 22-86.