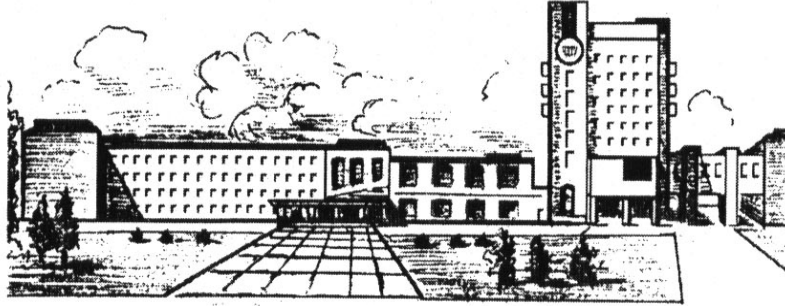


ISSN 2411-5363 (print)  
ISSN 2519-4569 (online)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**



# ***ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ***

***НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ***

***№ 4(34)***

Чернігів 2023

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 14 від 22.12.2023 р.). Науковий журнал «Технічні науки та технології» внесено до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України від 11.07.2019 р. № 975 (зі змінами від 09.02.2021 № 157), відповідно до якого журналу надано категорію «Б».

**Технічні науки та технології** : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – № 4(34). – 278 с.

У журналі вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у науковому напрямі «Технічні науки» за спеціальностями: прикладна механіка, матеріалознавство, машинобудування, інформаційно-комп'ютерні технології, електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, хімічні та харчові технології, будівництво та геодезія. Статті прорецензовані провідними вченими у відповідних галузях знань.

Журнал «Технічні науки та технології» буде корисним для науковців, науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та студентів технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

УДК 62:67.05

**Головний редактор:**

Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка».

**Заступник головного редактора:**

Сапон С. П., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

**Члени редакційної колегії:****Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування**

Бойко С. В., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Болотов Г. П., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Дмитрієв Д. О., доктор технічних наук, професор, Херсонський національний технічний університет;

Єрошенко А. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Кальченко В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Кальченко В. І., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Марков О. Є., доктор технічних наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія;

Новомлинцев О. О., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Пилипенко О. І., доктор технічних наук, професор;

Повстаной О. Ю., доктор технічних наук, професор, Луцький національний технічний університет;

Сіра Н. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Федориненко Д. Ю., доктор технічних наук, професор, Tohoku University, Японія;

Ющенко С. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

**Інформаційно-комп'ютерні технології**

Азаров О. Д., доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет;

Дорош М. С., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Єременко В. С., доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»;

Зайцев С. В., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Криворучко О. В., доктор технічних наук, професор, Державний торговельно-економічний університет;

Мелешко С. В., доктор технічних наук, доцент, Центральноросійський національний технічний університет;

Павленко П. М., доктор технічних наук, професор, Національний авіаційний університет;

Семенов С. Г., доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Цюцюра С. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури.

**Енергетика, електротехніка та електромеханіка**

Вініков Д., доктор технічних наук, професор, Таллінський університет технологій (Естонія);

Волков І. В., доктор технічних наук, професор, Інститут електродинаміки НАН України;

Галкін І., доктор технічних наук, професор, Ризький технічний університет (Латвія);

Гусев О. О., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Денисов Ю. О., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Приступа А. Л., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Ромеро-Кававал Е., доктор технічних наук, професор, Університет Естремадури (Іспанія);

Степенко С. А., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

**Хімічні та харчові технології**

Антонюк І. Ю., кандидат технічних наук, доцент, Державний торговельно-економічний університет;

Буяльська Н. П., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Гуменюк О. Л., кандидат хімічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Дударев І. М., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Звірко О. І., доктор технічних наук, професор, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України;

Плаван В. П., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну;

Самохвалова О. В., кандидат технічних наук, професор, Харківський державний університет харчування та торгівлі;

Сиза О. І., доктор технічних наук, професор, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка;

Трус І. М., кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»;

Цибуля С. Д., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Челябієва В. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

**Будівництво та геодезія**

Білик С. І., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Крячок С. Д., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Михайловський Д. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Паляниця Б. Б., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Львівська політехніка»;

Савенко В. І., кандидат технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Терещук О.І. кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

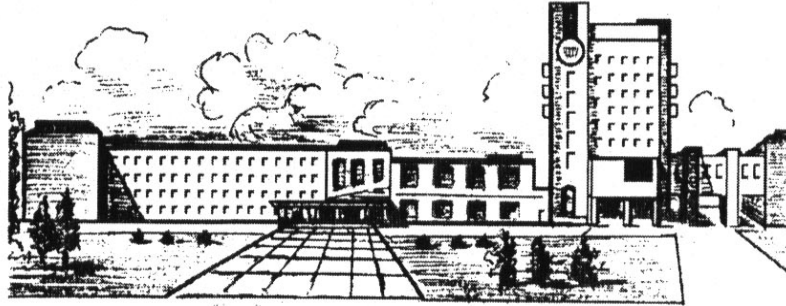
Шульц Р. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Юрченко В. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури.



ISSN 2411-5363 (print)  
ISSN 2519-4569 (online)

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
CHERNIHIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY**



# ***TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES***

***SCIENTIFIC JOURNAL***

***ISSUE № 4(34)***

Chernihiv 2023

UDC 62:67.05

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-2(32)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv Polytechnic National University (protocol № 14 бiд 22.12.2023). Scientific journal "Technical sciences and technologies" is included into the list of scientific specialized editions of Ukraine, approved by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated July 11, 2019 № 975 (as amended from February 9, 2021 № 157), according to which magazine is assigned a category «B».

**Technical sciences and technologies** : scientific journal / Chernihiv Polytechnic National University. – Chernihiv : Chernihiv Polytechnic National University, 2023. – № 4 (34). – 278 p.

This journal contains articles devoted to theoretical and experimental research in the scientific direction "Technical Sciences" by specialties: applied mechanics, materials science and machine building, information and computer technologies, electric power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering, chemical and food technologies, construction and geodesy. The articles are reviewed by leading scientists in relevant fields of knowledge.

Journal "Technical sciences and technologies" will be useful for the scientific and technical workers, postgraduates, master students and students of higher technical educational establishment.

UDC 62:67.05

**Editor in chief:**

Kazymyr V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

**Deputy Editor in chief:**

Sapon S.P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University.

**Members of the Editorial Board:**

Applied mechanics, materials science and machine building

Boyko S.V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Bolotov H.P., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Dmytriiiv D.O., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kherson National Technical University;

Yeroshenko A.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Kalchenko V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Kalchenko V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Markov O.Ye., Doctor of Technical Sciences, Professor, Donbaska derzhavna mashynobudivna akademiia;

Novomlynets O.O., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Pilipenko O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor;

Povstianoi O.Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor, Lutsk National Technical University;

Sira N.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University»;

Fedorynenko D.Yu. Doctor of Technical Sciences, Professor, Tohoku University, Japan;

Yushchenko S.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University».

Information and computer technologies

Azarov O.D., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University;

Dorosh M.S., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University»;

Yeremenko V.S., Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»;

Zaitsev S.V., Doctor of Technical Sciences, Chernihiv Polytechnic National University.

Kazymyr V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Kryvonuchko O.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, State University of Trade and Economics;

Meleshko Ye.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Central Ukrainian National Technical University;

Pavlenko P.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Aviation University;

Semenov S.H., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»;

Tsiutsiura S.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture.

Power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering

Vinnikov D., Doctor of Science, Senior Researcher, Head of Power Electronics R&D Group, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia;

Volkov I.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine;

Galkin I., Doctor of Science, Professor, Riga Technical University, Riga, Latvia;

Husev O.O., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Denysov Yu.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Prystupa A.L., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Romero-Cadaval E., Doctor of Science, Professor, University of Extremadura, Badajoz, Spain;

Stepenko S.A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Chemical and food technologies

Antoniuk I.Yu., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, State University of Trade and Economics;

Buialska N.P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Gumeniuk O.L., PhD in Chemical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Dudarev I.M., Doctor of Technical Science, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Zvirko O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine;

Plavan V.P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Technologies and Design;

Samokhvalova O.V., PhD in Technical Sciences, Professor, Kharkiv State University of Food Technology and Trade;

Syza O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Taras Shevchenko National University «Chernihiv Collegium»;

Trus I. M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»;

Tsybulia S.D., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Cheliabiieva V.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Construction and geodesy

Bilyk S.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Kriachok S.D., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Mykhailovskiy D.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Palianytsia B.B., PhD in Technical Sciences, PhD in Technical Sciences, Lviv Polytechnic National University;

Savenko V.I., PhD in Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Shults R.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Tereshchuk O.I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University

Yurchenko V.V., Doctor of Technical Sciences, PhD in Technical Sciences, Kyiv National University of Construction and Architecture.



## ЗМІСТ

РОЗДІЛ I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО  
ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

|                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Анікін П., Шило Г.</i> Вдосконалення процесу адитивного виробництва алюмінієвої деталі з використанням технології електродугового зварювання.....                                  | 9  |
| <i>Болотов Г., Болотов М., Руденко М., Гречка В.</i> Активація процесів масопереносу при дифузійному зварюванні у тліючому розряді. ....                                              | 23 |
| <i>Жерносеков А., Костін В.</i> Вплив імпульсно-дугового зварювання в захисних газах на розподіл неметалевих включень у металі швів низьколегованих сталей. ....                      | 32 |
| <i>Кравець В., Кравець О., Лапковський С., Фролов В., Гладський М., Данилова Л.</i> Системно-структурний аспект вибору елементів робототехнічних систем.....                          | 40 |
| <i>Васильєв О., Яковенко А.</i> Вібраційна машина для підготовки та ущільнення поверхонь ...                                                                                          | 52 |
| <i>Клименко А., Сазанішвілі З.</i> Розробка термостійких покриттів триботехнічного призначення на основі мета-араміду .....                                                           | 61 |
| <i>Мановицький О., Клименко С., Рижов Ю., Сапон С.</i> Визначення миттєвих значень кутів у плані інструменту й величин контурної подачі під час точіння деталі складного профілю..... | 67 |

## РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

|                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Mishchenko L., Klymenko I.</i> Method for detecting fake news through writing style.....                                                                            | 82  |
| <i>Борода А., Петренко Т.</i> Вплив атак за побічними каналами на інформаційну безпеку .....                                                                           | 91  |
| <i>Буйвал Л.</i> Метод тривимірного параметричного моделювання типового кронштейна на основі примітивів за допомогою комп'ютерної інтегрованої системи Siemens NX..... | 104 |

## РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

|                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Ishchenko O., Sumska O., Smykalo K., Feshchuk Yu., Kuchynska D.</i> Antimicrobial approaches for textiles.....                                                  | 115 |
| <i>Plavan V., Tarasenko N., Lisovska I.</i> Application of fibrous materials with sorption properties in water purification technologies .....                     | 129 |
| <i>Вітряк О., Замай Ж., Фабріченко К.</i> Безлактозні йогурти з додаванням рослинної сировини.....                                                                 | 138 |
| <i>Зайцев С.</i> Удосконалення методів визначення впливу електричних розрядів на деградацію турбінних олив. ....                                                   | 147 |
| <i>Паляниця Л., Березовська Н.</i> Вплив сортів спельти на технологічні показники спиртової бражки. ....                                                           | 163 |
| <i>Маренкова Т., Серета О.</i> Якісні показники тіста для вареників із використанням імеретинського шафрану. ....                                                  | 174 |
| <i>Серета О., Мельник О.</i> Дослідження фізико-хімічних характеристик збивного борошняного напівфабрикату з борошном із цвіркунів. ....                           | 182 |
| <i>Павлюк С., Філінська Т., Суха І., Філінська А.</i> Дослідження безпечності використання ПЕТ пляшок із вторинної сировини для пакування харчових продуктів. .... | 188 |
| <i>Совгуть М., Косогін О.</i> Електрохімічне визначення формальдегіду.....                                                                                         | 195 |

## РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

|                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Денисов Ю., Скугарєв В.</i> Шляхи зменшення впливу пульсацій перетворювачів на показники енергодинамічної енергоефективності бортових систем силової електроніки. .... | 207 |
| <i>Пристуна А., Ревко А., Маргасова В., Новик К.</i> Система енергозабезпечення станції гідрометеорологічних спостережень.....                                            | 221 |

## РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

|                                                                                                                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Нестеренко С., Радзінська Ю., Халіков С., Фролов О.</i> Інституційні особливості оцінки об'єктів підземної нерухомості.....                                                   | 236        |
| <i>Петрикова Є., Амеліна Н., Майстренко А., Бердник О.</i> Дослідження впливу добавок на отримання низькотемпературних режимів у технології виробництва залізобетонних шпал..... | 243        |
| <i>Стадніков В., Ліхва Н., Константінова О., Колосюк А.</i> Досвід застосування ГІС-технологій при створенні (оновленні) цифрових топографічних карт масштабу 1:25000 .....      | 255        |
| <i>Тадєєв О.</i> Перспективи оцінювання тривимірних деформацій землі за даними глобальних навігаційних супутникових систем.....                                                  | 265        |
| <b>ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ.....</b>                                                                                                              | <b>277</b> |

## CONTENT

SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE  
AND MACHINE BUILDING

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Anikin P., Shilo G.</i> Enhancement of wire arc additive manufacturing production of aluminum part .....                                                                        | 9  |
| <i>Bolotov G., Bolotov M., Rudenko M., Grechka V.</i> Activation of mass transfer processes in diffusion welding in a glow discharge .....                                         | 23 |
| <i>Zhernosekov A., Kostin V.</i> Influence of pulse arc welding in shielding gases on the distribution of non-metallic inclusions in weld metal of low-alloy steel .....           | 32 |
| <i>Kravets V., Kravets O., Lapkovsky S., Frolov V., Gladskiy M., Danylova L.</i> System-structural aspect of the selection elements of robotic systems .....                       | 40 |
| <i>Vasyliiev A., Yakovenko A.</i> Vibrating machine for surface preparation and sealing .....                                                                                      | 52 |
| <i>Klymenko A., Sazanishvili Z.</i> Development of heat-resistant tribological coatings based on meta-aramid.....                                                                  | 61 |
| <i>Manovytsky O., Klymenko S., Ryzhov Y., Sapon S.</i> Messuring the exact values of angles in a tool plan and contour feed rates when turning a part with a complex profile ..... | 67 |

## SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

|                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Mishchenko L., Klymenko I.</i> Method for detecting fake news through writing style .....                                                                    | 82  |
| <i>Boroda A., Petrenko T.</i> Impact of attacks through side channels on information security .....                                                             | 91  |
| <i>Buival L.</i> Method of three-dimensional parametric modeling of a typical bracket based on primitives using the siemens nx computer integrated system ..... | 104 |

## SECTION III. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

|                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Ishchenko O., Sumska O., Smykalo K., Feshchuk Yu., Kuchynska D.</i> Antimicrobial approaches for textiles.....                                       | 115 |
| <i>Plavan V., Tarasenko N., Lisovska I.</i> Application of fibrous materials with sorption properties in water purification technologies.....           | 129 |
| <i>Vitriak O., Zamai Z., Fabrychenko K.</i> Lactose-free yogurts with the addition of plant raw materials.....                                          | 138 |
| <i>Zaitsev S.</i> Improvement of methods for determining the effect of electrical discharges on the degradation of turbine oils .....                   | 147 |
| <i>Palianytsia L., Berezovska N.</i> The influence of spelt varieties on alcohol mash technological indicators .....                                    | 163 |
| <i>Marenkova T., Sereda O.</i> Quality indicators of dough for dumplings using imerety saffron.....                                                     |     |
| <i>Sereda O., Melnyk O.</i> Investigation of the physical and chemical characteristics of the semi-finished flour with chicken flour .....              | 174 |
| <i>Pavliuk S., Filinska T., Sukha I., Filinska A.</i> Research on the safety of using pet bottles from secondary raw materials for food packaging ..... | 182 |
| <i>Sovhut M., Kosohin O.</i> Electrochemical determination of formaldehyde.....                                                                         | 195 |

## SECTION IV. ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

|                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Denisov Y., Skuhariiev V.</i> The ways reduced the influence of pulsations reversing the indicators of energy dynamic energy efficiency of on-board power electronics systems ..... | 207 |
| <i>Prystupa A., Revko A., Margasova V., Novyk K.</i> Energy supply system for the hydrometeorological observation station.....                                                         | 221 |

**SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY**

*Nesterenko S., Radzinska Yu., Khalikov S., Frolov A.* Institutional peculiarities of underground real estate valuation .....236

*Petrikova Y., Amelina N., Maistrenko A., Berdnyk O.* Studying the influence of additives on obtaining low temperature regimes in the production technology of reinforced concrete sleepers 243

*Stadnikov V., Likhva N., Konstantinova O., Kolosiuk A.* Experience in using gis technologies in creating (updating) digital topographic maps on a scale of 1:25000.....255

*Tadyeyev O.* Prospects for evaluation of three-dimensional deformations of the earth based on data from global navigation satellite systems.....265

**BASIC REQUIREMENTS FOR FORMATION AND SUBMISSION  
OF ARTICLE MANUSCRIPTS..... 277**



# РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI 10.25140/2411-5363-2023-4(34)-9-22

УДК 681.6:621.791.75

*Павло Анікін<sup>1</sup>, Галина Шило<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>аспірант кафедри телекомунікації та радіотехніки

Національний університет «Запорізька політехніка» (Запоріжжя, Україна)

E-mail: [anikinps@zntu.edu.ua](mailto:anikinps@zntu.edu.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6767-784X>. ResearcherID: [JDD-8719-2023](https://orcid.org/JDD-8719-2023)

<sup>2</sup>доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерних наук

Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)

E-mail: [shilo.gn@gmail.com](mailto:shilo.gn@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5020-6707>. ResearcherID: [H-1884-2019](https://orcid.org/H-1884-2019)

## ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА АЛЮМІНІЄВОЇ ДЕТАЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

*У статті розроблено архітектуру процесу друку з використанням телекомунікаційної системи зворотного зв'язку, що вдосконалює процес адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання та дозволяє контролювати температуру під час друку за допомогою лазерів та теплової камери. У програмному забезпеченні ABAQUS проведено симуляцію процесу адитивного виробництва трьох рівнів трирівневої ієрархічної системи з урахуванням вимог до технологічності та якості отриманої деталі, таких як її геометричні розміри, залишкові напруження та збереження оптимальної швидкості виробництва. Створено оптимальну траєкторію та параметри друку для визначеної деталі. Отримані дані використано для подальшої можливості генерації автоматизованої програми для керування роботом під час процесу адитивного виробництва. Визначено залишкові напруження та можливість дефектів у виготовленій деталі.*

**Ключові слова:** електродугове зварювання; САЕ системи; робототехніка; 3D моделювання; Abaqus; телекомунікації.

Табл.: 2. Рис.: 15. Бібл.: 16.

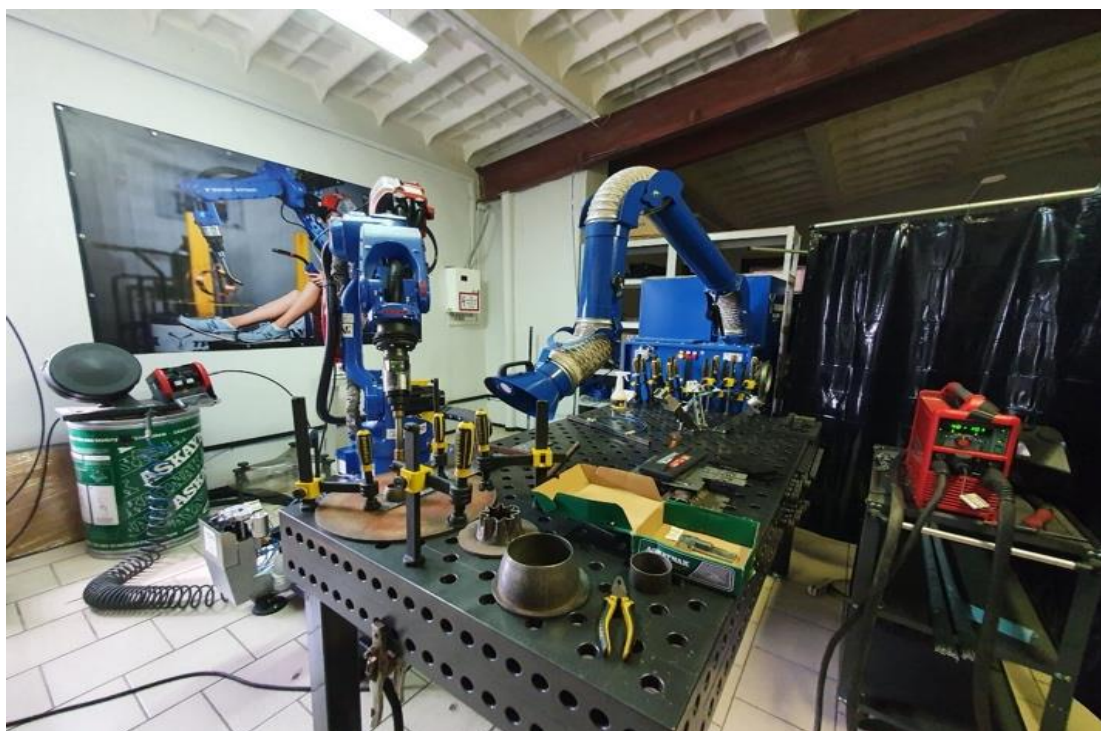
**Актуальність теми дослідження.** На сьогодні процес адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання й досі перебуває у стадії розвитку та постійного вдосконалення. Проблеми контролю розповсюдження тепла під час друку металу, що переливаються в розповсюдження залишкових напружень, потребують вирішення за допомогою використання теплових лазерних датчиків та теплокамер, а також безпосередньої симуляції процесу перед його впровадженням. Встановлення бездротових систем зворотного зв'язку контролю якості друку та розповсюдження тепла допомагають досягти більш точного інспектування процесу адитивного виробництва, знижуючи ризик появи дефектів та забезпечуючи високу якість виготовлених алюмінієвих деталей, а також полегшити та поліпшити роботу користувача із системою. Застосування таких інноваційних рішень стимулює розвиток адитивного виробництва й відкриває нові перспективи для його використання в різних галузях промисловості. Дані отримані з нових досліджень використовуються не тільки для покращення якості виробництва, але і для впровадження автоматизованих систем використання робототехніки адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Запроваджені сучасні методи вирішення проблем адитивного виробництва з використанням технології електродугового зварювання [1-4] вказують на те, що проведення автоматизованого друку потребує подальшого вдосконалення. Для покращення якості процесу виробництва використовуються сучасні методи контролю за температурою [5-7], проте й вони не є автоматизованими. Однією з проблем під час адитивного виробництва є перекриття валиків [8-9], параметри якого залежать так само й від розповсюдження тепла між ними [10-12]. Надмірний термальний вплив без належного контролю може не тільки погіршити якість створюваної деталі але й призвести до

її тотального руйнування. Контроль температури може здійснюватися попередньо за допомогою симуляції та вибору траєкторії руху роботизованої руки під час процесу адитивного виробництва [13]. Для процесу симуляції теплового режиму друку з використанням електродугового зварювання у комп'ютерних обчислювальних програмах може використовуватися рівняння розповсюдження тепла Голдаку [14-15].

$$q_{f/r} = \frac{6\sqrt{3}f_{f/r}Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{\left(\frac{3x^2}{c_{f/r}^2}\right)} e^{\left(\frac{-3y^2}{a^2}\right)} e^{\left(\frac{-3z^2}{b^2}\right)}. \quad (1)$$

Формула  $Q = nVI$  визначає розповсюдження енергії і залежить від току ( $I$ ), напруги ( $V$ ) та коефіцієнта ефективності ( $n$ ). Розміри розповсюдження тепла в еліпсоїдній формі визначаються величинами  $a$ ,  $b$  і  $c$ . Частковими факторами кількості тепла є  $f$ , що вводиться на передній та задній квадрати моделі. Зауважимо, що сума двох факторів моделі дорівнює  $fr + ff = 2$ .



*Рис. 1. Роботизована система адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання на ТОВ «Триада ЛТД Ко»*  
Джерело: розроблено авторами.

Попередні дослідження [16] з використанням симуляції тривірневої ієрархічної системи для процесу адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання показують можливість оптимізації процесу друку. Зокрема використанням алгоритму проведення симуляції одного з рівнів системи. Особлива увага в дослідженні приділяється порівнянню отриманих результатів залишкових напружень в різних типах валиків та температурних режимах. Це дозволяє визначити оптимальні умови для проведення процесу друку з використанням електродугового зварювання. Аналізуючи ці результати, дослідники можуть виявити найбільш ефективні параметри та засоби оптимізації, що сприятимуть поліпшенню процесу друку та підвищенню якості виготовлених виробів.

**Метою роботи** є вдосконалення процесу розробки алюмінієвого виробництва за допомогою адитивних технологій з використанням електродугового зварювання. Використання тривірневої ієрархічної системи для проведення симуляції можливості покращення

процесу друку трирівневої алюмінієвої деталі та проведення подальшого реального експерименту. Вибір та встановлення необхідних телекомунікаційних лазерних датчиків тепла та теплокамери до роботизованої системи. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- встановити параметри необхідної деталі;
- провести симуляцію трьох рівнів ієрархічної системи;
- за наявності проблем з температурними режимами під час симуляції віднайти спосіб їх вирішення;
- встановити можливість проведення подальшого практичного експерименту, виходячи з отриманих даних;
- обрати необхідні типи теплових лазерних датчиків та теплокамери для проведення реального експерименту;
- на основі отриманих даних встановити можливість початку процесу створення автоматизованої програми для процесу адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання.

Під час проведення симуляції можуть виникнути проблеми з тепловими режимами, зокрема, надмірне розповсюдження тепла, критичне накопичення тепла тощо. Необхідно встановити, як можна відслідковувати ці проблеми та як їх вирішити.

**Виклад основного матеріалу.** Можливості вдосконалення процесу виробництва за допомогою 3D-друку з використанням технології електродугового зварювання отримані з оцінки симуляційних даних температурних режимів та залишкових напружень. Для процесу симуляції алюмінієвої деталі використовується трирівнева ієрархічна модель. Обирається матеріал виробу, геометричні розміри валику, шару та стінки. Проходить оцінка міжрівневих характеристик та обрання необхідних змін для успішного закінчення процесу виробництва. Весь процес проходить за розробленим наявним алгоритмом проведення симуляції рівнів трирівневої ієрархічної системи. Після проведення симуляції здійснюється підбір необхідних апаратних частин вдосконалення процесу та безпосередньо друкується деталь.

Проект передбачає собою створення деталі для перевірки граничної міцності (рис. 2).

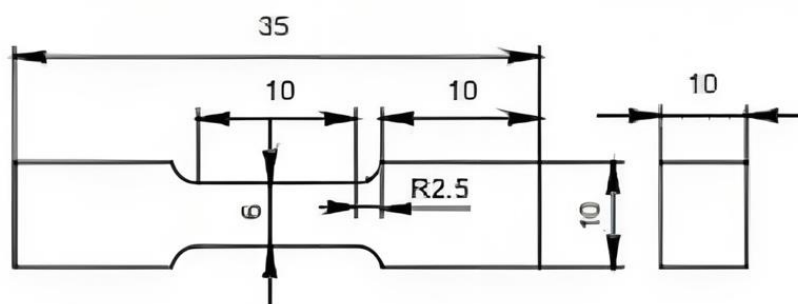


Рис. 2. Геометричні параметри деталі

Джерело: розроблено авторами.

Для отримання такої деталі попередньо необхідно надрукувати прямокутну геометричну фігуру розміром 40 мм завдовжки, 16 мм завширшки та висотою 12 мм. Після друку здійснюватиметься фінішна обробка деталі – фрезерування.

Обраний розмір валиків – 4 мм. Геометричні розміри бази – 40 мм висоти, 40 мм ширини, 200 мм довжини (рис. 3). Матеріал бази – алюміній. Матеріал друку – алюміній. Параметри друку наведені в табл. 1 та 2.

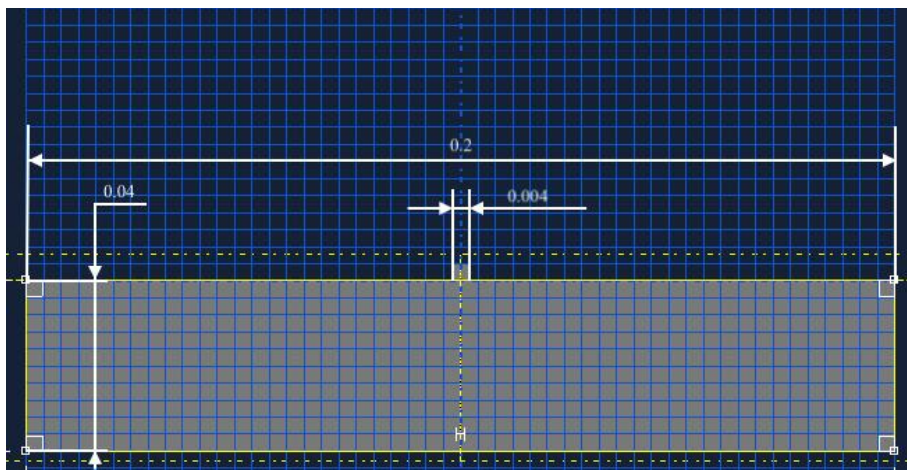


Рис. 3. Геометричний проект симуляції першого рівня трирівневої ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання  
Джерело: розроблено авторами.

Результати першого рівня трирівневої ієрархічної моделі симуляції процесу адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання показують розповсюдження тепла від колокації одного зварювального валика (рис. 4).

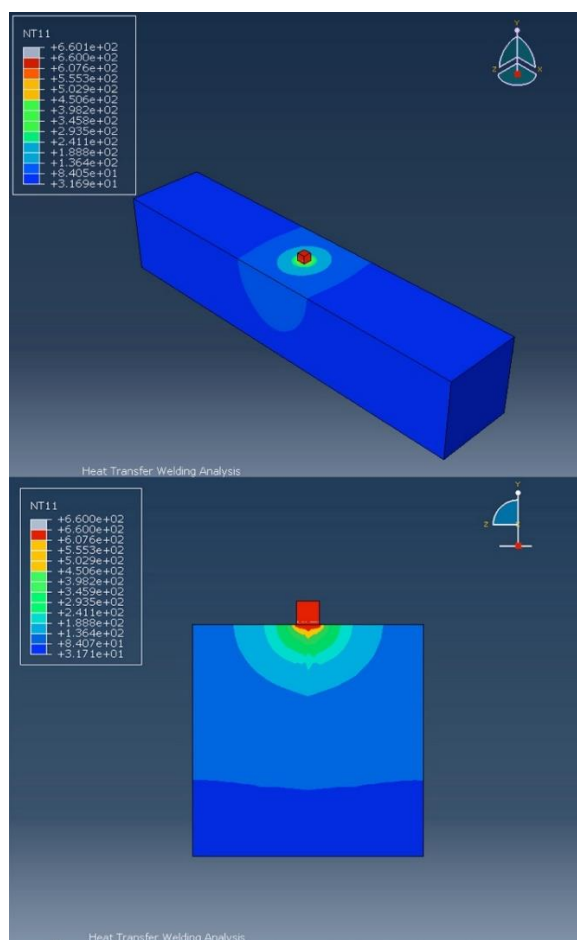


Рис. 4. Результати теплового аналізу та розповсюдження тепла першого рівня ієрархічної трирівневої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання  
Джерело: розроблено авторами.

Згідно з отриманою інформацією, після проведення теплового аналізу виконується симуляція структурного аналізу для дослідження впливу тепла на структуру виготовлених виробів. У цьому контексті структурний аналіз включає оцінку залишкових напружень, які виникають у матеріалі після процесу адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання (рис. 5).

За загальними результатами аналізу першого рівня недоліків не виявлено, температура розповсюджується рівномірно. Розповсюдження залишкових напружень не перевищує норми, згідно зі значеннями допустимих величин.

Таблиця 1 – Властивості матеріалу для адитивного виробництва алюмінію

| Теплопровідність    |                               | Густина               | Пружність           |                        |       | Коефіцієнт теплового розширення |                               | Питома теплоємність |
|---------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|-------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| $T, ^\circ\text{C}$ | $q, \text{W/m}^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{kg/m}^3$ | $T, ^\circ\text{C}$ | $\sigma, \text{N/m}^2$ | $\nu$ | $T, ^\circ\text{C}$             | $\varepsilon, ^\circ\text{C}$ | $c, ^\circ\text{C}$ |
| 300                 | 164                           | 2750                  | 25                  | 724e9                  | 0.3   | 300                             | 27e-006                       | 900                 |
| 500                 | 194                           |                       | 500                 | 63.5e9                 |       | 500                             | 27.4e-006                     |                     |
| 700                 | 210                           |                       | 700                 | 56.1e9                 |       | 700                             | 27.7e-006                     |                     |
| 770                 | 220                           |                       | 770                 | 50e9                   |       | 770                             | 28.3e-006                     |                     |

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2 – Додаткові властивості матеріалу для адитивного виробництва алюмінію

| Теплопровідність              | Густина | Пружність              |       | Коефіцієнт теплового розширення |
|-------------------------------|---------|------------------------|-------|---------------------------------|
| $q, \text{W/m}^\circ\text{C}$ | $\rho$  | $\sigma, \text{N/m}^2$ | $\nu$ | $\varepsilon, ^\circ\text{C}$   |
| 204                           | 2750    | 69e9                   | 0.33  | 2.3e-005                        |

Джерело: розроблено авторами.

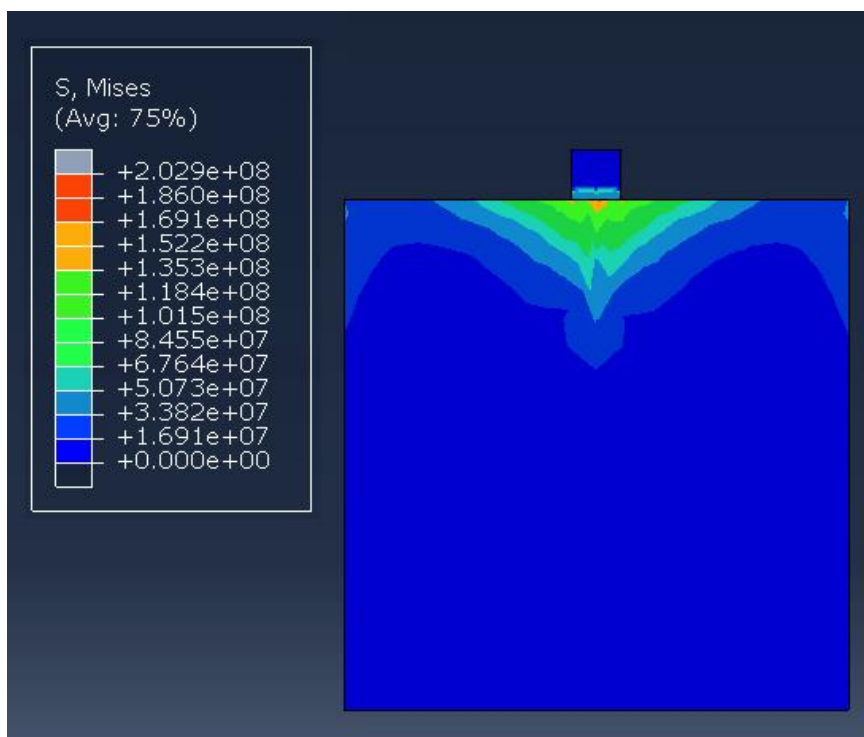
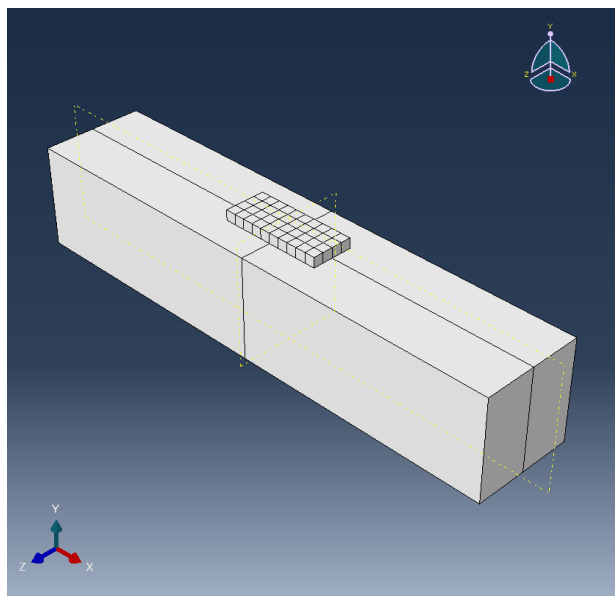


Рис. 5. Результати структурного аналізу та залишкових напружень першого рівня ієрархічної тривірвневої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання

Джерело: розроблено авторами.

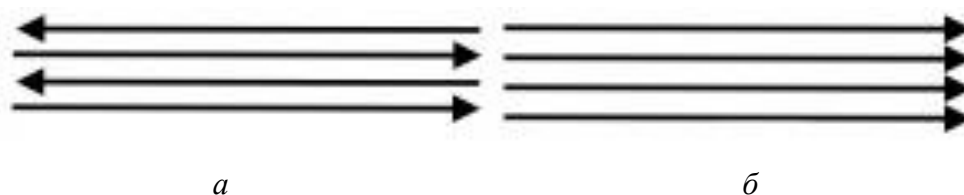


*Рис. 6. Проект симуляції другого рівня тривірвеної ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання*

Джерело: розроблено авторами.

Після отримання результатів та на базі аналізу даних першого рівня необхідно провести симуляцію другого рівня тривірвеної ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання, тобто шару. Геометричні розміри шару для створення заданої завданням проекту деталі становлять: 4 мм висоти, 16 мм ширини та 40 мм довжини (рис. 6). Шар складається з 40 валиків зварювання окремо, що дислокуються один за одним на матеріал бази. Є можливість також створення одного безперервного довгого валику, проте в нашому випадку було обрано саме модель окремого нанесення.

Під час поточної симуляції шару, у якій топологія системи наноситься згідно з варіантом рис. 7, а, виникають проблеми з розповсюдженням тепла.

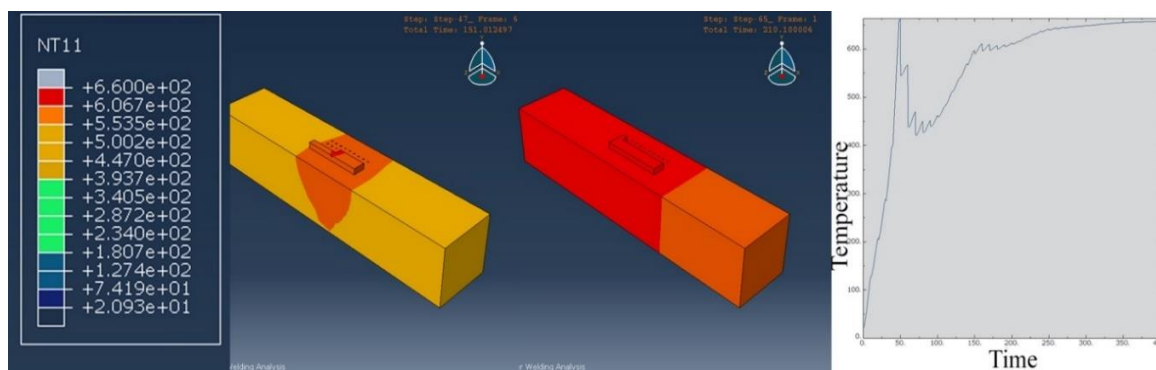


*Рис. 7. Можливі траєкторії руху нанесення шару*

Джерело: розроблено авторами

Уже на 12 кроці накопичена загальна температура не тільки в надрукованій на момент кроку частині шару, але й навіть температура бази досягають критичних значень, тобто переходять до рідкісного стану – стану плавлення. Уся система зазнає руйнування. Аналіз даних наведено на рис. 8. Процес симуляції завершується невдало.

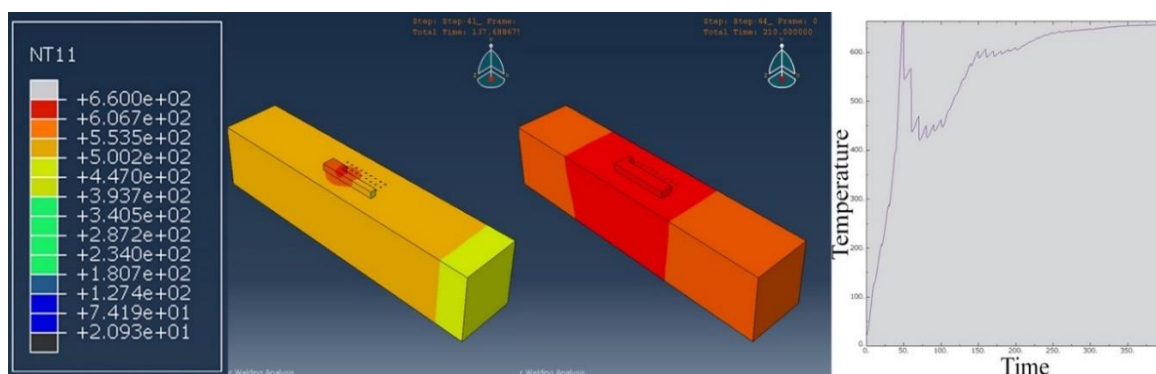
Одним із можливих методів вирішення проблеми є створення нової альтернативної топології шару. Під час виробництва з використанням траєкторії друку варіанта рис. 7, б тепло розповсюджується більш рівномірно та не встигає накопичитися до критичного рівня у 12-му кроці. Однак вже на 16-му кроці загальне сумарне накопичення тепла в уже надрукованій частині шару та навіть на базі проходить позначку температури плавлення.



*Рис. 8. Результати теплового аналізу та розповсюдження тепла другого рівня ієрархічної тривірвневої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання траєкторії нанесення шару*

Джерело: розроблено авторами.

Уся система зазнає руйнування. Аналіз даних наведено на рис. 9. Процес симуляції завершується невдало.



*Рис. 9. Результати теплового аналізу та розповсюдження тепла другого рівня ієрархічної тривірвневої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання траєкторії нанесення шару*

Джерело: розроблено авторами.

Оскільки адаптація траєкторії нанесення шару лише частково вирішує проблему критичного накопичення тепла під час друку, необхідно додати інші методи контролю розповсюдження тепла, зокрема охолодження системи. Під час завершення друку 10 валиків згідно з траєкторією нанесення шару (рис. 9), шляхом проведення декількох симуляцій було визначено температуру, до якої необхідно охолодити всю систему для подальшого проведення друку. Визначена температура охолодження становила  $-60^{\circ}\text{C}$ . З результатів симуляції температурного аналізу та розповсюдження тепла другого рівня ієрархічної тривірвневої системи з використанням траєкторії нанесення шару (рис. 9) та контролю за охолодженням системи визначено, що загальне накопичення тепла під час друку не досягає критичного. Аналіз даних наведено на рис. 10. Процес симуляції завершується вдало.

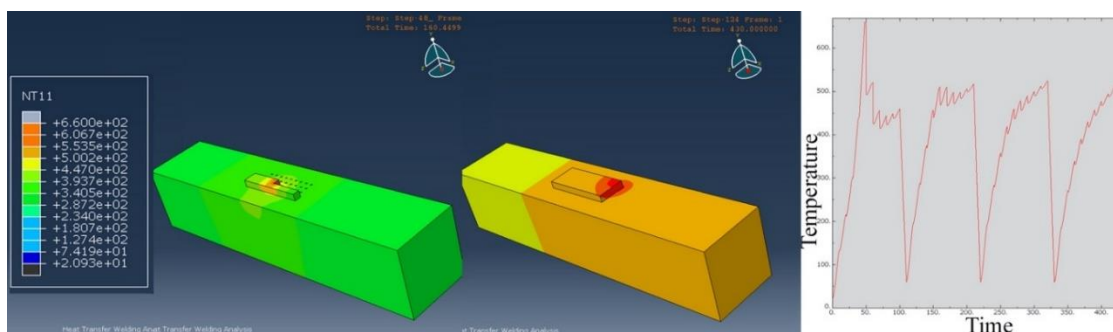


Рис. 10. Результати теплового аналізу та розповсюдження тепла другого рівня ієрархічної трирівневої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання

Джерело: розроблено авторами.

З використанням отриманих даних теплового аналізу проводиться структурний аналіз шару. Отримані дані наведено на рис. 11. Найбільш вразливі ділянки знаходяться у області перекриття валиків та в зонах найбільшого температурного впливу. Результати аналізу залишкових напружень знаходяться в межах допустимих значень.

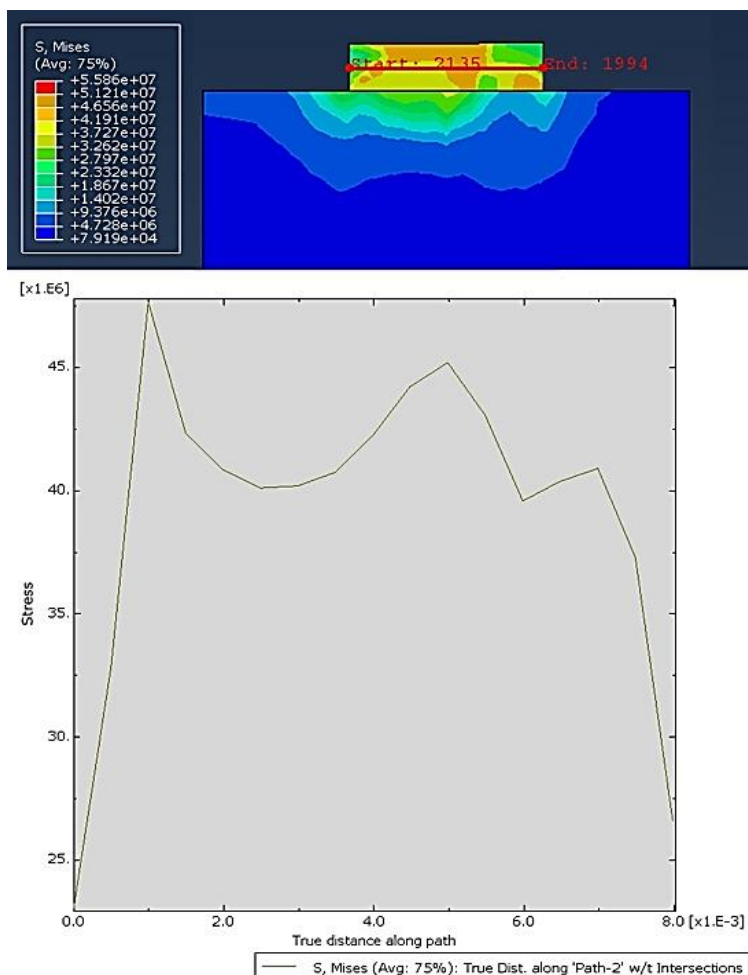
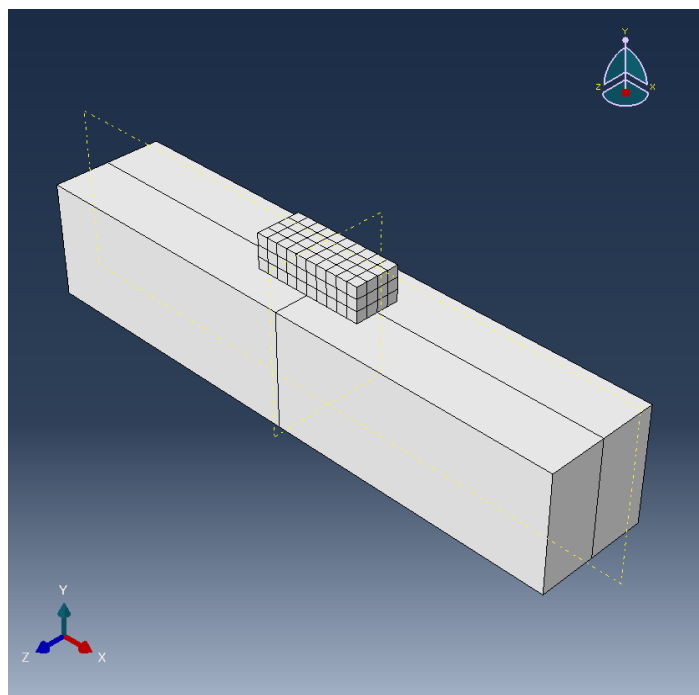


Рис. 11. Результати структурного аналізу та залишкових напружень другого рівня ієрархічної трирівневої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання

Джерело: розроблено авторами.



Підсумовуючи та використовуючи отримані дані з попередньо проведених двох рівнів симуляцій тривірневої ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання розробляється проект симуляції третього рівня – стінки. Геометричні розміри стінки: 12 мм висоти, 16 мм ширини та 40 мм довжини (рис. 12). Стінка складається з 3 шарів, що в свою чергу складаються зі 120 валиків. Під час процесу друку необхідно дотримуватися встановленої під час калькуляції другого рівня моделі траєкторії руху рис. 7, б, а також дотримуватися температурного режиму: кожні 10 валиків охолоджувати систему до 60 градусів.



*Рис. 12. Проект симуляції третього рівня тривірневої ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання*

Джерело: розроблено авторами.

Дані процесу симуляції теплового аналізу та розповсюдження температур третього рівня тривірневої ієрархічної моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання (рис. 13) показують, що процес проходить успішно, температура накопичується в межах допустимих норм, формування стінки відбувається ефективно й без значних перегрівів.

Успішне завершення теплового аналізу дозволяє провести фінальний процес симуляції – структурний аналіз стінки. Вдало обрані параметри контролю розповсюдження тепла, траєкторії нанесення матеріалу та охолодження дозволяють ефективно контролювати процес формування стінки та позитивно впливають на фінальну якість виробу. З результатів структурного аналізу рис. 13, видно, що безпосереднє доволі рівномірне розповсюдження залишкових напружень, без концентрацій в окремих зонах, не має негативного впливу на міцність деталі під час аплікації сили до неї. Змодельована деталь відповідає вимогам міцності та може витримувати зовнішні навантаження без виникнення деформацій, поломок або дефектів.

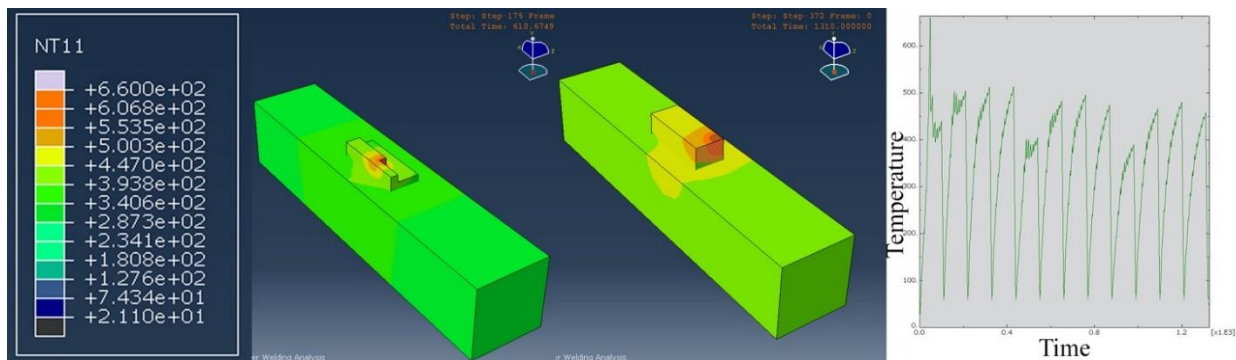


Рис. 13. Результати теплового аналізу та розповсюдження тепла третього рівня ієрархічної тривірвнєвої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання

Джерело: розроблено авторами.

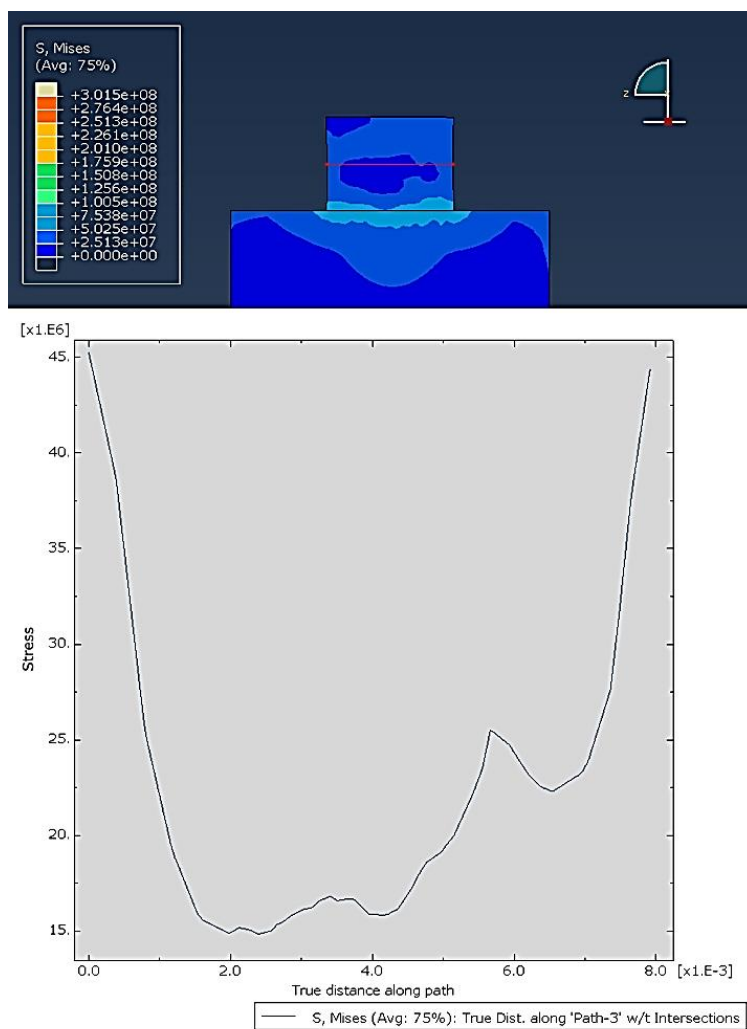


Рис. 14. Результати структурного аналізу та розповсюдження залишкових напружень третього рівня ієрархічної тривірвнєвої моделі адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання

Джерело: розроблено авторами.

Отже, загальний процес симуляції адитивного виробництва алюмінієвої деталі з використанням електродугового зварювання було проведено успішно. Комп'ютерна розрахована модель деталі відповідає всім необхідним встановленим параметрам та показникам та може бути використана для стадії проведення реального фізичного експерименту.

Уже під час самого процесу друку для якісного автоматизованого виробництва та наслідування заданої топології та температурних режимів необхідно запровадити використання теплокамери та лазерних датчиків зі встановленою телекомунікаційною системою зворотного зв'язку. Для нашого випадку серед можливих варіантів використання було обрано інфрачервону камеру Bosch GIS 1000 C Professional з можливим діапазоном температур від  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що підходить для нашого випадку, у якому критична температура накопичення сягає  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а початкова температура була обрана  $21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а також інфрачервоний датчик з операційною можливістю від  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Підключені до одної телекомунікаційної системи (рис. 15), обрані пристрої передають отриману температурну інформацію до контролера і у випадку порушення попередньо заданих налаштувань для уникнення повного руйнування системи як у розглянутій вище симуляції з траєкторією нанесення шару (а), робота процесу адитивного виробництва повністю зупиняється.

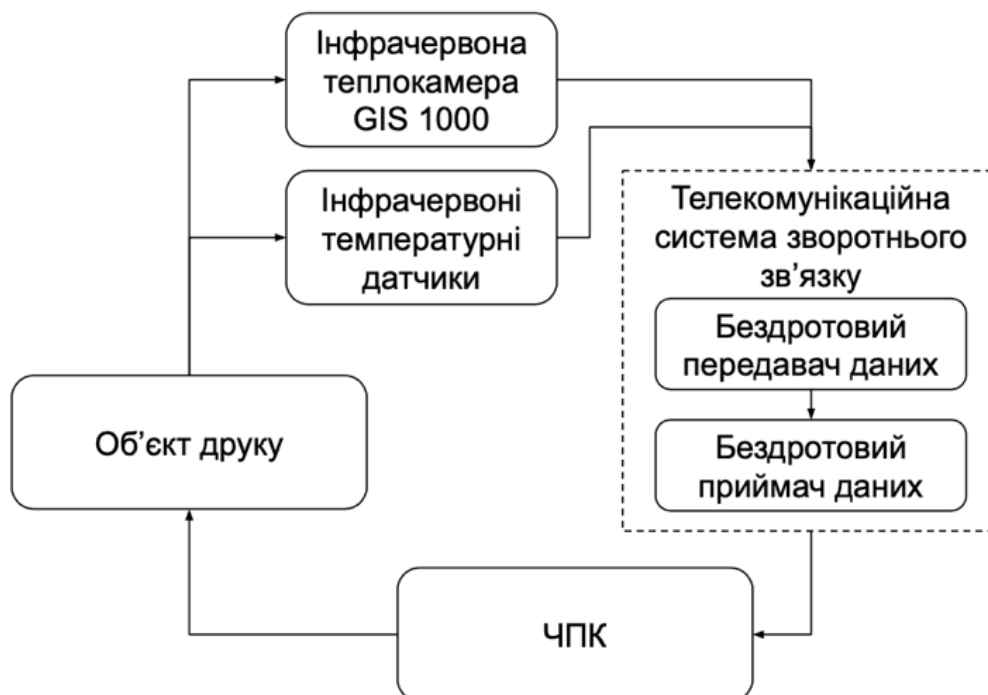


Рис. 15. Архітектура процесу друку з використанням телекомунікаційної системи зворотного зв'язку

Джерело: розроблено авторами.

Кожен із рівнів моделі буде розглянуто окремо згідно з наданими даними, проведено симуляцію та відповідно до отриманих результатів створено наступний рівень. Після проведення симуляції останнього рівня буде визначено доцільність використання обраних показників для подальшого виробництва на основі вже проведеної симуляції.

З отриманих даних під час симуляції стає зрозуміло, що обидві моделі обраних валиків підходять для процесу адитивного виробництва, зважаючи на потреби користувача, у вигляді часу виготовлення, сили струму, напруги, розповсюдження залишкових напружень, можна обрати, який саме тип остаточної деталі буде вироблено. У нашому випадку було обрано другий тип, тобто тип з використанням «великих» валиків. Після процесу

адитивного виробництва та фрезерної обробки отримана деталь розміру 5 на 10 мм та товщиною 2 мм. Процес друку було проведено з використанням лазерних датчиків та тепло камери поєднаних телекомунікаційною системою зворотного зв'язку.

**Висновки.** У результаті проведених досліджень було успішно створено можливість вдосконалення процесу адитивного виробництва алюмінієвої деталі з використанням електродугового зварювання. Розглянуто різні траєкторії руху нанесення шару. Розв'язано проблеми накопичення тепла у конкретному випадку друку. Створено архітектуру процесу друку за допомогою електродугового зварювання з використанням телекомунікаційної системи зворотного зв'язку. Обрано необхідні теплодатчики та теплокамеру для контролю за розповсюдженням тепла. Проведено аналіз можливості друку з використанням тривірневої ієрархічної моделі. Після проведення симуляції встановлено можливість подальшого практичного експерименту. Отримано більше необхідних даних для можливості створення автоматизованої програми з використанням теплових телекомунікаційних датчиків для процесу адитивного виробництва з використанням електродугового зварювання. У подальших дослідженнях необхідно провести аналіз впливу температурних датчиків телекомунікаційної системи зворотного зв'язку на контроль виробництва та якість деталей під час процесу друку.

#### Список використаних джерел

1. Applications of wire arc additive manufacturing (WAAM) for aerospace component manufacturing / P. Harshita, A. Arora, G. Gopakumar, A. Patterson // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. DOI: 10.1007/s00170-023-11623-7.
2. Modelling and experimental observation of the deposition geometry and microstructure evolution of aluminum alloy fabricated by wire-arc additive manufacturing / R. Geng, J. Du, Z. Wei, N. Ma // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 64. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.01.037.
3. Characterization of 5356 Aluminum Walls Produced by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) / M. Wieczorowski, A. Pereira, D. Carou, B. Gapinski, I. Ramirez // *Materials*. – 2023. – Vol. 16(7). – 2570. DOI: 10.3390/ma16072570.
4. Automation control system of 3d printing robotic platform with implemented wire + arc welding technology / P. Anikin, G. Shilo, R. Kulykovski, D. Molochkov // *Electrical Engineering and Power Engineering*. – 2021. – № 4. – P. 35-48. DOI:10.15588/1607-6761-2020-4-4.
5. Combine defect of the interlayer temperature with travel speed on features of thin wall WAAM under two cooling approaches / F. Teixeira, F. Scotti, V. Jorge, A. Scotti // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 126. – P. 273-289. DOI: 10.1007/s00170-023-11105-w.
6. Influence of active cooling on microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured mildsteel / A. Dash, L. Squiers, J. Avila, A. Bandyopadhyay // *Frontiers in Mechanical Engineering*. – 2023. – Vol. 9. DOI:10.3389/fmech.2023.1130407.
7. Jorge, V. Pyrometrical Interlayer Temperature Measurement in WAAM of Thin Wall: Strategies, Limitations and Functionality / V. Jorge, F. Teixeira, A. Scotti // *Metals – Open Access Metallurgy Journal*. – 2022. DOI: 10.3390/met12050765.
8. Chen, A profile transformation based recursive multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) / C. Chen, H. He, J. Zhou, M. Feng // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. – 84 (3). – 886-901. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.042.
9. Zhang, J. The gap-filling overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-bead components / J. Zhang, Y. Xing, J. Cao // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – 123. – P. 737-748. DOI: 10.1007/s00170-022-10132-3.
10. Lee, S. CMT-Based Wire Arc Additive Manufacturing Using 316L Stainless Steel: Effect of Heat Accumulation on the Multi-Layer Deposits / S. Lee // *Metals*. – 2020. – Vol. 10 (2). – P. 278. DOI: 10.3390/met10020278.
11. Park, J. CMT-Based Wire Arc Additive Manufacturing Using 316L Stainless Steel (2): Solidification Map of the Multilayer Deposit / J. Park, S. Lee // *Metals*. – 2021. – Vol. 11(11). – P. 1725. DOI: 10.3390/met11111725.

12. Bendia, R. Multivariable closed-loop control for layer geometry in Wire-Arc Additive Manufacturing / R. Bendia, F. Lizarralde, F. Coutinho // XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. – 2021. DOI: 10.20906/sbai.v1i1.2732.

13. Development of a Multidirectional Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process with Pure Object Manipulation: Process Introduction and First Prototypes / K. Parmal, L. Oster, S. Mann, B. Corves // Manufacturing and Materials Processing. – 2021. – Vol. 5(4). – P. 134. DOI: 10.3390/jmmp5040134.

14. Development of correlation between temperature, liquid lifespan, molten pool, and porosity during Wire Arc Additive Manufacturing: A finite element approach / J. Ketha, P. Teja, A. Choudhary, R. Jain // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2022. – Vol. 38. – P. 1-15. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.05.002.

15. Effects of Vertical and Pinch Rolling Residual Stress Distributions in Wire and Arc Additively Manufactured Components / R. Tangestani, G. Farrahi, M. Shishegar, A. Mehmanparast // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2020. – Vol. 29. – P. 2073-2084. DOI: 10.1007/s11665-020-04767-0.

16. Anikin, P. Wire arc additive manufacturing three level hierarchical model / P. Anikin, G. Shilo, F. Bastos // Computer Science and Applied Mathematics. – 2023. – № 2.

### References

1. Harshita, P. Arora, A., Gopakumar, G., Patterson, A. (2023). Applications of wire arc additive manufacturing (WAAM) for aerospace component manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. DOI: 10.1007/s00170-023-11623-7.

2. Geng, R. Du, J., Wei, Z., Ma, N. (2021). Modelling and experimental observation of the deposition geometry and microstructure evolution of aluminum alloy fabricated by wire-arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.01.037.

3. Wieczorowski, M., Pereira, A., Carou, D., Gapinski, B., Ramirez, I. (2023). Characterization of 5356 Aluminum Walls Produced by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Materials*. DOI: 10.3390/ma16072570.

4. Anikin, P., Shilo, G., Kulykovski, R., Molochkov, D. (2021). Automation control system of 3d printing robotic platform with implemented wire + arc welding technology. *Electrical Engineering and Power Engineering*. DOI: 10.15588/1607-6761-2020-4-4.

5. Teixeira, F., Scotti, F., Jorge, V., Scotti, A. (2023). Combine defect of the interlayer temperature with travel speed on features of thin wall WAAM under two cooling approaches. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. DOI: 10.1007/s00170-023-11105-w.

6. Dash, A., Squiers, L., Avila, J., Bandyopadhyay, A. (2023). Influence of active cooling on microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured mild steel. *Frontiers in Mechanical Engineering*. DOI: 10.3389/fmech.2023.1130407.

7. Jorge, V., Teixeira, F., Scotti, A. (2022). Pyrometrical Interlayer Temperature Measurement in WAAM of Thin Wall: Strategies, Limitations and Functionality. *Metals - Open Access Metallurgy Journal*. DOI: 10.3390/met12050765.

8. Chen, C., He, H., Zhou, J., Feng, M. (2022). A profile transformation based recursive multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Journal of Manufacturing Processes*. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.042.

9. Zhang, J. Xing, Y., Cao, J. (2022). The gap-filling overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-bead components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. DOI: 10.1007/s00170-022-10132-3.

10. Lee, S. (2020). CMT-Based Wire Arc Additive Manufacturing Using 316L Stainless Steel: Effect of Heat Accumulation on the Multi-Layer Deposits. *Metals*. DOI: 10.3390/met10020278.

11. Park, J., Lee, S. (2021). CMT-Based Wire Arc Additive Manufacturing Using 316L Stainless Steel (2): Solidification Map of the Multilayer Deposit. *Metals*. DOI: 10.3390/met11111725.

12. Bendia, R., Lizarralde, F., Coutinho, F. (2021). Multivariable closed-loop control for layer geometry in Wire-Arc Additive Manufacturing. *XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. DOI: 10.20906/sbai.v1i1.2732.

13. Parmal, K., Oster, L., Mann, S., Corves, B. (2021). Development of a Multidirectional Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process with Pure Object Manipulation: Process Introduction and First Prototypes. *Manufacturing and Materials Processing*. DOI: 10.3390/jmmp5040134.

14. Ketha, J., Teja, P., Choudhary, A., Jain, R. (2022). Development of correlation between temperature, liquid lifespan, molten pool, and porosity during Wire Arc Additive Manufacturing: A finite element approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.05.002.

15. Tangestani, R., Farrahi, G., Shishegar, M., Mehmanparast, A. (2020). Effects of Vertical and Pinch Rolling on Residual Stress Distributions in Wire and Arc Additively Manufactured Components. *Journal of Materials Engineering and Performance*. DOI: 10.1007/s11665-020-04767-0.

16. Anikin, P., Shilo, G., Bastos, F. (2023). *Wire arc additive manufacturing three level hierarchical model, 2*.

Отримано 20.10.2023

UDC 621.316.13

**Pavlo Anikin<sup>1</sup>, Galina Shilo<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD Student of the Department of Radio engineering and Telecommunications  
Zaporizhzhia Polytechnic National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

E-mail: [anikinps@zntu.edu.ua](mailto:anikinps@zntu.edu.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6767-784X>. ResearcherID: [JDD-8719-2023](https://orcid.org/0000-0001-6767-784X)

<sup>2</sup>D.Sc., Professor of the Department of Computer Science  
Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

E-mail: [shilo.gn@gmail.com](mailto:shilo.gn@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5020-6707>. ResearcherID: [H-1884-2019](https://orcid.org/0000-0002-5020-6707)

## ENHANCEMENT OF WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING PRODUCTION OF ALUMINUM PART

*The article provides original findings of the improvement of the production of the wire arc additive manufacturing of aluminum. The simulation of the process of wire arc additive manufacturing of a three-level hierarchical model was carried out, while taking into account the requirements for manufacturability and quality of the obtained part, such as its geometric dimensions, residual stresses and maintaining of the optimal production speed. During the occurrence of problems with heat distribution, various trajectories of movement and topologies were used to solve them. The optimal trajectory and print parameters are created in the form of temperature control for the specified part. Implemented the ability to use a telecommunication feedback system using telecommunication devices such as pyro camera and infrared temperature laser sensors to monitor temperature during problems detected by print simulation. The obtained data were used for the further possibility of generating an automated program for controlling the robot during the additive manufacturing process. Residual stresses and the possibility of defects in the manufactured part are determined. Based on the obtained data, the values of residual stresses and defects in the manufactured parts were determined.*

*Improved print topology using a three-level hierarchical system. Introducing the use of laser sensors and thermal cameras to the telecommunications system of additive manufacturing using wire arc welding with the improvement of the direct printing process by means of controlling the spread of heat.*

**Keywords:** WAAM; CAE systems; Robotics; 3D modeling; Abaqus; Telecommunications.

Table: 2. Fig.: 15. References: 16.

**Геннадій Болотов<sup>1</sup>, Максим Болотов<sup>2</sup>, Михайло Руденко<sup>3</sup>, Владислав Гречка<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [bolotovgp@gmail.com](mailto:bolotovgp@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>

Scopus: 6506157907. Researcher ID: H-5304-2014

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [bolotovmg@gmail.com](mailto:bolotovmg@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>. Scopus Author ID: 57190377278

<sup>3</sup>старший викладач кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [rudenko\\_bear@ukr.net](mailto:rudenko_bear@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>

Scopus Author ID: 57190378153. Web of Science: G-6235-2014

<sup>4</sup>аспірант кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [deadsilence166@gmail.com](mailto:deadsilence166@gmail.com)

## АКТИВАЦІЯ ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНОСУ ПРИ ДИФУЗІЙНОМУ ЗВАРЮВАННІ У ТЛЮЧОМУ РОЗРЯДІ

*У роботі досліджений вплив іонної обробки контактуючих поверхонь на активацію процесів масопереносу при дифузійному зварюванні металів. Визначено, що попереднє іонне очищення зварюваних поверхонь в тліючому розряді суттєво скорочує час інкубаційного періоду, пов'язаного з дифузійним розсмоктуванням адсорбованих поверхнею шарів кисню, та забезпечує підвищення коефіцієнта дифузії в перехідній зоні приблизно втричі порівняно зі стандартною підготовкою їх промиванням у розчинниках, і майже на два порядки порівняно з коефіцієнтом самодифузії елементів. Показано, що найбільш ефективним є застосування іонної активації поверхонь при дифузійному зварюванні однорідних, або близьких за хімічним складом металів, коли відсутній такий важливий фактор інтенсифікації процесів масопереносу, як градієнт концентрації елементів в зоні зварювання.*

**Ключові слова:** дифузійне зварювання; тліючий розряд; активація поверхонь; дифузійна зона; масоперенос.

Рис.: 5. Бібл.: 9.

**Постановка проблеми.** На сьогодні у промисловості поширення отримав один зі способів зварювання тиском – дифузійне зварювання, що здійснюється у твердому стані при температурі не вище 0,7...0,8 температури плавлення з'єднуваних металів. Це дає змогу зварювати різноманітні метали як в однорідних, так і різнорідних сполученнях із мінімальними макропластичними деформаціями [1], що дозволяє усунути завершальну механічну обробку зварної композиції.

Процес утворення з'єднання при дифузійному зварюванні вважають таким, що протікає у три стадії:

- утворення та розвиток фізичного (механічного роз'ємного) контакту;
- активація контактуючих поверхонь з утворенням нових активних центрів внаслідок їх сумісної пластичної деформації;
- об'ємна взаємодія. Цей процес протікає на активних центрах і характеризується утворенням внаслідок гетеродифузії міцних хімічних зв'язків як на поверхнях, так і в об'ємі зони контакту.

Саме завершеність процесів дифузійного масообміну між зварюваними матеріалами визначає міцність їх з'єднання та інші механічні характеристики. Наявність зони дифузії і є ознакою утворення зварного з'єднання.

Однак будь-яка металева поверхня не є ідеально гладкою і чистою. Незважаючи на попередню механічну обробку, в зоні контакту деталей мають місце шари адсорбованого кисню у вигляді тонких та гнучких оксидних плівок товщиною 3...15 нм (в залежності від хімічної активності металу), які гальмують процеси утворення хімічних зв'язків і розвиток дифузійних процесів. При нагріві деталей в зоні утвореного фізичного конта-

кту здійснюється дифузійне розсмоктування кисню по границях та об'єму зерен унаслідок розриву хімічних зв'язків метал – кисень. Тривалість цього періоду, який зветь інкубаційним, залежить від товщини та твердості оксидних плівок і може складати значну частку в загальній тривалості процесу дифузійного зварювання.

Для активації процесів розриву хімічних зв'язків метал – кисень і дифузії кисню вглиб металу застосовують термічний та механічний канали. Термічний канал активації складається в наданні поверхням деталей теплової енергії, що перевищує енергію зв'язків у системі метал – кисень. Проте це вимагає нагріву металів до високих температур, що призводить до погіршення їх структури й фізико-механічних властивостей. Механічний канал передбачає рівень пластичних деформацій контактуючих поверхонь, достатній для руйнування шарів оксидів і розриву міжатомних зв'язків у системах метал – кисень обох з'єднаних матеріалів. Однак залежно від характеристик оксидних плівок, такий варіант може супроводжуватись значною макропластичною деформацією зварного вузла.

Розроблений останніми роками та впроваджений у виробництво спосіб дифузійного зварювання із нагрівом тліючим розрядом [2; 3; 4] дозволив розширити методи активації зварюваних поверхонь деталей. Нагрів нормальним тліючим розрядом здійснюється при тисках газу до 10...15 кПа за рахунок бомбардування поверхонь зварюваних зразків позитивними іонами робочого газу, прискореними електричним полем у проміжку анод – катод (зварювані деталі). Водночас при зниженні тиску газу до 10...100 Па, разом зі зменшенням концентрації іонів у розряді суттєво зростає їх енергія внаслідок переходу тліючого розряду у аномальну форму зі зростанням напруги на розряді. Визначено [3], що в цих умовах енергії бомбардуючих іонів стає достатньо для видалення з поверхні металів внаслідок ефекту катодного розпилення інерідних неметалевих шарів, зокрема, оксидних плівок. Це дає змогу більш активно впливати на основні параметри дифузійного зварювання.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Результати попередніх досліджень [5; 6] свідчать про ефективність іонного очищення (активації) зварюваних поверхонь металів, що визначається у скороченні тривалості циклу зварювання до досягнення необхідної міцності з'єднання. Однак недослідженим залишається вплив іонної активації поверхонь на інтенсивність протікання в зоні контакту процесів дифузійного масообміну, що визначають фізико-механічні властивості зварного з'єднання.

**Мета роботи** полягає у встановленні якісного та кількісного впливу іонної активації поверхонь на величину коефіцієнтів дифузії елементів в зоні зварювання та енергію активації дифузійних процесів.

**Виклад основного матеріалу.** Як матеріали для дослідження дифузійного масообміну були обрані електротехнічна сталь 10880 із дуже низьким ступенем легування, що наближає її за своїми властивостями до армо-заліза (чистого заліза), сталь 12X18H9T та сталь 45. Зварювання цих матеріалів у різних сполученнях дозволяє дослідити взаємовплив елементів при дифузії, оцінити роль оксидних плівок типу  $Me_2O_3$  в умовах іонної обробки поверхонь та зварювання в тліючому розряді.

Підготовка зразків до зварювання складалась у механічній обробці зварюваних поверхонь по 6-му класу чистоти приблизно за добу до зварювання, очищення поверхонь розчинником (ацетоном) або іонна обробка безпосередньо перед зварюванням. Діаметр зразків складав 15 мм при довжині 35 мм. Дослідження міцності зварних зразків проводили випробуваннями на статичний розтяг на розривній машині УМ-5. Для випробувань зі зварених деталей виготовляли зразки відповідно до ДСТУ EN 100002-1:2006, тип 4, із розташуванням зварного шва на середині їх робочої частини, роблячи кільцеву канавку у цій зоні (коефіцієнт концентрації напружень  $K_n = 1,1$ ).



На першому етапі досліджували залежність міцності з'єднання від ширини дифузійного перехідного шару в зоні контакту. Дослідження проводили для композиції металів сталь 10880 + сталь 12Х18Н9Т. Обране поєднання матеріалів дозволяє отримати перехідний шар змінного складу від чистого заліза до легованої сталі без утворення крихких інтерметалідів. Для визначення динаміки росту перехідного шару час зварювання поступово збільшували в інтервалі 2–4–6–8–10–15–20 хвилин.

Зварювання зразків здійснювали при температурах 1273, 1373 та 1473 К. Стискаючі напруження складали в усіх дослідах 8 МПа. Попередню іонну обробку зварюваних поверхонь зразків здійснювали в розведеному на 8...10 мм стані у робочій камері в середовищі аргону при тиску газу 60...100 Па протягом 120...150 с. Після обробки поверхні зразків стискалися і здійснювалось зварювання на вказаних режимах.

Вплив попередньої іонної активації на формування міцних зварних з'єднань проявився у зниженні часу зварювання до досягнення однакової міцності при різних способах підготовки поверхонь (рис. 1), що свідчить про зниження тривалості інкубаційного періоду.

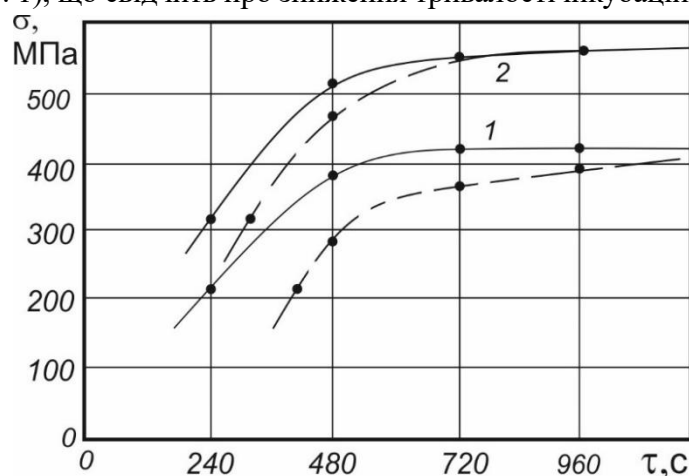


Рис. 1. Кінетика формування міцного зварного з'єднання при дифузійному зварюванні з попередньою іонною обробкою поверхонь (суцільні криві) та без такої (пунктирні криві):  
1 – Сталь 10880 + 12Х18Н9Т; 2 – Сталь 45 + 12Х18Н9Т

Дослідження поверхні сталі 10880 на електронному мікроскопі показало, що до іонної обробки вона покрита шаром неметалевих включень глобулярної форми, а в результаті іонного очищення оголюється її тонкий мікрорельєф, на якій можливі найтонші прозорі плівка природного окислу (рис. 2).

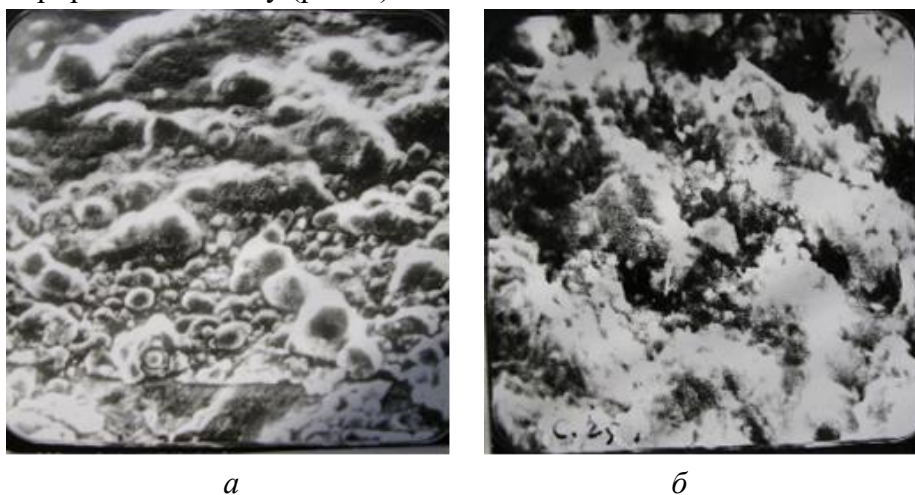


Рис. 2. Зовнішній вигляд поверхні сталі 10880 до (а) та після (б) іонної обробки (x5000)

Ширину перехідної зони у зварних зразках, структура якої відрізняється від вихідної структури обох з'єднаних матеріалів, визначали металографічним методом за допомогою електронного мікроскопа EM-10A. Залежність міцності з'єднання від ширини перехідної дифузійної зони наведена на рис. 3, звідки видно, що при товщині цієї зони у 3...4 мкм, що випробовує найбільші пластичні деформації на першому етапі зварювання, вже забезпечується міцність з'єднання на рівні міцності слабшого матеріалу. У всіх випадках розрив здійснювався по сталі 10880 поза зоною зварювання. Подальше збільшення товщини перехідного шару практично не підвищує міцність. При цьому несуттєво, яким чином досягається оптимальна товщина шару: або за рахунок підвищення температури зварювання при меншій тривалості витримки, або, навпаки, за рахунок тривалої витримки при пониженій температурі.

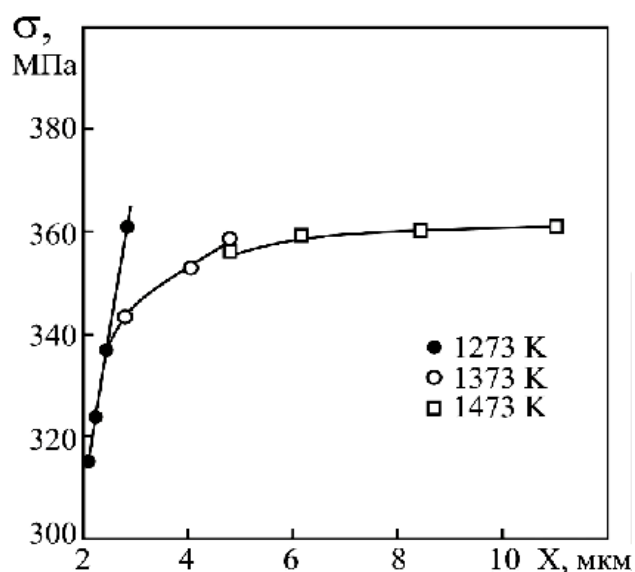


Рис. 3. Залежність міцності зварного з'єднання від ширини перехідного шару

Водночас результати вимірювання мікротвердості (рис. 4) зони зварювання мікротвердоміром ПМТ-3 та розподілу елементів у цій зоні (концентраційні криві на рис. 4) за допомогою мікроаналізатора фірми «Сатеса», свідчать, що дифузійний масообмін здійснюється у помітно більшій зоні, аніж ширина перехідного шару. У процесі утворення зварного шва бере участь шар металу товщиною до 8...10 мкм. Тому можна прийняти, що ширина перехідного шару у 3...4 мкм є мінімально необхідною для отримання надійного з'єднання.



а

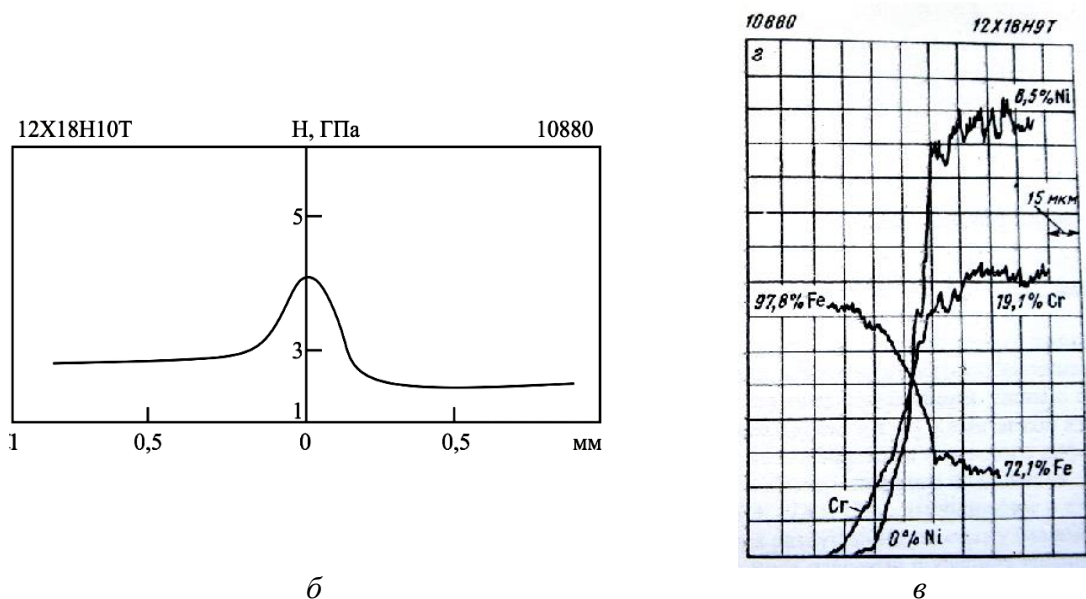


Рис. 4. Характеристики дифузійного зварного шва між сталлю 10880 та 12X18H9T  
 а – електронна мікрофотографія (x2500); б – мікротвердість;  
 в – концентраційні криві (масштаб 15 мкм)

Розвиток дифузійної зони залежить не тільки від параметрів режиму зварювання (температури та часу), а й необхідної енергії активації дифузії, і визначається загалом коефіцієнтом дифузії елементів зварюваних матеріалів через зону їх контакту.

Енергія активації самодифузії головного елемента застосованих металів – заліза, вміст якого в цих матеріалах становить 79...98 %, орієнтовно визначається як [7]

$$Q_T = 18RT_{пл}, \quad (1)$$

де  $R = 8,31$  кДж/моль – універсальна газова постійна;

$T_{пл}$  – температура плавлення металу, К.

Коефіцієнт самодифузії заліза залежить як від величини енергії активації дифузії  $Q_T$ , так і температури процесу зварювання  $T$

$$D_T = D_o \cdot \exp(-Q_T/RT), \quad (2)$$

де  $D_o$  – частотний фактор, величина якого залежить від типу кристалічної ґратки та від частоти коливань дифундуючого атома, м<sup>2</sup>/с [8].

Розрахунки за формулами (1) та (2) надають орієнтовне значення коефіцієнта самодифузії заліза на рівні  $D_T = 10^{-15}$  м<sup>2</sup>/с, що збігається з експериментальними даними  $(1...2) \cdot 10^{-15}$  м<sup>2</sup>/с при температурі 1337...1406 К [8].

Головною умовою ефективного масопереносу є щільний контакт поверхонь метал – метал без наявності на них неметалевих шарів насамперед оксидних плівок, що наочно підтверджується результатами іонного очищення поверхонь, наведених на рис. 1.

Слід також враховувати, що з точки зору дифузійного зварювання обробка поверхонь енергетичними іонами може забезпечувати не тільки безпосередній їх контакт, а й можливість прискорення дифузії в результаті створення надлишкової концентрації нерівноважних дефектів передусім вакансійного типу, що підвищує вільну енергію поверхонь [9].

Складність керування процесами дифузії і необхідність отримання міцних зварних з'єднань роблять необхідним визначення впливу як підготовки контактуючих поверхонь, так і параметрів режиму зварювання (температури та часу) на величину коефіцієнта дифузії елементів з'єднаних матеріалів і, відповідно, на ширину дифузійної перехідної зони.

Залежність коефіцієнта дифузії від параметрів режиму можна визначити рішенням другого рівняння Фіка для нестационарного потоку у випадку дифузії в безмежне тіло при різкій концентраційній границі

$$\frac{dc}{dt} = \frac{d^2c}{dx^2} \quad (3)$$

де  $C$  – концентрація дифундуючого елемента;  $x$  – відстань, на яку він перемістився за час  $t$ .

Скориставшись спрощеним рішенням цього рівняння відносно часу дифузії, отримуємо

$$t_{зв} = \frac{1}{\pi D} \left( \frac{C_o \cdot x}{C_o - 2C_x} \right)^2, \quad (4)$$

де  $C_o$  та  $C_x$  – відповідно, концентрація елемента у вихідному матеріалі та на глибині  $x$  від зони з'єднання (у відносних одиницях);

$D$  – коефіцієнт дифузії,  $m^2/s$ .

Задаючись оптимальною глибиною дифузії  $x$  та концентрацією на заданій глибині  $C_x = 0,2C_o$ , знаходимо орієнтовну величину коефіцієнта дифузії  $D$

$$D = \frac{x^2}{t_{зв}}. \quad (5)$$

Розрахунки за цією формулою для ширини дифузійної зони  $x = 8...10$  мкм та часу зварювання  $t = 300...360$  с надають значення  $D$  на рівні  $(5...8) \cdot 10^{-13} m^2/s$ . Водночас згідно з рис. 1 при зварюванні сполучення сталь 10880 + сталь 12X18H9T без іонної активації з'єднуваних поверхонь результуюча величина коефіцієнта дифузії буде майже втричі меншою, оскільки для досягнення однакової міцності зварного з'єднання, тобто, тієї ж ширини перехідної зони, необхідний приблизно втричі більший час ізотермічної витримки.

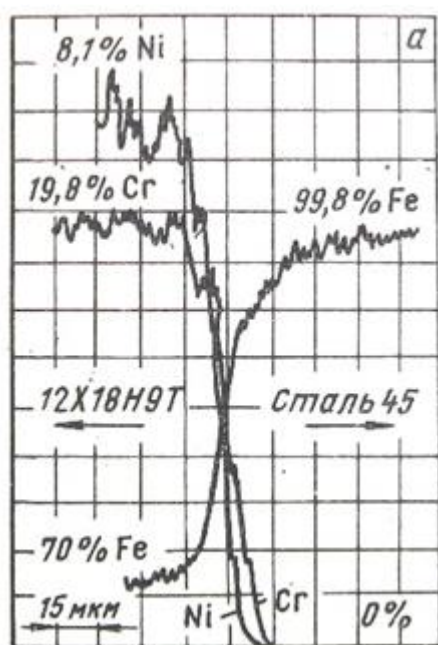
Згідно з (2) значення коефіцієнта дифузії при постійній температурі визначається величиною енергії активації процесу масообміну  $Q$ . Розрахунки за формулою (2) показують, що для реалізації процесу дифузійного зварювання вказаної композиції металів при температурі 1373 К необхідна енергія активації складає 220...235 кДж, а після іонної активації поверхонь вона знижується до 170...185 кДж, тобто, майже на 30 %. Це дає змогу знижувати температуру в процесі зварювання на 10...15 %, що позитивно впливає на структуру та механічні характеристики з'єднуваних металів.

Таким чином, для розглянутої композиції з'єднуваних металів іонна активація контактуючих поверхонь збільшує коефіцієнт дифузії через них практично на півтора-два порядки порівняно з коефіцієнтом самодифузії, та приблизно втричі – порівняно зі зварюванням без іонної обробки поверхонь.

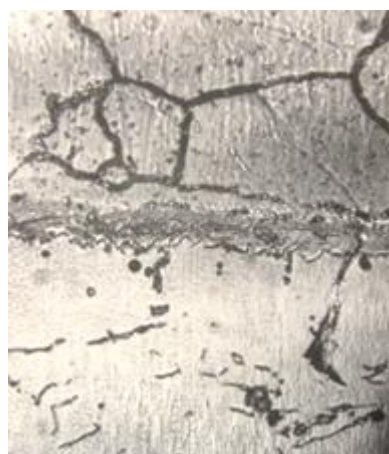
При зварюванні сталі 12X18H9T зі сталлю 45 ефективність іонної активації з'єднуваних поверхонь помітно знижується. Це проявляється у зменшенні тривалості інкубаційного періоду при зварюванні зразків без попередньої іонної обробки поверхонь до досягнення максимальної міцності з'єднань (рис. 1). Це пояснюється відновлювальним характером взаємодії вуглецю, вміст якого у сталі 45 досягає 0,42...0,5 %, із окислами у зоні зварювання. Такий висновок підтверджується тим, що задовільні результати зварювання сталей 12X18H9T + 12X18H9T, які мають у своєму складі не більше 0,12 % вуглецю, були отримані лише з розташуванням у стику перед зварюванням прошарку парафіну, що являє собою сполуки вуглеводнів.

Результати мікрорентгеноспектрального аналізу (рис. 5, а) свідчать, що коефіцієнт дифузії заліза залишився приблизно на тому ж рівні, що й у попередньому випадку. Водночас глибина дифузії у сталь 45 такого карбідоутворюючого елемента, як хром, зменшилася майже у 2,5 раза, відповідно, зменшився коефіцієнт його дифузії з  $1 \cdot 10^{-13}$  м<sup>2</sup>/с до  $4 \cdot 10^{-14}$  м<sup>2</sup>/с. Металографічні дослідження показали, що у з'єднанні сталь 45+ 12Х18Н9Т дифузійна зона складається з тонкого перехідного шару підвищеної твердості і прилеглої до нього знеуглецьованої зони з боку сталі 45 та зони укрупненої структури з боку сталі 12Х18Н9Т (рис. 5, б). Границі зерен у цій зоні збагачені карбідами хрому, що і перешкоджає його більш інтенсивній дифузії. Таким чином, в процесі утворення дифузійного з'єднання роль вуглецю проявляється подвійно.

Як досить активний хімічно і дифузійно рухомий елемент вуглець відновлює оксидні плівки в зоні контакту і забезпечує дифузійний масообмін між з'єднуваними матеріалами. Однак, за наявності активних елементів, здатних утворювати карбіди (хром та ін.), хімічна взаємодія їх з вуглецем викликає зменшення зони взаємного дифузійного масообміну, що впливає на якість зварного з'єднання.



а



12X18H9T

Сталь 45

б

Рис. 5. Характеристики дифузійного зварного шва між сталлю 45 та 12Х18Н9Т:  
а – концентраційні криві; б – мікроструктура (x200)

**Висновки.** Отримані результати дозволяють рекомендувати застосування в єдиному технологічному циклі іонної обробки (очищення) з'єднаних поверхонь та їх нагрів при дифузійному зварюванні, коли під дією іонного бомбардування створюються ювенільні поверхні з активованими шарами, що забезпечують прискорене формування міцного дифузійного з'єднання.

Найбільш ефективним є застосування іонної активації при дифузійному зварюванні однорідних, або близьких за хімічним складом металів, коли відсутній такий фактор інтенсифікації дифузійних процесів, як градієнт концентрації елементів в зоні контакту, а також, металів, які мають у своєму складі незначний вміст елементів-відновників, зокрема, вуглецю.

**Список використаних джерел**

1. Квасницький, В. В. Дифузійне зварювання різнорідних матеріалів з керованим напружено-деформованим станом / В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький, М. В. Матвієнко // Автоматичне зварювання. – 2018. – № 11-12. – С. 78-85.
2. Котельников, Д. И. Сварка давлением в тлеющем разряде / Д. И. Котельников. – Москва : Металлургия, 1981. – 116 с.
3. Болотов, Г. П. Зварювання та паяння в плазмі тліючого розряду / Г. П. Болотов. – Чернігів : ЧНТУ, 2016. – 143 с.
4. Impact of the Samples Surface State on the Glow Discharge Stability / M. Bolotov, G. Bolotov, S. Stepenko, P. Ihnatenko // *Metals' Treatment and Welding Processes. Appl. Sci.* – 2021. – № 11. – P. 1765.
5. Болотов Г. П. Активаци́йна дія тліючого розряду в умовах дифузійного зварювання / Г. П. Болотов, М. Г. Болотов, Р. М. Рижов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2011. – № 1 (22). – С. 18-21.
6. Bolotov, G. P. Modification of Materials Surface Layers by Low-Energy Ion Irradiation in Glow Discharge / G. P. Bolotov, M. G. Bolotov // *IEEE "Electronics and Nanotechnology ELNANO'2016": 36th International Conference (April 2016)*. – Kharkiv : IEEE, 2016. – P. 135-140.
7. Банов, М. Д. Расчетно-графический метод определения технологических параметров диффузионной сварки / М. Д. Банов, Н.Ф. Казаков // Диффузионное соединение в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов : V Межвуз. науч.-тех. конф. – Москва : ПНИЛДСВ, 1970. – С. 232-239.
8. Герцрикен, С. Д. Диффузия в металлах и сплавах / С. Д. Герцрикен, И. Я. Дехтяр. – Москва : Физматгиз, 1960. – 564 с.
9. Бабад-Захряпин, А. А. Радиационно-стимулируемая химико-термическая обработка / А. А. Бабад-Захряпин, Г. Д. Кузнецов. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 96 с.

**References**

1. Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F., Matviienko M.V. (2018). Dyfuziynne zvaryuvannya riznорidnykh materialiv z kerovanyim napruzhenо-deformovanym stanom [Diffusion welding of heterogeneous materials with a controlled stress-strain state]. *Avtomatychne zvaryuvannya – Automatic welding, 11-12*, 78-85.
2. Kotelnikov, D.I. (1981). *Svarka davleniyem v tleyushchem razryade [Glow discharge pressure welding]*. Metallurgiya.
3. Bolotov, G.P. (2016). *Zvaryuvannya ta payannya v plazmi tliyuchoho rozryadu [Welding and soldering in glow discharge plasma]*. CHNTU.
4. Bolotov, M., Bolotov, G., Stepenko, S., Ihnatenko, P. (2021). Impact of the Samples Surface State on the Glow Discharge Stability. *Metals' Treatment and Welding Processes. Appl. Sci.*, 11, 1765.
5. Bolotov, G.P., Bolotov, M.G., Ryzhov R.M. (2011). Aktivatsiina diia ylyiuchoho rozryadu v umovakh dyfuziynnoho zvaryuvannya [Activating action of the arcing discharge in the conditions of diffusion welding]. *Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademiyi – Bulletin of the Donbas State Machine-Building Academy*, 1(22), 18-21.
6. Bolotov, G. P., Bolotov, M. G. (2016). Modification of Materials Surface Layers by Low-Energy Ion Irradiation in Glow Discharge. *IEEE "Electronics and Nanotechnology ELNANO'2016" 36th International Conference (April 2016)* (pp. 135-140). IEEE.
7. Banov, M.D., Kazakov, N.F. (1970). Raschetno-graficheskiy metod opredeleniya tekhnologicheskikh parametrov diffuzionnoy svarki [Calculation-graphical method for determining the technological parameters of diffusion welding]. V *Mezhvuzovskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Diffuzionnoye soyedineniye v vakuume metallov, spлавov i nemetallicheskiх materialov» – Diffusion bonding in vacuum of metals, alloys and non-metallic materials: V Interuniversity. scientific-technical conf.* (pp. 232-239). PNILDSV.
8. Gertsriken, S.D., Dekhtyar, I.Ya. (1960). *Diffuziia v metallakh i splavakh [Diffusion in metals and alloys]*. Fizmatgiz.
9. Babad-Zakhryapin, A.A., Kuznetsov, G.D. (1982). *Radiatsionno-stimuliruyemaya khimiko-termicheskaya obrabotka [Radiation-stimulated chemical-thermal treatment]*. Energoizdat.

Отримано 16.11.2023

**Gennadiy Bolotov<sup>1</sup>, Maksym Bolotov<sup>2</sup>, Mykhailo Rudenko<sup>3</sup>, Vladyslav Grechka<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Welding and Construction Technologies  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [bolotovgp@gmail.com](mailto:bolotovgp@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>

Scopus: 6506157907. Researcher ID: H-5304-2014

<sup>2</sup>PhD of Technical Sciences, Association Professor of the Department of Welding and Construction Technologies  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [bolotovmg@gmail.com](mailto:bolotovmg@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>. Scopus Author ID: 57190377278

<sup>3</sup>Senior Lecturer at the Department of Welding and Construction Technologies  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine).

E-mail: [rudenko\\_bear@ukr.net](mailto:rudenko_bear@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>

Scopus Author ID: 57190378153. Web of Science: G-6235-2014

<sup>4</sup>Graduate Student at the Department of Welding and Construction Technologies  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [deadsilence166@gmail.com](mailto:deadsilence166@gmail.com)

**ACTIVATION OF MASS TRANSFER PROCESSES  
IN DIFFUSION WELDING IN A GLOW DISCHARGE**

*The paper examines the effect of ion treatment of contacting surfaces on the activation of mass transfer processes during diffusion welding of metals. Using the example of welding titanium alloys, stainless steel with armco-iron and steel 45, it was determined that the preliminary ion cleaning of the welded surfaces in a glow discharge in an argon environment significantly reduces the time of the incubation period associated with the diffusional absorption of oxygen layers adsorbed on the surface, and provides a reduction in time isothermal aging until the maximum strength of the connection is reached.*

*It is also shown that to ensure the strength of the welded joint at the level of strength of the base metal, it is sufficient to form a transition layer with a thickness of 3...4 microns, which experiences the largest plastic deformations at the first stage of welding. A further increase in the thickness of the transition layer practically does not lead to an increase in strength.*

*Ionic activation of the surfaces to be joined, which is carried out in a vacuum chamber immediately before welding, provides an increase in the diffusion coefficient in the transition zone by approximately three times compared to standard surface preparation by washing them in solvents, and by almost two orders of magnitude compared to the self-diffusion coefficient of the elements. It was established that when welding stainless steel with steel 45, the efficiency of ion activation of surfaces decreases, which is due to the reductive nature of the interaction of carbon contained in the composition of steel 45 in a significant amount, with oxides in the welding zone.*

*It is shown that the most effective application of ionic activation of surfaces during diffusion welding of metals that are homogeneous or similar in chemical composition, when there is no such important factor of intensification of mass transfer processes as the concentration gradient of elements in the welding zone, as well as metals that contain a small amount of reducing elements, in particular, carbon.*

**Keywords:** diffusion welding; glow discharge; surface activation; diffusion zone; mass transfer.

Fig.: 5. References: 9.

**Анатолій Жерносеков<sup>1</sup>, Валерій Костін<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, старший науковий співробітник,  
завідувач відділу імпульсних процесів і технологій дугового зварювання  
Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України (Київ, Україна)  
E-mail: [zhernosekov@paton.kiev.ua](mailto:zhernosekov@paton.kiev.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>. Scopus AuthorID: 6506774085

<sup>2</sup>доктор технічних наук, старший науковий співробітник,  
провідний науковий співробітник відділу фізико-хімічних досліджень матеріалів  
Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України (Київ, Україна)  
E-mail: [valerykkos@gmail.com](mailto:valerykkos@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>. Scopus AuthorID: 7006517066

**ВПЛИВ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ  
В ЗАХИСНИХ ГАЗАХ НА РОЗПОДІЛ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ  
У МЕТАЛІ ШВІВ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ**

Значне місце серед перспективних дугових способів зварювання посідає імпульсно-дугове зварювання плавким електродом. У теперішній час воно одержало подальший розвиток і широко застосовується в багатьох галузях промисловості: аерокосмічній, суднобудівній, хімічній, транспортній. Сучасне устаткування для цього способу є досить уніфікованим та не завжди може використовуватись для вирішення завдань автоматизації процесу.

Дослідження щодо розподілення неметалевих включень проводились із застосуванням розробленого імпульсного джерела живлення із багаторівневою формою імпульсу струму та систем автоматичної стабілізації параметрів процесу зварювання. Збільшення вольтоуту електродного дроту, що є характерним збуренням, наприклад, при механізованому імпульсно-дуговому зварюванні, може призвести до збільшення розмірів неметалевих включень. Застосування систем автоматичної стабілізації середніх значень напруги на дузі та зварювального струму дозволяє суттєво знизити об'ємну частку неметалевих включень. Найкращі результати щодо зменшення об'ємної частки та розмірів включень досягаються за рахунок застосування одночасно двох систем автоматичної стабілізації параметрів процесу імпульсно-дугового зварювання плавким електродом.

**Ключові слова:** неметалеві включення; вуглецеві сталі; імпульсно-дугове зварювання; виліт електрода; системи автоматичної стабілізації; параметри імпульсу.

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** У теперішній час імпульсно-дугове зварювання плавким електродом у захисних газах (ІДЗ) одержало подальший розвиток і широко застосовується в багатьох галузях промисловості: транспортній, суднобудівній, хімічній, аерокосмічній.

На низьколегованих сталях у міру збільшення тепловкладення або зменшення швидкості охолодження шва, мікроструктура змінюється від мартенситної до структури нижнього бейніту, верхнього бейніту, а потім і ферито-перлітної суміші. У деяких випадках мікроструктура металу швів складається з верхнього бейніту з жорсткою мартенсито-аустенітною складовою, що призводить до погіршення в'язкості таких швів. Одним із методів запобігання цього є використання ІДЗ, що дозволяє значно зменшити тепловкладення при відповідному збереженні пластичної мікроструктури низьколегрованої сталі за рахунок її подрібнення. Відомий метод подрібнення мікроструктури металу швів, у якому зростання  $\gamma$ -зерен гальмується дрібними неметалевими включеннями, наприклад частинками TiN або TiO, які рівномірно розпорошені у металі швів. Частинки TiO, що утворюються всередині  $\gamma$ -зерен, служать місцями зародження фериту (IGF). Ферит росте радіально від TiO частинок, і, як наслідок, грубі  $\gamma$ -зерна поділяються на дрібніші фрагменти, тим самим формуючи дрібнозернисту структуру, яка забезпечує високу міцність та в'язкість металу швів.

Тому актуальною задачею є дослідження впливу параметрів ІДЗ при дії виробничих збурень на розподіл неметалевих включень, мікроструктуру металу швів низьколегованих сталей.

**Постановка проблеми.** Неметалеві включення в металі швів значно впливають на структуру та властивості металу швів. Від їхніх розмірів залежать багато механічних властивостей зварних конструкцій. Ступінь впливу неметалевих включень на властивості металу швів залежить від їхньої форми, розмірів та розташування. Розподіл неметалевих



включень залежить також від способу зварювання. Наприклад, при ручному дуговому зварюванні хромистої сталі мартенситного класу СА-6NM електродами FOXCN 13/4 (BOHLER), неметалеві включення представляють оксиди та силікати розміром 1,3...2,3 мкм, а при зварюванні плавким електродом на постійному струмі в суміші 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub> їхній розмір зменшується до 0,5...0,9 мкм [1]. Достатньо мала кількість публікацій присвячена впливу форми імпульсного струму на неметалеві включення, а також визначення розподілення кількості неметалевих включень за розмірами залежно від дії виробничих збурень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Імпульсно-дугове зварювання – це контрольований метод перенесення металу плавкого електрода в захисному газі. Параметри імпульсів струму помітно впливають на характеристики зварювання, а саме стабільність дуги, якість зварного шва, зовнішній вигляд і геометрію шва. Неправильний вибір параметрів імпульсу може призвести до дефектів зварного шва, включаючи нерівномірне формування поверхні валика, несплавлення, підрізи та інші [2]. Тому важливо підібрати правильне поєднання параметрів імпульсного струму для зварювання матеріалів із різними теплофізичними властивостями в умовах дії збурень.

Електрозварювальне обладнання для дугового зварювання плавким електродом у захисних газах реалізує основні типи перенесення металу електрода, набувають розвитку перехідні типи перенесення металу електрода. Керований імпульсно-дуговий процес ефективно застосовується при зварюванні великого спектра металів, а також у багатьох комбінованих технологіях. Розробка сучасного електрозварювального обладнання, що реалізує різні типи перенесення металу електрода, має відбуватися з урахуванням керованого імпульсно-дугового процесу зварювання [3; 4]. Імпульсно-дугове зварювання дозволяє зменшити величину розбризкування металу, ширину зони термічного впливу, збільшити глибину проплавлення порівняно зі стаціонарним зварюванням [5; 6]. Так, у роботі [7] досліджується вплив режимів імпульсно-дугового зварювання на зміну параметрів шва, зону термічного впливу зварних з'єднань та механічні властивості низьколегованих сталей. Також актуальними залишаються роботи щодо оптимізації режимів імпульсно-дугового зварювання з використанням різних дротів, включаючи високолеговані зварювальні матеріали [8]. Перспективним є використання імпульсних режимів при зварюванні низьколегованих сталей трубопроводів [9].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Серійні джерела живлення для імпульсно-дугового зварювання плавким електродом переважно реалізують прямокутну форму імпульсу струму (рис. 1). Така форма не є оптимальною з точки зору управління процесами плавлення та перенесення крапель електродного металу. Аналіз публікацій показує, що також недостатньо розглянуті дослідження стосовно принципів управління процесом ІДЗ при дії різних збурень.

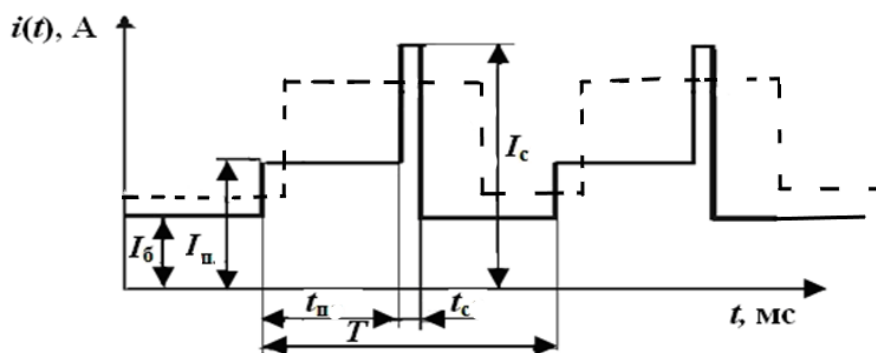


Рис. 1. Імпульси зварювального струму серійних джерел живлення (перервана лінія) та джерела живлення розробленого в ІЕЗ ім. Є. О. Патона (суцільна лінія)

В Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України була розроблена концепція багаторівневого імпульсного струму, у якому розділені процеси плавлення та перенесення металу (рис. 1). Базовий струм  $I_b$  використовується тільки для підтримання горіння дуги, імпульс плавлення з рівнем  $I_n$  та тривалістю  $t_n$  управляє плавленням краплі мінімізуючи її випаровування, а імпульс скидання з рівнем  $I_c$  та тривалістю  $t_c$  відповідає за перенесення краплі у всіх просторових положеннях. Також розроблені різні види систем автоматичної стабілізації процесу імпульсно-дугового зварювання (рис. 2) [10].

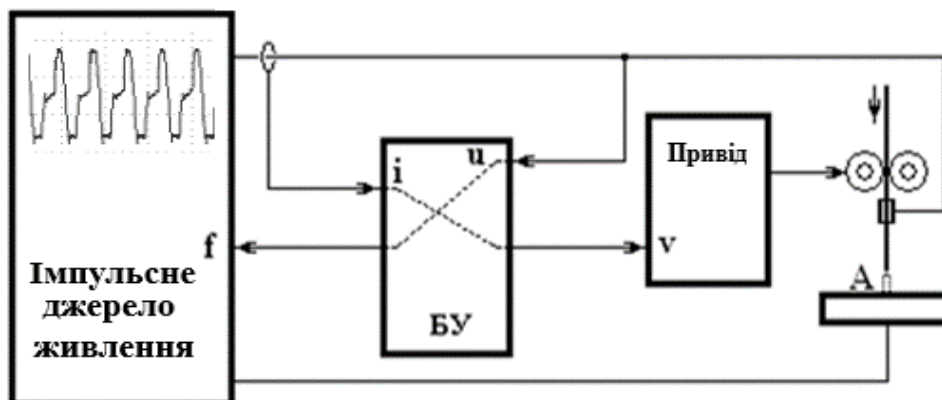


Рис. 2. Структурна схема імпульсного джерела живлення із системами автоматичної стабілізації параметрів процесу

Вирішенню задачі щодо розподілення неметалевих включень при імпульсно-дуговому зварюванні при зміні вильоту електрода присвячені дослідження, які наведені в цій статті.

**Метою статті** є підвищення якості металу швів при імпульсно-дуговому зварюванні на низьколегованих сталях шляхом зменшення неметалевих включень шляхом управління формою зварювального струму.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження щодо розподілення неметалевих включень проводились з застосуванням розробленого устаткування: імпульсного джерела живлення із багаторівневою формою імпульсу струму та систем автоматичної стабілізації параметрів процесу зварювання (S). Система автоматичної стабілізації середнього значення напруги на дузі (SU) була виконана з керуючим діянням на частоту імпульсів джерела живлення, а система стабілізації середнього значення струму (SI) з керуючим діянням на швидкість подавання зварювального дроту. Дослідження виконувались при імпульсно-дуговому зварюванні (наплавлення) на низьколегованій сталі 14Г2 дротом Св-08Г2С діаметром 1,2 мм у суміші газів 82 %Ar + 18 % CO<sub>2</sub> при: а) номінальному вильоті електрода; б) підвищеному вильоті без систем автоматичної стабілізації; в) підвищеному вильоті з SU; г) підвищеному вильоті із застосування обох систем SI + SU.

Методами оптичної металографії було визначено мікроструктурний стан металу швів при різних режимах ІДЗ. На рис. 3 наведено мікроструктуру металу в центрі шва при автоматичній ІДЗ без збурень по вильоту та зі зміною вильоту електрода. Основний метал сталі 14Г2 характеризується структурою, що складається із суміші верхнього та нижнього бейніту. При збільшенні вильоту спостерігається верхній та нижній бейніт, а також велика кількість мартенситної складової (рис. 3, б). Феритна складова практично відсутня. Застосування SU при підвищеному вильоті покращує структурні складові наплавленого металу швів. З'являються тонкі феритні прошарки, а також невеликі ділянки структурно-вільного фериту, деякі ділянки фериту орієнтовані по Відманштету. Також

спостерігаються більше дрібнодисперсна, порівняно зі структурою без S, суміш верхнього і нижнього бейніту (рис. 3, в). При застосуванні обох систем SI + SU у мікроструктурі металу швів, крім верхнього та нижнього бейніту, у структурі спостерігаються ділянки голчастого фериту (рис. 3, з).

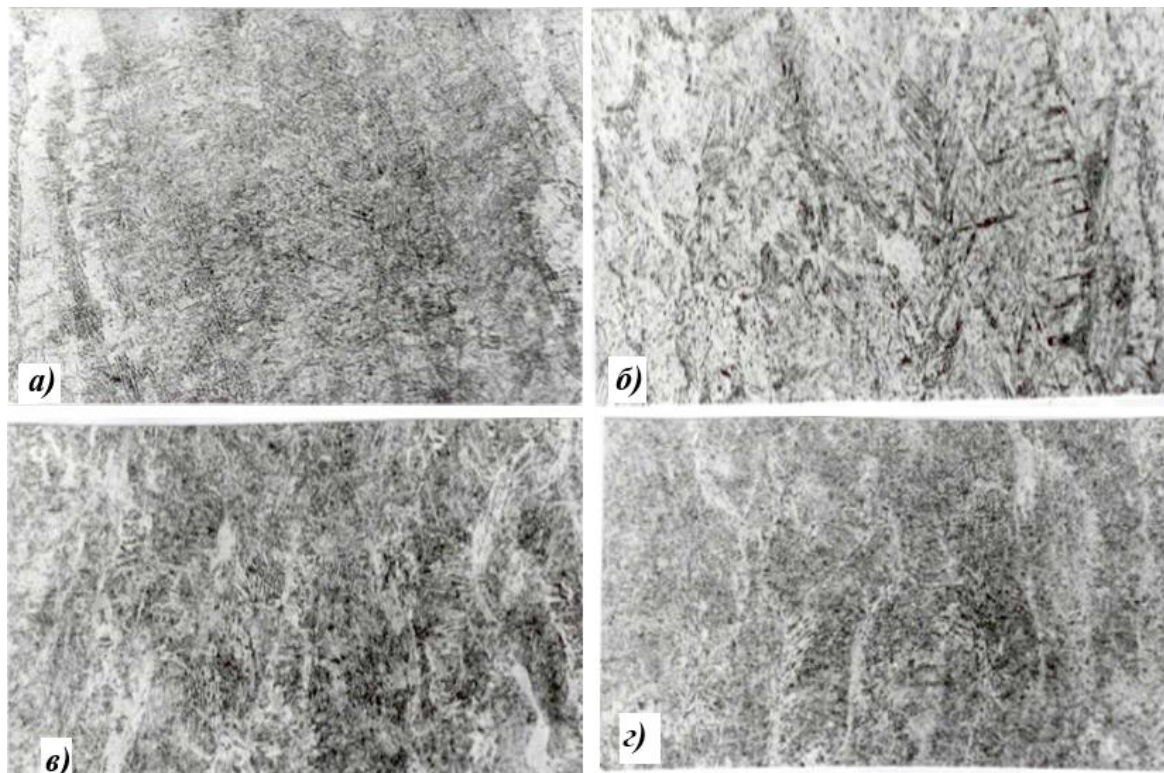


Рис. 3. Мікроструктура металу швів (збільшення X200) при автоматичній ІДЗ сталі 14Г2 дротом Св-08Г2С діаметром 1,2 мм у суміші газів 82 % Ar + 18 % CO<sub>2</sub>; V<sub>зв</sub> = 23 м/год, U<sub>д.сер</sub> = 25 В, I<sub>зв.сер</sub> = 250 А при:  
 а – номінальному вильоті електрода l<sub>w</sub> = 13 мм; б – підвищеному вильоті l<sub>w</sub> = 25 мм (без систем автоматичної стабілізації); в – підвищеному вильоті l<sub>w</sub> = 25 мм з SU;  
 з – підвищеному вильоті l<sub>w</sub> = 25 мм із застосування обох систем SI + SU

Дослідження розподілу неметалевих включень за кількістю та розмірами в металі швів на середньому струмі I = 250 А при зміні довжини вильоту (l<sub>w</sub>) наведено на (рис. 4). Об'ємні частки неметалевих включень (див. табл.).

Таблиця – Об'ємна частка неметалевих включень при дії збурень по вильоту електрода

| Режим   | Значення l <sub>w</sub> , мм | Об'ємна частка неметалевих включень, % |
|---------|------------------------------|----------------------------------------|
| Без S   | 13                           | 0,139                                  |
| Без S   | 25                           | 0,472                                  |
| SU      | 25                           | 0,261                                  |
| SU + SI | 25                           | 0,201                                  |

Без застосування систем автоматичної стабілізації процесу імпульсно-дугового зварювання плавким електродом при дії збурень по вильоту об'ємна частка неметалевих включень у металі шва сталі 14Г2 збільшується. Зниження об'ємної частки неметалевих включень спостерігається при застосуванні обох систем стабілізації SU та SI (рис. 4 та табл.).

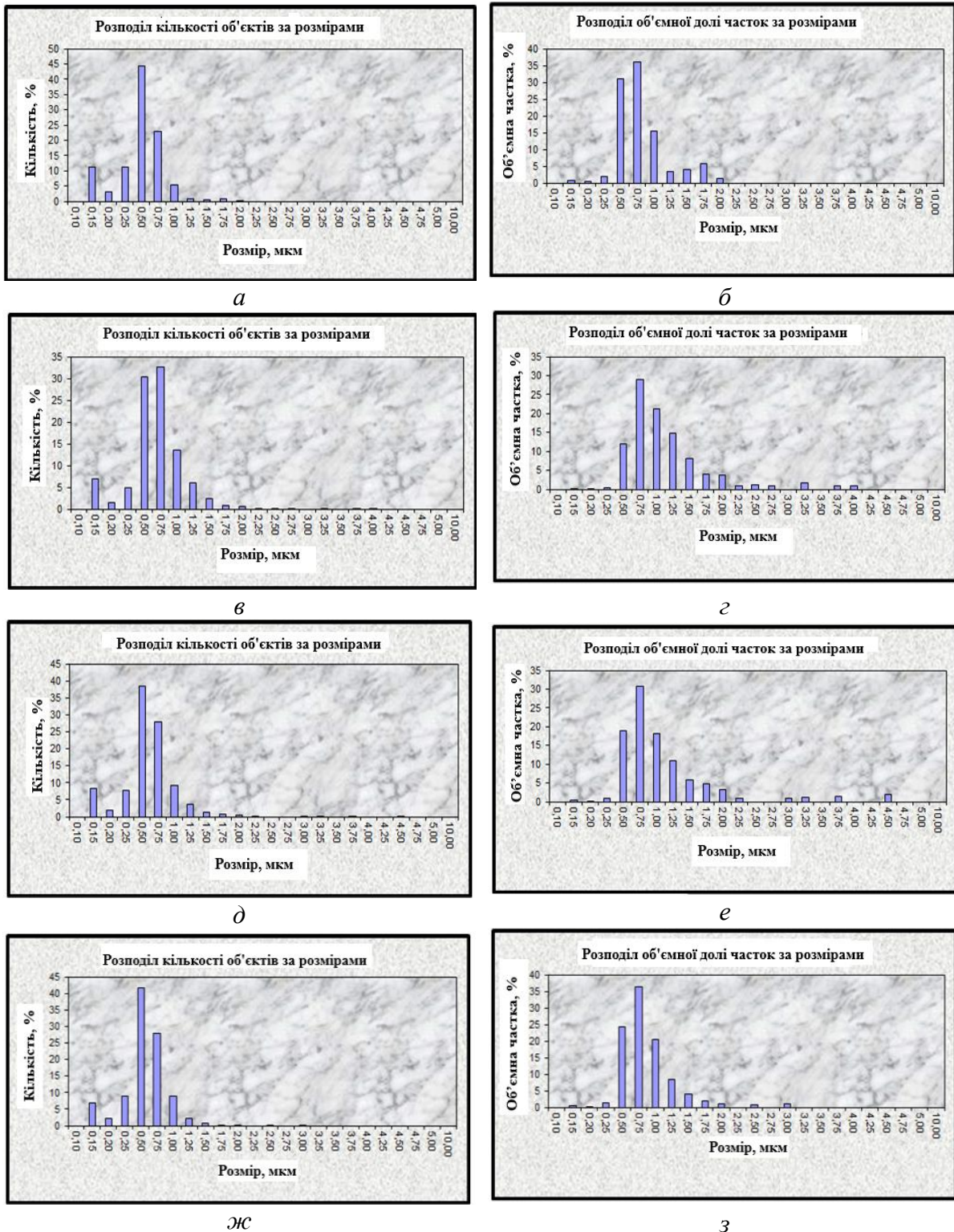


Рис. 4. Розподіл неметалевих включень по кількості (а, в, д, ж) та об'ємної частки (б, г, е, з) у металі швів при ІДЗ сталі 14Г2:

а, б –  $I = 250 \text{ A}$ ,  $l w = 13 \text{ мм}$ , без S; в, г –  $I = 250 \text{ A}$ ,  $l w = 25 \text{ мм}$ , без S;  
 д, е –  $I = 250 \text{ A}$ ,  $l w = 25 \text{ мм}$ , SU; ж, з –  $I = 250 \text{ A}$ ,  $l w = 25 \text{ мм}$ , SU та SI

Аналіз отриманих результатів показує, що найбільша об'ємна частка неметалевих включень формується при ІДЗ без використання систем автоматичної стабілізації параметрів процесу зварювання (S) та довжини вильоту ( $lw = 25$  мм) та становить 0,472 %. Найменша об'ємна частка неметалевих включень формується при ІДЗ при номінальній довжині вильоту ( $lw = 13$  мм) та становить 0,139 %. При використанні системи автоматичної стабілізації середнього значення напруги на дузі (SU) або використанні обох систем SI + SU об'ємна частка неметалевих включень у металі швів низьколегованих сталей становить відповідно 0,261 % (тільки SU) та 0,201 % (сумісно SU + SI). У зв'язку з тим, що оптимальна частка неметалевих включень, що утворює голчастий ферит, становить 0,25 %, то саме ці режими забезпечують необхідний структурний стан металу швів та необхідний рівень механічних властивостей.

**Висновки.** Збільшення вильоту електродного дроту, що є характерним збуренням, наприклад, при механізованому імпульсно-дуговому зварюванні, може призвести до збільшення розмірів неметалевих включень до 4,0 мкм. Застосування систем автоматичної стабілізації середніх значень напруги на дузі та зварювального струму дозволяє суттєво знизити об'ємну частку неметалевих включень. Найкращі результати щодо зменшення об'ємної частки та розмірів включень досягаються за рахунок застосування одночасно двох систем автоматичної стабілізації параметрів процесу імпульсно-дугового зварювання плавким електродом.

#### Список використаних джерел

1. Технологія МІГ зварювання хромистої сталі мартенситного класу SA-6NM / А. Р. Гаврик, А. К. Царюк, І. Г. Осипенко, О. В. Линник, О. В. Вавілов, О. Г. Кантор // Автоматичне зварювання. – 2023. – № 4. – С. 28-34. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.04.05>.
2. Palani, P. K. Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding / P. K. Palani, N. Murugan // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – № 172. – P. 1-10.
3. Жерносеков, А. М. Тенденции развития управления процессами переноса металла в защитных газах (Обзор) / А. М. Жерносеков // Автоматическая сварка. – 2012. – № 1. – С. 33-38.
4. Tomoyuki, U. Trends in developments in gas shield ed arc welding equipment in Japan / U. Tomoyuki // The Paton Welding J. – 2013. – № 10-11. – С. 53-60.
5. Effect of pulsed-arc welding modes on the change of weld metal and HAZ parameters of welded joints produced with Sv-08Kh20N9G7T wire / V. D. Poznyakov, A. V. Zavdoveev, A. A. Gajvoronsky et al. // The Paton Welding J. – 2018. – № 9. – С. 7-12.
6. Devakumaran, K. Thermal Characteristics of Weld and HAZ during Pulse Current Gas Metal Arc Weld Bead Deposition on HSLA Steel Plate / K. Devakumaran, P. K. Ghosh // Materials and Manufacturing Processes. – 2010. – № 7. – P. 616-630. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426910903229347>.
7. Вплив режимів імпульсно-дугового зварювання на зміну параметрів шва і ЗТВ зварних з'єднань та механічні властивості низьколегованих сталей / А. В. Завдовеев, В. Д. Позняков, С. Л. Жданов, М. Rogante, Т. Baudin // Автоматичне зварювання. – 2020. – № 12. – С. 23-29. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.12.03>.
8. Оптимізація за розрахунковим методом режимів імпульсно-дугового зварювання з використанням високолегованого зварювального матеріалу / А. В. Завдовеев, В. Д. Позняков, О. А. Гайворонський, А. М. Денисенко, Т. Baudin // Автоматичне зварювання. – 2021. – № 4. – С. 10-15. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.04.02>.
9. Вплив параметрів імпульсно-дугового зварювання на формування металу зварного шва та мікроструктуру зони термічного впливу сталі 09Г2С / С. Ю. Максимов, Д. М. Кражановський, Ю. А. Шепелюк, С. В. Осинська // Автоматичне зварювання. – 2022. – № 3. – С. 11-18. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.03.01>.
10. Жерносеков, А. М. Системы стабилизации процесса механизированной импульсно-дуговой сварки сталей / А. М. Жерносеков // Технологические системы. – 2008. – № 1. – С. 17-19.

### References

1. Havryk, A.R., Tsariuk, A.K., Osypenko, I.H., Lynnyk, O.V., Vavilov, O.V., & Kantor, O.H. (2023). Tekhnolohiia MIH zvariuvannia khromystoi stali martensytneho klasu SA-6NM [Technology of MIG welding of chromium steel of martensitic grade CA-6NM]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 4, 28-34. <https://doi.org/10.37434/as2023.04.05>.
2. Palani, P. K., & Murugan, N. (2006). Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 172, 1–10.
3. Zhernosekov, A.M. (2012). Tendentsii razvittia upravleniia protsessami perenosa metalla v zashchitnykh gazakh (Obzor) [Trends in the development of control of metal transfer processes in protective gases (Review)]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 1, 33-38.
4. Tomoyuki, U. (2013). Trends in developments in gas shield ed arc welding equipment in Japan. *The Paton Welding J.*, 10-11, 53–60.
5. Poznyakov, V.D., Zavdoveev, A.V., Gajvoronsky, A.A. et al.(2018). Effect of pulsed-arc welding modes on the change of weld metal and HAZ parameters of welded joints produced with Sv-08Kh20N9G7T wire. *The Paton Welding J.*, 9, 7-12.
6. Devakumaran, K., & Ghosh, P.K. (2010). Thermal Characteristics of Weld and HAZ during Pulse Current Gas Metal Arc Weld Bead Deposition on HSLA Steel Plate. *Materials and Manufacturing Processes*, 7, 616–630. <https://doi.org/10.1080/10426910903229347>.
7. Zavdoveev, A.V., Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Rogante, M., & Baudin, T. (2020). Vplyv rezhymiv impulsno-duhovoho zvariuvannia na zminu parametriv shva i ZTV zvarnykh ziednan ta mekhanichni vlastyvoli nyzkolehovanykh stali [Influence of pulsed-arc welding conditions on change of parameters of weld and haz of welded joints and mechanical properties of lowalloy steels]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 12, 23-29. <https://doi.org/10.37434/as2020.12.03>.
8. Zavdoveev, A.V., Poznyakov, V.D., Gaivoronsky, O.A., Denysenko, A.M., & Baudin, T. (2021). Optymizatsiia za rozrakhunkovym metodom rezhymiv impulsno-duhovoho zvariuvannia z vykorystanniam vysokolehovanoho zvariuvannia materialu [Use of calculation method for optimization of pulse-arc welding modes using highly alloy welding material]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 4, 10-15. <https://doi.org/10.37434/as2021.04.02>.
9. Maksymov, S.Yu., Krazhanovsky, D.M., Shepelyuk, Yu.A., & Osynska, S. V. (2022). Vplyv parametriv impulsno-duhovoho zvariuvannia na formuvannia metalu zvarnogo shva ta mikrostrukturu zony termichnogo vplyvu stali 09H2S [Effect of parameters of pulse-arc welding on the formation of weld metal and microstructure of heat-affected-zone of 09G2S steel]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 3, 11-18. <https://doi.org/10.37434/as2022.03.01>.
10. Zhernosekov, A.M. (2008). Zhernosekov, A. M. Sistemy stabilizatsii protsessu mekhanizyrovannoi ympulsno-duhovoivoi svarky stali [Systems for stabilizing the process of mechanized pulsed-arc welding of steels]. *Tekhnologicheskie sistemy – Technological systems*, 1, 17-19.

Отримано 16.11.2023

UDC 621.791.754

*Anatolii Zhernosekov<sup>1</sup>, Valery Kostin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Department of Pulsed Processes and Technology of Arc Welding  
Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [zhernosekov@paton.kiev.ua](mailto:zhernosekov@paton.kiev.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>. **Scopus Author ID:** [6506774085](https://orcid.org/0000-0002-6404-2221)

<sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher,

Leading Researcher of the Department of Physical and Chemical Research of Materials  
Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [valerykkos@gmail.com](mailto:valerykkos@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>. **Scopus Author ID:** [7006517066](https://orcid.org/0000-0002-2677-4667)

### INFLUENCE OF PULSE ARC WELDING IN SHIELDING GASES ON THE DISTRIBUTION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN WELD METAL OF LOW-ALLOY STEEL

*A significant place among promising arc welding methods is occupied by pulsed arc welding with a fusible electrode. Nowadays, it has received further development and is widely used in many branches of industry: aerospace, shipbuilding, chemical, transport. The existing equipment for this method is quite unified and cannot always be used to solve the tasks of process automation.*

*Non-metallic inclusions in the weld metal significantly affect the structure and properties of the weld metal. Many mechanical properties of welded structures depend on their size. The degree of influence of non-metallic inclusions on the properties of the weld metal depends on their shape, size and location. The distribution of non-metallic inclusions also depends on the welding method. The purpose of the article is to improve the quality of weld metal during pulse-arc welding on low-alloy steels by reducing non-metallic inclusions by controlling the shape of the welding current.*

*Research on the distribution of non-metallic inclusions was carried out using such developed equipment as a pulse power source with a multi-level current pulse shape and systems for automatic stabilization of welding process parameters. The system of automatic stabilization of the average value of the voltage on the arc was made with the control action on the frequency of pulses of the power source, and the system of stabilization of the average value of the current with the control action on the speed of the welding wire.*

*An increase in the departure of the electrode wire, which is a characteristic disturbance, for example, in mechanized pulse-arc welding, can lead to an increase in the size of non-metallic inclusions. The use of systems of automatic stabilization of the average values of arc voltage and welding current allows to significantly reduce the volume fraction of non-metallic inclusions. The best results in reducing the volume fraction and the size of inclusions are achieved by simultaneously using two systems of automatic stabilization of the parameters of the pulse-arc welding process with a fusible electrode.*

**Key words:** *non-metallic inclusions; carbon steels; pulse-arc welding; electrode voltage; automatic stabilization systems; pulse parameters.*

*Fig.: 4. Table: 1. References: 10.*

**Володимир Кравець<sup>1</sup>, Олександр Кравець<sup>2</sup>, Сергій Лапковський<sup>3</sup>,  
Володимир Фролов<sup>4</sup>, Максим Гладський<sup>5</sup>, Людмила Данилова<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>інженер кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

**E-mail:** [bond118@meta.ua](mailto:bond118@meta.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-6867-4858>. **ResearcherID:** [ITU-8413-2023](https://orcid.org/0009-0005-6867-4858)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

**E-mail:** [om.kravets@ukr.net](mailto:om.kravets@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7468-0956>. **ResearcherID:** [IUQ-7186-2023](https://orcid.org/0000-0002-7468-0956)

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

**E-mail:** [Lapkovsky@ukr.net](mailto:Lapkovsky@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. **ResearcherID:** [HCH-3837-2022](https://orcid.org/0000-0002-9870-9231)

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

**E-mail:** [y.k.frolov@gmail.com](mailto:y.k.frolov@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>. **ResearcherID:** [ACH-0071-2022](https://orcid.org/0000-0002-3697-286X)

<sup>5</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

**E-mail:** [gladsky@gmail.com](mailto:gladsky@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4547-7131>. **ResearcherID:** [Q-1624-2017](https://orcid.org/0000-0002-4547-7131)

<sup>6</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

**E-mail:** [ldanylova@outlook.com](mailto:ldanylova@outlook.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4442-3959>. **ResearcherID:** [ADU-9265-2022](https://orcid.org/0000-0002-4442-3959)

## СИСТЕМНО-СТРУКТУРНИЙ АСПЕКТ ВИБОРУ ЕЛЕМЕНТІВ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

*Стаття присвячена вирішенню задач технологічного підготовки виробничого підприємства. Описані запропоновані методологічні основи формалізації процесу вибору структурних елементів роботизованих систем з урахуванням конкретних обмежень та виробничих умов. Запропонована методологія дає змогу в систематизованому вигляді охоплювати не тільки вже існуючі на виробництві технічні рішення, але й знайти такі, створення яких можливе, а, у певних випадках, навіть доцільне; знаходити існуючі технічні рішення, які вже реалізовані безпосередньо на виробництві або такі, що забезпечені технічною документацією, що буде сприяти мінімізації часу пошуку та оперативному вибору готових рішень.*

**Ключові слова:** структурний елемент; вибір; технологічне підготовка; роботизоване виробництво; робототехнічна система; промисловий робот.

*Рис.: 2. Бібл.: 28.*

**Актуальність теми дослідження.** Для сучасного машинобудівного виробництва, яке є базою науково-технічного прогресу, характерне стрімке зростання обсягів продукції. Ця обставина являє собою наслідок значних темпів збільшення номенклатури виробів, її частотою змінюваністю та вдосконалення конструкцій виробів. Нині стан економічного та промислового розвитку країни насамперед визначається рівнем автоматизації виробництва, впровадженням у різні сфери промисловості промислових роботів (ПР) і робототехнічних систем (РС). Вирішувати найскладніші задачі, що стоять перед промисловістю, можливо лише за рахунок значного скорочення термінів технологічного підготовки виробничого підприємства (ТПРВ), впровадження сучасного технологічного обладнання, зокрема ПР і РС. Таким чином, дослідження в галузі проектування РС завжди будуть актуальними.

**Постановка проблеми.** Безсумнівно, що задачі створення РС не повинні розглядатися окремо від загальних концепцій розвитку та вдосконалення виробничих систем машинобудівного виробництва. Створення РС є дуже важливою, але тільки однією із ланок усієї множини робіт, що присвячені вдосконаленню та комплексній автоматизації в усіх галузях виробничої діяльності підприємств.



Багатогранність та складність проблем створення РС призводять до того, що технічне переоснащення машинобудівних підприємств на основі роботизації останніх сполучено з великими капітальними та трудовими витратами і призводить до того, що кардинального значення набуває ступінь підвищення якості, ступінь обґрунтованості та оптимальності проектних рішень, які забезпечують досягнення найвищих експлуатаційних і техніко-економічних показників функціонування РС. У зв'язку з цим ТПРВ повинно системно базуватися на єдиній науково-методологічній основі, що, по-перше, вимагає подальше поглиблення досліджень із технології машинобудування як наукового напрямку, а по-друге, поширення спектра робіт у галузі ТПРВ виробів. Вочевидь, у світлі нових технологічних і технічних можливостей необхідна принципово новий погляд на питання ТПРВ і проектування РС.

Зростання технічної оснащеності й технічна інтеграція виробничих процесів в умовах роботизації, що пов'язана з цим, накладає вагомий відбиток на критерії вибору окремих структурних елементів РС.

На відміну від створюваних традиційних виробничих систем, у яких основними структурними елементами, що реалізуються у відповідних конструкторсько-технологічних рішеннях, є верстатне обладнання (ВО), технологічна оснастка (ТО) та різальний інструмент (РІ), у РС спектр структурних елементів значно розширюється: РС, окрім зазначених вище складових, включає ПР, технічні засоби керування (ТЗК), транспортне обладнання (ТрО), технічні засоби зберігання (ТЗЗ) тощо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У результаті аналізу інформаційних джерел складається таке враження, що нині створення РС набуло статус повністю самостійної технологічної задачі, яка вирішується на базі використання найсучаснішого арсеналу обладнання та створення принципово нових програмних і технічних засобів. Саме з цієї причини в останні роки питанням вибору структурних елементів РС було присвячено досить багато публікацій та наукових досліджень як українських, так і зарубіжних авторів [1–28].

Що стосується українських авторів, то в роботах [1–3] наведено методологічні основи вибору ВО. Також у роботах [1; 2] наведені деякі рекомендації стосовно вибору РІ для ВО та деякі поради щодо вибору ТрО. У роботі [1] можна знайти деякі фрагменти методології вибору ПР, а у роботі [2] – деякі рекомендації стосовно вибору ТЗЗ. У роботі [4] наведено поради стосовно вибору ТО, а у роботі [5] – щодо вибору ТЗК.

Що стосується зарубіжних авторів, то в роботах [6–9] наведено рекомендації щодо вибору ВО, у роботах [10–13] – щодо вибору РІ, у роботах [14–16] – щодо вибору ПР, у роботах [17–19] – щодо вибору ТЗК, у роботах [20–22] – щодо вибору ТО, у роботах [23–25] – щодо вибору ТрО, у роботах [26–28] – щодо вибору ТЗЗ.

Ретельний аналіз вищенаведених літературних джерел дозволив дійти висновку, що в них питання вибору структурних елементів РС розглядалися лише у межах локальних підсистем РС, без урахування взаємозв'язків між цими підсистемами.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Цілком очевидно, що зараз методологія створення РС повинна виходити за рамки вирішення лише технічних проблем і повинна включати всебічне та глибоке пророблення технології, управління й організації, які є не тільки взаємозалежними із суміжними технічними проблемами, але й безпосередньо впливають на їх правильне вирішення. Аналіз останніх досліджень і публікацій, що були присвячені роботизації виробництва, дозволяють зробити висновок, що проблема вирішення задачі обґрунтованого вибору структурних елементів РС наразі не формалізована та не вирішена.

**Метою статті** є вирішення задачі вибору структурних елементів робототехнічних систем і формалізація такого процесу.



1) кількість варіантів альтернативних технічних рішень, що з'являється в полі зору розробника, безпосередньо залежить від його кваліфікації;

2) призначення великої кількості варіантів альтернативних технічних рішень і їх техніко-економічного аналіз суттєво збільшують трудомісткість усіх проєктних робіт, що дуже часто не відповідає нормативним термінами остаточного ухвалення рішення;

3) не має гарантії, що при евристичному виборі певної множини можливих альтернативних варіантів у поле зору проєктувальника потрапить саме оптимальний варіант технічного рішення задачі.

З метою запобігання вищезазначених недоліків пропонується декілька напрямів, відповідно до яких повинне здійснюватися вдосконалення методів вибору структурних елементів РС:

– розроблення методів, що забезпечать оперативність отримання та гарантовану повноту множини альтернативних варіантів рішень як об'єктів аналізу;

– розроблення системи проєктування, що забезпечить раціональну організацію та скорочення трудомісткості проєктного пророблення варіантів технічних рішень з урахуванням усієї багатогранності обумовлюючих зв'язків;

– розроблення критеріїв і методів оцінювання варіантів технічних рішень.

В основі загальних методологічних положень вибору структурних елементів РС, які будуть розглянуті нижче, лежить той факт, що для кожного з елементів, який наведено на рис. 1, можливе перебування в одному з трьох станів:

Стан  $O$  – це стан, при якому структурний елемент  $e$ , маючи певні параметри та характеристики, є основним обумовлюючим структурним елементом, тобто цей елемент зумовлює вибір іншого елемента:

$$e_i^O = (E)_i^O, \quad (1)$$

де  $(E)_i^O$  – вектор значень параметрів, що характеризує елемент  $e_i^O$ .

Стан  $D$  – це стан, при якому структурний елемент  $e$ , маючи певні параметри та характеристики, є додатковим обумовлюючим структурним елементом, тобто цей елемент накладає додаткові обмеження або вимоги на вибір іншого елемента:

$$e_j^D = (E)_j^D, \quad (2)$$

де  $(E)_j^D$  – вектор значень параметрів, що характеризує елемент  $e_j^D$ .

Стан  $III$  – це стан, при якому структурний елемент  $e$  є шуканим, тобто необхідне визначення вектора значень параметрів  $(E)_k^{III}$  цього елемента.

Символом  $e$  позначено одиничний структурний елемент, однак дуже часто обмеження, умови або цілі вибору визначаються саме на множині елементів, іншими словами, має місце бути деякий узагальнений елемент  $E$ :

$$E_i = \bigcup_{r=1}^n e_{ir}, \quad (3)$$

де  $r$  – порядковий номер структурного елемента у множині  $E_i$ ,  $e_{ir} \in E_i$ .

В усіх наведених вище записах  $i, j, k$  – це індекси, що відбивають вид розглянутого структурного елемента РС.

Грунтуючись на наведених поняттях і враховуючи прийняті позначення, згідно зі схемою, що наведена на рис. 1, можна записати:

$$e_{TO}^{III} \Leftarrow e_B^O \wedge e_{BO}^D \wedge e_{PP}^D, \quad (4)$$

тобто вибір верстатного пристрою визначається параметрами виробу як об'єкта виробництва з урахуванням вимог, що накладаються ВО та ПР, або

$$e_{ГО}^{III} \Leftarrow E_B^O \wedge e_{BO}^D \wedge e_{ПР}^D, \quad (5)$$

тобто вибір верстатного пристрою визначається параметрами деякої множини деталей  $E_B^O$ , яку планується обробляти на цьому верстатному пристрої з урахуванням усіх вимог, що накладаються ВО та ПР.

Дані формалізовані записи відображають факт здійснення вибору структурного елемента  $e_i^{III}$ , але не вказують на ступінь деталізації і конкретизації здійснення вибору в залежності від етапу та стадії ТПРВ, на якому він проводиться.

Очевидно, що процес вибору всіх основних структурних елементів здійснюється в кілька етапів, з поступовим підвищенням ступеня конкретизації визначення структурного елемента. Тоді, з урахуванням етапності такого вибору, формалізований запис матиме такий вигляд:

$$(e_{ГО}^{III})_{\mu} \Leftarrow e_B^O \wedge (e_{BO}^D)_{\xi} \wedge (e_{ПР}^D)_{\xi}, \quad (6)$$

де  $\mu$  і  $\xi$  – індекси рівнів етапів, на яких відповідно досліджуються інформаційне забезпечення вибору й інформаційна визначеність структурного елемента, що вибирається.

Принцип етапності вибору має важливе методологічне значення для обґрунтованого прийняття остаточного проектного рішення, тому що на перших етапах розробник не володіє всім необхідним спектром інформації про структурні елементи  $e_i^O$  і  $e_j^D$  для остаточного прийняття рішення по структурному елементу  $e_i^{III}$  і, рухаючись за ланцюгом  $(e_i^{III})_1 \rightarrow (e_i^{III})_2 \rightarrow \dots \rightarrow e_i^{III}$ , за рахунок послідовного наближення та конкретизації можна досягти оптимального остаточного результату.

Не менш важливе значення в задачі вибору альтернативних технічних рішень визначення структурних елементів РС має задача визначення тієї області можливих рішень, у межах якої повинен здійснюватися вибір. Можна виділити 4 наступні області.

Перша область відповідає множині  $E_{i1}^{III}$  матеріально реалізованих і вже готових технічних рішень структурного елемента  $i$ -го виду. Наприклад, такою множиною може бути парк верстатного обладнання з ЧПК, парк ПР, наявний запас РІ, якими володіє підприємство тощо.

Друга область відповідає множині  $E_{2i}^{III}$  вже готових рішень, на які є вся необхідна технологічна та конструкторська документація, тобто перша область входить до складу другої:

$$E_{1i}^{III} \subset E_{2i}^{III}. \quad (7)$$

Третя область відповідає множині  $E_{3i}^{III}$  всіх відомих проектних рішень, у тому числі й таких, на які необхідна технологічна та конструкторська документація відсутня:

$$E_{1i}^{III} \subset E_{2i}^{III} \subset E_{3i}^{III}. \quad (8)$$

Підмножина  $E_{3i}^{III} \setminus E_{2i}^{III}$  множини  $E_{3i}^{III}$  об'єднує всі ті технічні рішення, які можна знайти в інформаційних джерелах.

Четверта область відповідає множині  $E_{4i}^{III}$  всіх можливих допустимих технічних рішень:

$$E_{1i}^{III} \subset E_{2i}^{III} \subset E_{3i}^{III} \subset E_{4i}^{III}. \quad (9)$$

Залежно від умов проведення ТПРВ і проектування РС у вищенаведену ієрархічну множинну структуру можуть бути додані специфічні умови на визначення відповідних областей можливих технічних рішень. Як приклад, це може бути область технічних рішень, що регламентується галузевими стандартами, каталогами та типажми. Очевидно, що ця область буде відповідати підмножині множини  $E_{3i}^{III}$ .

Нині у практиці ТПРВ усе більше поширюється застосування інформаційно-пошукових систем (ІПС) технологічного призначення, що призначені для пошуку, видачі та збереження довідкової та нормативної інформації та інформації щодо технічних рішень елементів РС. Функціонування ІПС технологічного призначення засноване на використанні масивів інформації, які за своєю суттю належать до областей множин  $E_{1i}^{III}$  і  $E_{2i}^{III}$ . Розвиток ІПС технологічного призначення варто вважати одним з найголовніших напрямків удосконалення методів вибору структурних елементів РС. Використання ІПС технологічного призначення дозволяє з масиву збереженої інформації  $E_{2i}^{III}$  з гарантованою повнотою оперативно отримувати всю множину можливих технічних рішень  $(e_i^{III})$ , які відповідають запитам проектувальника.

У загальному вигляді синтез пошукового припису (ПП) й отримання відповідних технічних рішень може бути записане в такому вигляді:

$$E_i^O \wedge E_j^D \Rightarrow \text{ПП}_k \Leftrightarrow (e_k^{III}) \subset E_{2k}^{III}. \quad (10)$$

У результаті функціонування ІПС технологічного призначення проектувальник отримує підмножину  $(e_i^{III})$ . Від складу цієї множини залежить подальший хід робіт з проектування РС, під час яких можуть виникати такі ситуації.

Перша ситуація, коли  $(e_i^{III}) = e_i^{III}$ , тобто було отримано єдине рішення, яке приймається за остаточне. Друга ситуація, коли  $e_i^{III}$  містить декілька технічних рішень, з яких на основі аналізу та техніко-економічних розрахунків проектувальникові необхідно вибрати остаточне єдине рішення. Третя ситуація, коли  $(e_i^{III}) = \emptyset$ , тобто взагалі не було отримано технічних рішень. Зрозуміло, що така ситуація найбільш важка для проектувальника. У разі виникнення цієї ситуації можливі два шляхи подальшого проведення проектних робіт.

Перший шлях – це зміна початкових умов ПП, головним чином за рахунок зміни інформації про додатково обумовлюючі структурні елементи  $e_j^D$ . При цьому технічні рішення, які були отримані з ІПС технологічного призначення, виявляються менш важливими щодо первісного запиту і, як слідство, вимагають ретельного аналізу на предмет їх подальшого використання і відповідного додаткового проектного пророблення.

Другий шлях – це пропрацювання нових технічних рішень, що перебувають за межами області  $E_{2i}^{III}$ , тобто таких масивів інформації, яких не існує в ІПС технологічного призначення. У даному випадку проектувальник має можливість:

– по-перше, здійснювати пошук технічних рішень на рівні патентного або бібліографічного пошуку, тобто тих рішень, які відповідно наведеній вище систематизації знаходяться в області підмножини  $E_{3i}^{III} \setminus E_{2i}^{III}$ ;

– по-друге, почати розроблення принципово нових технічних рішень, які найбільш повно відповідають поставленим вимогам. Фактично такі рішення знаходяться в області підмножини  $E_{4i}^{III} \setminus E_{3i}^{III}$ .

З розгляду вказаних вище ситуацій можливі такі обставини:

– сучасні ІПС технологічного призначення, в основі яких лежать масиви інформації, що належать області  $E_{2i}^{III}$ , в умовах ТПРВ і проектування РС не можуть повністю задовольнити інформаційні потреби проектувальника, особливо у випадку, коли виникає третя ситуація;

– у тих випадках, коли засобами ІПС технологічного призначення знайдено варіанти технічних рішень (перша та друга ситуації), буде відсутня будь-яка гарантія, що ці рішення раціональніші за ті, які можуть існувати в областях множин  $E_{3i}^{III}$  і  $E_{4i}^{III}$ .

З вищезазначеного випливає, що подальший розвиток ІПС технологічного призначення необхідно орієнтувати на створення та використання таких масивів інформації, організаційна основа яких містить морфологічні принципи класифікації ймовірних можливих технічних рішень структурних елементів РС. Морфологічний класифікатор (МК) формально описує область множини  $E_{4i}^{III}$  і, тим самим, надає можливість систематизувати опис областей множин  $E_{1i}^{III}$ ,  $E_{2i}^{III}$  і  $E_{3i}^{III}$ . Це означає, що в полі МК відповідно можуть бути відзначені структурні елементи, що належать всім множинам. У результаті пошуку можливих технічних рішень у полі МК останні можуть бути знайдені проектувальником у кожній з областей. Остаточний вибір альтернативного варіанта повинен проводитися на основі техніко-економічного аналізу з урахуванням усіх можливих витрат на реалізацію даного варіанта. Пропонується, що побудова МК, яка забезпечує максимально повне охоплення всіх можливих технічних рішень будь-якого структурного елемента РС, складається з чотирьох етапів.

Перший етап полягає у виявленні характерних ознак  $i$ -го класу структурних елементів РС як об'єктів проектування або вибору. Кожна з обраних ознак обов'язково повинна відбивати певний аспект функціональної, конструктивної або фізичної сутності класу структурних елементів, які розглядається, та забезпечувати інформативність опису, якої буде достатньою для здійснення вибору варіантів за заданим пошуковим приписом. Обрана сукупність ознак розглядається як низка характеристичних функцій, які утворюють базис простору ймовірних технічних рішень.

Другий етап полягає у визначенні вектора дискретних станів для кожної характеристичної функції. Складність цього етапу полягає в тому, що, по-перше, на даному етапі необхідно з максимальною повнотою формувати всю множину ймовірних дискретних станів для кожної функції, що надалі буде гарантувати морфологічну повноту МК, і по-друге, на цьому етапі відсутні будь-які принципи визначення складу множини дискретних станів. Для кожного конкретного випадку визначення складу множини дискретних станів окреслюється специфічними особливостями характеристичної функції та залежить від кваліфікації, досвіду і творчих здібностей розробника МК.

У самому загальному випадку можливо запропонувати два методи аналізу. Перший метод – це комбінаторний аналіз, при якому дискретні стани функції представляють собою певні комбінаторні перестановки  $P_n$  або сполучення  $C_n^m$  елементарних взаємозалежних ознак, які утворюють кожний із дискретних станів.

Другий метод – це морфологічний аналіз, при якому дискретні стани функції отримуються прямим добутком декількох сукупностей елементарних як взаємозалежних, так і взаємозалежних ознак.

Якщо характеристична функція по своїй суті являє собою непереривну множину певних величин, тобто має якесь кількісне вираження, то всі дискретні стани такої функції утворюються шляхом її поділення на відповідні діапазони.

У результаті виконання другого етапу кожна характеристична функція може бути записана як вектор дискретних станів. Наприклад:

$$X(x_i) = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n); \tag{11}$$

$$Y(y_j) = (y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m); \tag{12}$$

...

$$V(v_k) = (v_1, v_2, \dots, v_k, \dots, v_p); \tag{13}$$

$$W(w_q) = (w_1, w_2, \dots, w_q, \dots, w_r). \tag{14}$$

Прямий добуток усіх отриманих векторів надає можливість отримати шукану множину можливих альтернативних варіантів технічних рішень класу III структурних елементів:

$$X(x_i) \cdot Y(y_j) \cdot \dots \cdot V(v_k) \cdot W(w_q) = E_{4t}^{III}. \tag{15}$$

Третій етап полягає в побудові математичної моделі МК. Принцип побудови МК спрямований на приведення N-мірної моделі класифікації до такого вигляду, що може забезпечити графічну побудову МК. Для досягнення поставленої мети формуються парні добутки векторів типу (16).

$$(X(x_i) \cdot Y(y_j)) \cdot \dots \cdot (V(v_k) \cdot W(w_q)) = E^1 \cdot E^2 \cdot \dots \cdot E^u = E_{4t}^{III}. \tag{16}$$

Допускається довільне попарне об'єднання функцій, однак найбільш доцільним буде об'єднання взаємозумовлених характеристичних функцій, що полегшить виконання четвертого етапу побудови МК.

Прямий добуток кожної пари функцій являє собою матрицю властивостей, що характеризують усі можливі поєднання дискретних станів характеристичних функцій, які перемножуються, і має наступний вигляд:

$$E^1 = \begin{bmatrix} x_1 y_1 & x_2 y_1 & \dots & x_i y_1 & \dots & x_n y_1 \\ x_1 y_2 & x_2 y_2 & \dots & x_i y_2 & \dots & x_n y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1 y_j & x_2 y_j & \dots & x_i y_j & \dots & x_n y_j \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1 y_m & x_2 y_m & \dots & x_i y_m & \dots & x_n y_m \end{bmatrix}. \tag{17}$$

Аналогічним чином записуються матриці  $E^2, \dots, E^u$ .

Множина  $E_{4t}^{III}$ , яка була утворена як добуток просторів, що визначаються множинами  $E^2, \dots, E^u$ , також може бути записана у вигляді матриці:

$$x_i \cdot y_j \cdot \dots \cdot v_k \cdot w_q = e_{ts}^{III} \in E_{4t}^{III}. \tag{18}$$

Елементи матриці (18) – це сполучення всіх дискретних станів характеристичних функцій.

Принцип утворення матриці у графічному вигляді, що відображає множину  $E_{4t}^{III}$  і являє собою модель МК, наведено на рис. 2. З практичної точки зору кожний елемент  $e_{ts}^{III}$  МК відповідає певному ймовірному технічному рішенню, характеристики якого визначають за дискретними станами по координатах даного елемента у матриці класифікатора.

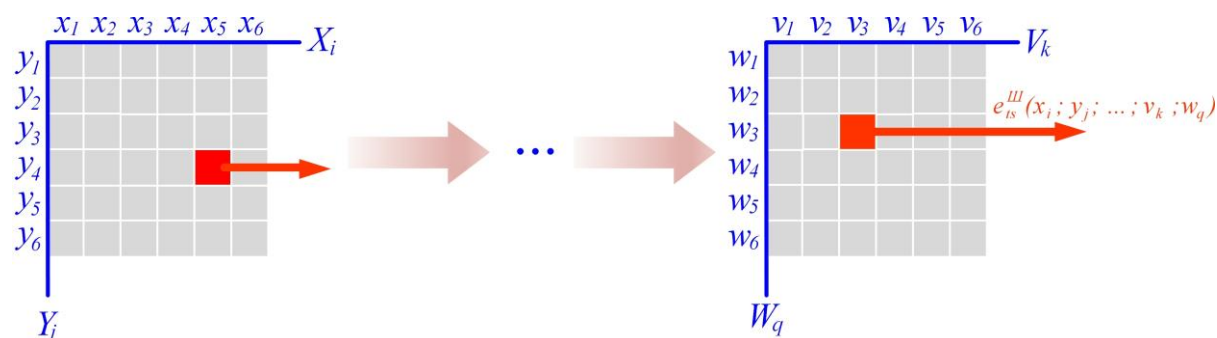


Рис. 2. Модель морфологічного класифікатора

Джерело: розроблено авторами.

Із самої суті побудови моделі МК очевидно, що кількість усіх характеристичних функцій, згідно з якими класифікуються об'єкти аналізу, теоретично може бути необмеженою. На практиці це означає, що множина ймовірних технічних рішень, що класифікуються, за рахунок збільшення кількості ознак, які характеризують об'єкти розгляду, у разі потреби може розглядатися з різними ступенями деталізації. Однак треба мати на увазі, що надмірна деталізація може призвести до значного збільшення розмірів класифікатора, що, у свою чергу, ускладнить його практичне використання.

Четвертий етап полягає у побудові класифікатора проектних рішень.

Побудована на третьому етапі матриця МК відбиває всю ймовірну множину варіантів технічних рішень. Загальна кількість можливих варіантів визначається добутком  $n \cdot m \cdot \dots \cdot p \cdot r$  і, зрозуміло, може досягти великого значення. Проте слід зазначити, що не кожен з альтернативних варіантів технічних рішень буде являти собою практично здійсненне та економічно доцільне рішення. Тому на цьому етапі здійснюється аналіз матриць, з яких складається МК, і виділення практично можливих, а згодом і економічно доцільних поєднань дискретних станів.

**Висновки.** Як висновки слід зазначити, що розроблення МК технічних рішень структурних елементів РС дозволяє:

- 1) у систематизованому вигляді охопити не тільки вже всі існуючі на виробництві технічні рішення, але й знайти такі, створення яких можливе і доцільне;
- 2) відзначити у полі МК існуючі технічні рішення, які вже реалізовані безпосередньо на виробництві, або ті, які забезпечені технічною документацією, що буде сприяти мінімізації часу пошуку та оперативному вибору готових рішень;
- 3) формалізувати процедуру вибору структурних елементів РС з урахуванням усіх конкретних обмежень та виробничих умов.

#### Список використаних джерел

1. Іванов, В. О. Технологічні основи гнучких автоматизованих виробництв / В. О. Іванов, І. М. Дегтярьов. – Суми : СумДУ, 2022. – 203 с.
2. Пуховський, Є.С. Проектування гнучких виробничих систем машинобудування 6 навч. посіб. / Є. С. Пуховський, Ю. М. Малафеев, С. С. Добрянський. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 204 с.
3. Геометричний аспект вибору моделей основного технологічного обладнання / С. Лапковський, Л. Данилова, В. Фролов, В. Приходько, М. Гладський // Технічні науки та технології. – 2023. – № 4(30). – С. 40-49. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-40-49](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-40-49).
4. Приходько, В. П. Розроблення та розрахунок конструкцій верстатних пристроїв : навч. посіб. / В. П. Приходько. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 89 с.
5. Автоматизація виробничих процесів : підручник / І. В. Ельперін, О. М. Пулена, В. М. Сідлецький, С. М. Швед. – Київ : Ліра-К, 2017. – 378 с.
6. 10 Tips For Selecting the Perfect CNC Machine [Electronic resource] / Supplier Shop Tips. – Access mode: <https://www.xometry.com/resources/shop-tips/10-tips-for-selecting-the-perfect-cnc-machine/>.



7. 7 Steps to Choosing the Right CNC Machine Tool [Electronic resource] / Hwacheon. – Access mode: <https://hwacheonasia.com/7-steps-choosing-right-cnc-machine-tool>.
8. Choosing a CNC Machine: 4 Key Aspects to Consider [Electronic resource] / Machinemfg. – Access mode: <https://www.machinemfg.com/how-to-choose-cnc-machine>.
9. Top 6 Trends Shaping the CNC Machine Tool Industry [Electronic resource] / Machinemfg. – Access mode <https://www.machinemfg.com/major-trends-in-the-cnc-machine-tool-industry>.
10. 8 Important Considerations When Selecting CNC Machine Cutting Tools [Electronic resource] / Stecker Machine Blog. – Access mode: <https://www.steckermachine.com/blog/selecting-cnc-machine-cutting-tools>.
11. Arezoo, B. Selection of cutting tools and conditions of machining operations using an expert system / B. Arezoo, K. Ridgway, A. M. A. Al-Ahmari // Computers in Industry. – 2000. – № 1 (42). – С. 43-58. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(99\)00051-2](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(99)00051-2).
12. Introduction About Tool Steel [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.sansmachining.com/introduction-about-tool-steel>.
13. Selection of CNC Machining Tools and Determination of Cutting Amount [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.sansmachining.com/selection-of-cnc-machining-tools-and-determination-of-cutting-amount>.
14. Choosing the right Manufacturing robots for your needs [Electronic resource]. – Access mode: <https://standardbots.com/blog/how-to-choose-the-right-manufacturing-robot-for-your-needs>.
15. Factors to consider while selecting appropriate industrial robots [Electronic resource]. – Access mode: <https://roboticsbiz.com/factors-to-consider-while-selecting-appropriate-industrial-robots>.
16. Industrial robot selection procedure [Electronic resource] / Intelligent e-learning systems in robotics/mechatronics. – Access mode: <https://www.tthk.ee/inlearcs/3-industrial-robot-selection-procedure>.
17. Advantages of CNC Machining over Conventional [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.fairlawntool.com/blog/advantages-cnc-machines>.
18. Factors to Consider When Choosing a CNC Machine [Electronic resource] / Cncgoldmine. – Access mode: <https://cncgoldmine.com/factors-to-consider-when-choosing-a-cnc-machine>.
19. How to Choose the Right CNC Machine for Your Business [Electronic resource] / Scan2CAD – Access mode: <https://www.scan2cad.com/blog/cnc/choose-cnc-machine>.
20. 3 Tips For Choosing The Right Type Of Clamp [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.murraycorp.com/post/3-tips-for-choosing-the-right-type-of-clamp>.
21. Clamping or Positioning: Which Comes First in Part Machining? [Electronic resource] / Machinemfg. – Access mode: <https://www.machinemfg.com/clamping-or-positioning>.
22. Unlocking Precision: A Guide To CNC Fixtures In Machining [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.sansmachining.com/unlocking-precision-a-guide-to-cnc-fixtures-in-machining>.
23. Advantages of Automated Storage and Retrieval System in Different Industries. [Electronic resource] / Material Handling. – Access mode: <https://www.srsi.com/advantages-of-automated-storage-and-retrieval-system>.
24. Benefits Of Using A Conveyor System. [Electronic resource] / 6 Main Benefits of Conveyor Systems – Access mode: <https://diamondphoenix.co.uk/diamond-phoenix-news/6-main-benefits-of-conveyor-systems>.
25. What are Automated Material Handling Systems? AMHS Equipment and Benefits. [Electronic resource] / Material Handling. – Access mode: <https://www.srsi.com/what-is-automated-material-handling-system>.
26. 6 Types of Warehouse Storage Systems [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.camcode.com/blog/types-of-warehouse-storage-systems>.
27. What to Look for When Choosing a Warehouse [Electronic resource] / Warehousing & Fulfillment. – Access mode: <https://www.easyship.com/blog/how-to-select-a-warehouse>.
28. How to Build an Automated Warehouse [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.camcode.com/blog/how-to-build-an-automated-warehouse>.

### References

1. Ivanov, V.O., & Dehtiarov, I.M. (2022). *Tekhnolohichni osnovy hnuchkykh avtomatyzovanykh vyrobnytstv [Technological foundations of flexible automated production]*. Sumskyi derzhavnyi universytet.

2. Pukhovskiy, Ye.S., Malafieiev, Yu.M., & Dobrianskiy, S.S. (2015). *Proektuvannia hnuchkykh vyrobnychykh system mashynobuduvannia [Designing flexible production systems of mechanical engineering 6 studies. Manual]*. NTUU «KPI».
3. Lapkovskiy, S., Danylova, L., Frolov, V., Prykhodko, V., & Hladskiy, M. (2023). Heometrychnyi aspekt vyboru modelei osnovnoho tekhnolohichnoho obladdannia [The geometrical aspect of the choice of models of basic technological equipment]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 4(30), 40–49. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-40-49](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-40-49)
4. Prykhodko, V.P. (2022). *Rozroblennia ta rozrakhunok konstruksii verstatnykh prystroiv [Development and calculation of the designs of machine tools: training manual]*. KPI im. Ihoria Sikorskoho.
5. Elperin, I.V., Pupena, O.M., Sidletskiy, V.M., Shved, S.M. (2017). *Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv [Automation of production processes: a textbook]*. Lira-K.
6. 10 Tips For Selecting the Perfect CNC Machine. (May 26, 2022). *Supplier Shop Tips*. <https://www.xometry.com/resources/shop-tips/10-tips-for-selecting-the-perfect-cnc-machine>.
7. 7 Steps to Choosing the Right CNC Machine Tool. (March 7, 2023). *Hwacheon*. <https://hwacheonasia.com/7-steps-choosing-right-cnc-machine-tool>.
8. Choosing a CNC Machine: 4 Key Aspects to Consider. (November 29, 2023). *Machinemfg*. <https://www.machinemfg.com/how-to-choose-cnc-machine>.
9. Top 6 Trends Shaping the CNC Machine Tool Industry. (September 19, 2023). *Machinemfg*. <https://www.machinemfg.com/major-trends-in-the-cnc-machine-tool-industry>.
10. 8 Important Considerations When Selecting CNC Machine Cutting Tools. (July 9, 2022). *Stecker Machine Blog*. <https://www.steckermachine.com/blog/selecting-cnc-machine-cutting-tools>.
11. Arezoo, B., Ridgway, K., Al-Ahmari, A.M.A. (2000). Selection of cutting tools and conditions of machining operations using an expert system. *Computers in Industry*, 1(42), 43–58. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(99\)00051-2](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(99)00051-2).
12. Introduction About Tool Steel. (January 31, 2023). *Blog*. <https://www.sansmachining.com/introduction-about-tool-steel>.
13. Selection of CNC Machining Tools and Determination of Cutting Amount. (April 12, 2022). *Blog*. <https://www.sansmachining.com/selection-of-cnc-machining-tools-and-determination-of-cutting-amount>.
14. Choosing the right Manufacturing robots for your needs. (July 13, 2023). *Featured*. <https://standardbots.com/blog/how-to-choose-the-right-manufacturing-robot-for-your-needs>.
15. Factors to consider while selecting appropriate industrial robots. (January 14, 2021). *Logistics & Industrial*. <https://roboticsbiz.com/factors-to-consider-while-selecting-appropriate-industrial-robots>.
16. Industrial robot selection procedure. (dateless). *Intelligent e-learning systems in robotics/mechanics*. <https://www.tthk.ee/inlearcs/3-industrial-robot-selection-procedure>.
17. Advantages of CNC Machining over Conventional. (October 17, 2022). *Blog*. <https://www.fair-lawntool.com/blog/advantages-cnc-machines>.
18. Factors to Consider When Choosing a CNC Machine. (8 жовтня 2023 року). *Cncgoldmine*. Взято 15 грудня 2023 р. <https://cncgoldmine.com/factors-to-consider-when-choosing-a-cnc-machine>.
19. How to Choose the Right CNC Machine for Your Business. (May 8, 2023). *Scan2CAD*. <https://www.scan2cad.com/blog/cnc/choose-cnc-machine>.
20. 3 Tips For Choosing The Right Type Of Clamp. (dateless). *Blogs*. <https://www.murray-corp.com/post/3-tips-for-choosing-the-right-type-of-clamp>.
21. Clamping or Positioning: Which Comes First in Part Machining? (September 25, 2023). *Machinemfg*. <https://www.machinemfg.com/clamping-or-positioning>.
22. Unlocking Precision: A Guide To CNC Fixtures In Machining. (December 12, 2023). *Blog*. <https://www.sansmachining.com/unlocking-precision-a-guide-to-cnc-fixtures-in-machining>.
23. Advantages of Automated Storage and Retrieval System in Different Industries.. (August 25, 2022). *Material Handling*. <https://www.srsi.com/advantages-of-automated-storage-and-retrieval-system>.
24. Benefits Of Using A Conveyor System. (July 18, 2022). *6 Main Benefits of Conveyor Systems*. <https://diamondphoenix.co.uk/diamond-phoenix-news/6-main-benefits-of-conveyor-systems>.
25. What are Automated Material Handling Systems? AMHS Equipment and Benefits. (November 25, 2021). *Material Handling*. <https://www.srsi.com/what-is-automated-material-handling-system>.
26. 6 Types of Warehouse Storage Systems. (August 9, 2023). *Blog*. <https://www.camcode.com/blog/types-of-warehouse-storage-systems>.

27. What to Look for When Choosing a Warehouse. (May 28, 2020). *Warehousing & Fulfillment*. <https://www.easyship.com/blog/how-to-select-a-warehouse>.

28. How to Build an Automated Warehouse. (August 9, 2023). *Blog*. <https://www.camcode.com/blog/how-to-build-an-automated-warehouse>.

Отримано 20.11.2023

UDC 621.865.8

**Volodymyr Kravets<sup>1</sup>, Oleksandr Kravets<sup>2</sup>, Serhii Lapkovsky<sup>3</sup>,  
Volodymyr Frolov<sup>4</sup>, Maksym Gladskyi<sup>5</sup>, Liudmyla Danylova<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Engineer of the Department of Machine Design

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [bond118@meta.ua](mailto:bond118@meta.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-6867-4858>. **ResearcherID:** [ITU-8413-2023](https://orcid.org/0009-0005-6867-4858)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Design

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [om.kravets@ukr.net](mailto:om.kravets@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7468-0956>. **ResearcherID:** [IUQ-7186-2023](https://orcid.org/0000-0002-7468-0956)

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [Lapkovsky@ukr.net](mailto:Lapkovsky@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. **ResearcherID:** [HCH-3837-2022](https://orcid.org/0000-0002-9870-9231)

<sup>4</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [v.k.frolov@gmail.com](mailto:v.k.frolov@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>. **ResearcherID:** [ACH-0071-2022](https://orcid.org/0000-0002-3697-286X)

<sup>5</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [gladsky@gmail.com](mailto:gladsky@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4547-7131>. **ResearcherID:** [Q-1624-2017](https://orcid.org/0000-0002-4547-7131)

<sup>6</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [ldanylova@outlook.com](mailto:ldanylova@outlook.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4442-3959>. **ResearcherID:** [ADU-9265-2022](https://orcid.org/0000-0002-4442-3959)

## SYSTEM-STRUCTURAL ASPECT OF THE SELECTION ELEMENTS OF ROBOTIC SYSTEMS

*The article is devoted to solving the problems of technological preparation of robotic production. Currently, the creation of robotic systems has acquired the status of a completely independent technological task, which is solved on the basis of a significant reduction in the terms of technological preparation of production and the creation of fundamentally new software and technical tools. The growth of technical equipment and the technical integration of production processes under the conditions of robotization, which is related to this, have a significant impact on the selection criteria of individual structural elements of robotic systems. In contrast to the created traditional production systems, in which the main structural elements implemented in the relevant design and technological solutions were only machine tools, technological equipment and cutting tools, in robotic systems the range of structural elements is significantly expanded: the robotic systems, in addition to the specified structural elements, contain technical means of control, industrial robots, transport equipment, technical means of storage, etc. It is quite obvious that now the methodology of creating robotic systems should go beyond solving only technical problems and should include a comprehensive and deep study of technology, management and organization, which are not only interdependent with related technical problems, but also directly affect their correct solution. The analysis of the latest researches and publications, which were devoted to the robotization of production, allows us to conclude that the problem of solving the task of a justified choice of structural elements of robotic systems is currently not formalized and not solved. The article offers methodological bases for the formalization of the process of selecting structural elements of robotic systems, taking into account the specific limitations and production conditions. The proposed methodology makes it possible to systematically cover not only all technical solutions already existing in production, but also to find those, the creation of which is possible and, in some cases, even expedient; find existing technical solutions that are already implemented directly in production or that are provided with technical documentation, which will help minimize search time and prompt selection of ready-made solutions.*

**Keywords:** structural element; choice; technological preparation; robotic production; robotic system; industrial robot.

**Fig. 2. References:** 28.

**Олексій Васильєв<sup>1</sup>, Яковенко Андрій<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна)

E-mail: [a.s.vasiliev.76@gmail.com](mailto:a.s.vasiliev.76@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9914-5482>

<sup>2</sup>аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна)

E-mail: [andrii.yakovenko95@gmail.com](mailto:andrii.yakovenko95@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0818-6332>

**ВІБРАЦІЙНА МАШИНА ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ТА УЩІЛЬНЕННЯ ПОВЕРХОНЬ**

*Вібраційні плити є складовою частиною засобів малої механізації та використовуються переважно для поширеного ущільнення різноманітних матеріалів, таких як пісок, гравій, бітумні суміші та інші. Методи вібропробування широко застосовуються в будівництві дорожніх покриттів та інших інфраструктурних споруд. Самохідні вібраційні плити також застосовуються в інших будівельних процесах, таких як укладання, засипка траншей, земельні роботи та укладання тротуарної плитки. Вони забезпечують ефективне ущільнення матеріалів за допомогою вібропробування. Стаття має на меті визначення оптимального обладнання для проведення ущільнення матеріалів при будівництві невеликих об'єктів. Розглянуто вибір віброплит та їхніх робочих органів, які якнайкраще відповідають вимогам і потребам ущільнення різних матеріалів на обмежених будівельних майданчиках. Аналіз різних типів робочих органів для різних поверхонь сприяє покращенню процесу ущільнення та забезпечує оптимальні умови для різних видів будівельних матеріалів, враховуючи їхні унікальні властивості. Загалом, цей аналіз може значно покращити стратегії ущільнення матеріалів у будівельній галузі, сприяючи підвищенню якості будівництва.*

**Ключові слова:** вібрація; віброплита; вібробуджувач; вібраційна машина; дебаланс; аналіз параметрів; вимішені коливання.

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 14.

**Актуальність теми дослідження.** Вібраційна плита є невід'ємною частиною будівельного обладнання, використовуваного для ущільнення різних матеріалів у будівництві. Цей механізований пристрій виявляється незамінним при роботах із піском, гравієм, бітумом та іншими сумішами, що використовуються для створення дорожніх покриттів, засипки траншей, ландшафтного дизайну, тротуарної плитки, бруківки та інших областей, де важливе ущільнення [1].

Варто відзначити, що віброплити можна класифікувати за способом переміщення на реверсивні та неревверсивні. Реверсивні моделі здатні рухатися вперед та назад, що робить їх більш гнучкими у використанні. Основними двигунами для цих машин є 4-тактні бензинові двигуни для моделей до 160 кг, а для більших моделей використовуються дизельні та електричні двигуни [2; 3; 4].

Компактні розміри та простота управління роблять ці машини ідеальними для роботи в обмежених просторах на будівельних майданчиках. Їхня маневреність дозволяє легко проводити ущільнювальні роботи навіть в умовах обмеженого доступу. Такі властивості роблять віброплити необхідним інструментом для забезпечення якісного та ефективного ущільнення різних будівельних матеріалів [5; 6].

Також важливо відзначити, що віброплити зазвичай мають лише один робочий орган – плиту, яка забезпечує контакт із поверхнею матеріалу. Це конструктивне рішення сприяє точному та концентрованому впливу вібрацій на матеріал, що важливо для досягнення оптимального ущільнення. Однак залежно від конкретних завдань та типів поверхонь можуть використовуватися різні форми та розміри робочих плит, щоб оптимально врахувати особливості матеріалу та потреби будівельного процесу [7; 8].

При виборі вібраційної плити для конкретного завдання важливо враховувати тип матеріалу, який потребує ущільнення, та характеристики робочого майданчика, щоб забезпечити оптимальну продуктивність та якість виконаних робіт.

**Постановка проблеми.** У будівельній галузі важливо досягти надійного ущільнення матеріалів для забезпечення стійкості та тривалості конструкцій. Вирішення проблеми вибору оптимальних режимів та робочих інструментів є ключовим завданням. Аналіз різних типів робочих органів для різних поверхонь може сприяти покращенню процесу ущільнення та забезпечити оптимальні умови для різних видів будівельних матеріалів, враховуючи їхні унікальні властивості. Враховуючи різні умови роботи та характеристики поверхні, можна підкреслити необхідність удосконалення методу ущільнення для досягнення найкращих результатів. Загалом, цей аналіз може зробити значний внесок у розробку ефективних стратегій ущільнення матеріалів у будівельній галузі, сприяючи підвищенню якості будівництва.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Процес ущільнення матеріалів у будівництві базується на навантаженні, яке застосовується до ущільнюваного шару матеріалу майданчика. Під впливом цього навантаження відбувається зближення мінеральних частинок, їх більш компактне розміщення і, як наслідок, зменшення відстаней між частинками матеріалу. Для оцінки ступеня ущільнення використовують параметри щільності і пористості. У робочих органах ущільнювальних машин застосовують три основні методи: укочування, трамбування та вібрація зображено на рис. 1 [9; 10].

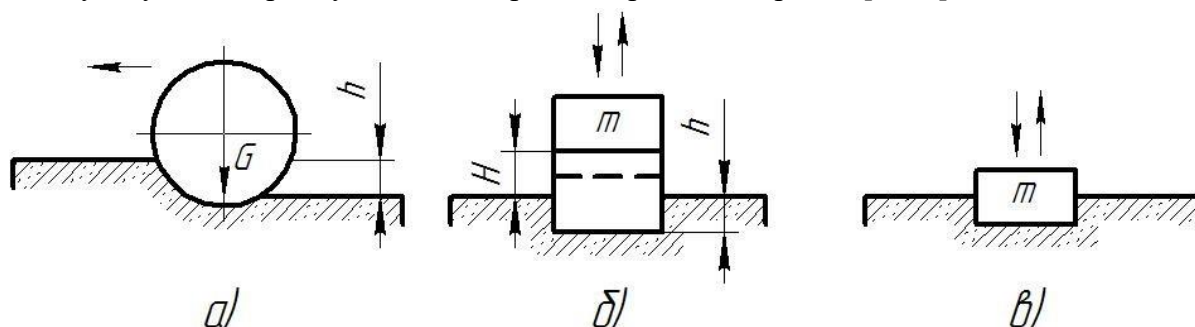


Рис. 1. Методи ущільнення дорожніх матеріалів:  
а – укочування; б – трамбування; в – вібрація

Метод укочування найбільш ефективний для суглинків та супісків, де великомасивний коток багаторазово проїжджає по поверхні ґрунту та під дією власної ваги забезпечує його ущільнення. Традиційний коток має гладку поверхню, що дозволяє застосовувати його для укочування різних типів ґрунтів. Використовуючи цей метод, важливо враховувати масу котка, оскільки це визначає товщину ущільнюваного шару, при використанні ручного котка це обмеження 10-15 см для піску і 8-10 см для глини [2; 5; 11].

Метод трамбування використовується для ущільнення піщаних, гравійних та галькових ґрунтів. Принцип дії цього методу полягає в тому, що на поверхню ґрунту опускають трамбувальну плиту значною вагою, що може досягати кількох тонн, і має значні розміри, порівнянні зі звичайними [3; 4].

Цей метод, доступний для самостійного використання в будівництві, є найпростішим у технічному плані. Трамбування ефективно на різних типах ґрунтів, але найкращі результати досягаються на ґрунтах зі зниженою вологістю. Також слід враховувати, що велика вага трамбувальної плити може ставити обмеження на доступ до деяких місць, але це компенсується високою продуктивністю методу.

Таким чином, трамбування залишається ефективним і простим методом ущільнення ґрунту, особливо для ділянок з обмеженим обладнанням та обмеженими фінансовими ресурсами.

Вібраційний метод ущільнення вважається одним із найефективніших. Цей метод ґрунтується на використанні високочастотних коливань маси для передачі кінетичної енергії гранулам матеріалу, що розташовані в області впливу вібратора. Під час цього процесу різноманітні за масою та розміром частки матеріалу набувають різних прискорень, які взаємодіють та переміщуються. З часом між більш крупними частками заповнюються дрібніші, що призводить до збільшення щільності матеріалу [4; 12].

Важливо відзначити, що віброущільнення є високоефективним методом, оскільки він дозволяє досягати великої щільності матеріалу порівняно швидко та ефективно. Використання високочастотних коливань дозволяє покращити ущільнення матеріалу на різних глибинах. Цей метод також відзначається можливістю застосування на різних типах ґрунтів та в різних умовах будівельних робіт [13].

Проаналізувавши наукові джерела, можна визначити, що метод віброущільнення реалізується за допомогою віброплит та віброкотків.

Віброплита, яка використовується для ущільнення ґрунту та сипучих матеріалів, рекомендована для площ, що не перевищують 1000 м<sup>2</sup>. Продуктивність вібраційної техніки залежить від глибини ущільнення, ширини ущільненої смуги, швидкості укочування та кількості проходів. Важливим аспектом ущільнення є також фактор часу, який впливає на міцність ущільненого шару під впливом вібраційної машини [14].

Отже, враховуючи ці аспекти, можна досягти оптимального використання вібраційної техніки для ефективного та стійкого ущільнення поверхневого шару.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Під час вивчення віброплит для ущільнення матеріалів у будівельній галузі можна виділити проблему вивчення форми робочого органу та його вплив на різні типи ущільнюваного матеріалу. Дослідження в цьому напрямку може привести до подальших інновацій та покращень у сфері вібротехніки для будівельної галузі. Ключовий напрям досліджень полягає в подальшому розширенні знань про взаємодію робочого органу віброплити з різними типами ущільнюваного матеріалу.

**Мета статті.** Дослідження спрямоване на визначення оптимального обладнання для проведення ущільнення матеріалів при будівництві невеликих об'єктів. Мета – розглянути вибір віброплит та їхніх робочих органів, які найкращим чином відповідають вимогам і потребам в ущільненні різних матеріалів на невеликих будівельних майданчиках.

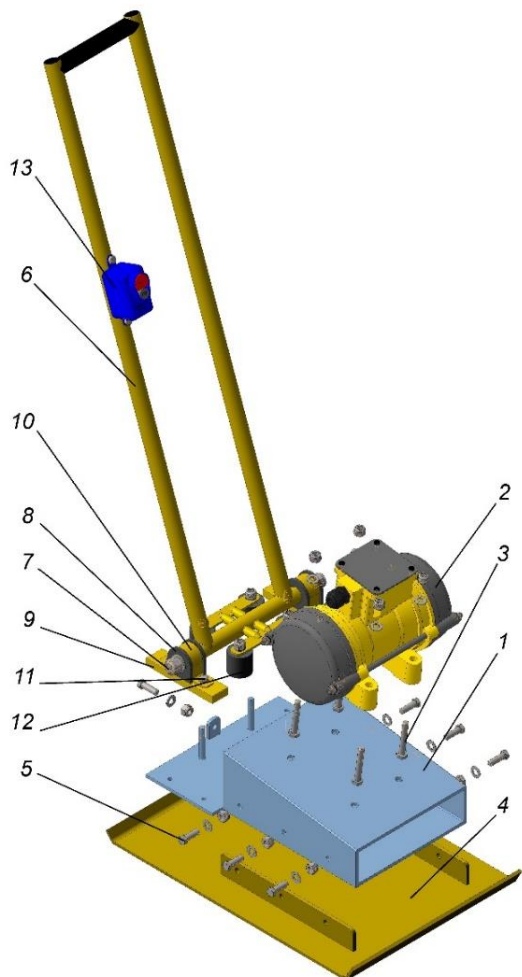
**Виклад основного матеріалу.** Якість ущільнення матеріалів на майданчику будівництва має великий вплив на ключові характеристики цього місця. Рівність поверхні, несуча здатність, стійкість до зношування та здатність протидіяти впливу атмосферних явищ визначаються ефективністю процесу ущільнення.

Узагальнюючи процес ущільнення, його основною метою є прикладання тим чи іншим способом до поверхні конструктивного шару місця під будівництво навантаження, під дією якого проходить зближення мінеральних частинок, їх більш компактне розміщення і зменшення пор. Оцінка ступеня ущільнення проводиться з урахуванням щільності та пористості [12].

Важливо враховувати, що належне ущільнення сприяє не лише рівності поверхні, але й підвищує несучу здатність місця під будівництво, а також забезпечує стійкість до впливу навантажень будівель та атмосферних умов, таких як зволоження та температурні коливання.

Для виконання операцій з ущільнення ґрунту за результатами теоретичних досліджень та конструкторських розроблень нами була розроблена вібраційна машина зі змінним робочим органом, яка зображена на рис. 2, б. Ця конструкція дозволяє підібрати оптимальний робочий орган для кожного виду ущільнюваного матеріалу й тим самим підвищити якість ущільнення.

Вібраційна плита зображена на рис. 2, *а* складається з корпусу *1*, до якого за допомогою болтів та гайок *3* прикріплюється вібродвигун *2* (Кентавр МВ-750Е). Цей вібродвигун є змінним і за потреби його можна замінити на більш або менш потужний. Змінний робочий орган *4* у вигляді гладкої плити кріпиться до корпусу за допомогою болтів *5*.



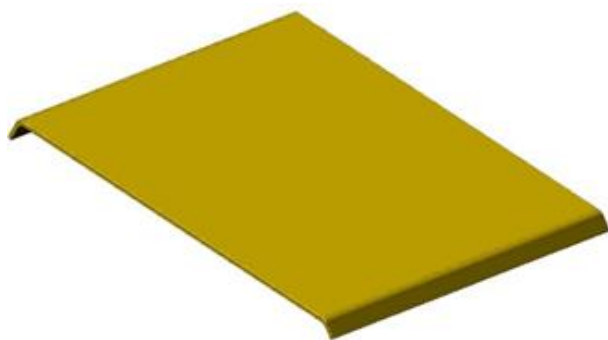
*а*



*б*

*Рис. 2. Вібраційна плита:  
а – вигляд загальний вібраційної машини; б – натурний зразок*

Робочий орган розробленої нами вібраційної плити є змінним. На рис. 3 зображено приклади змінних робочих органів цієї вібраційної установки.



*а*



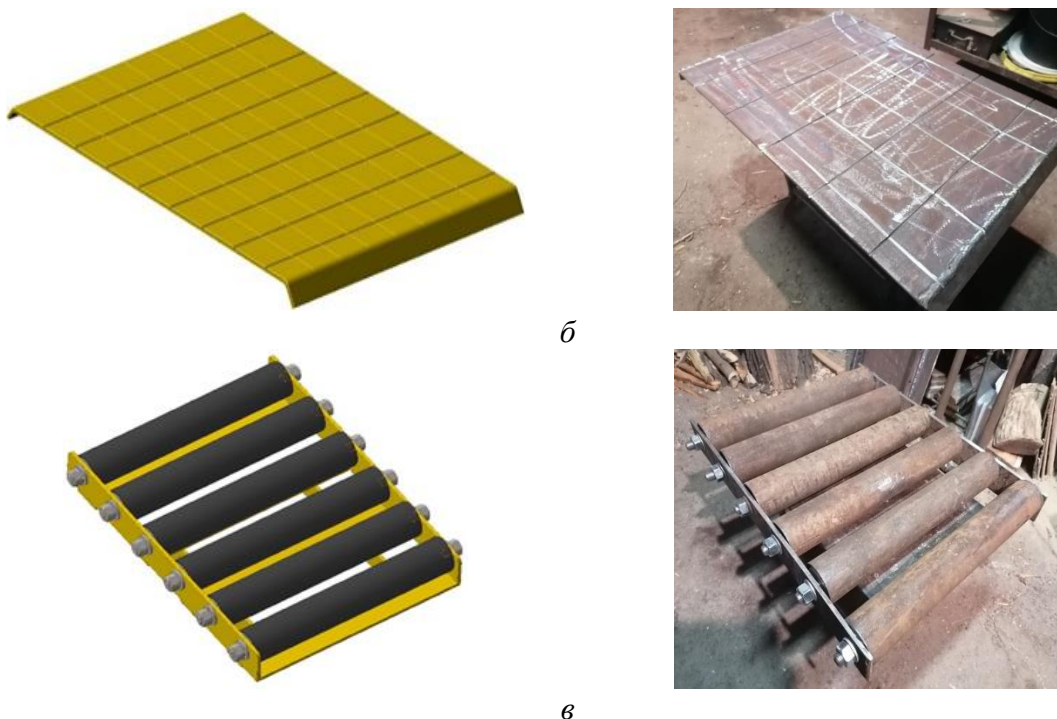


Рис. 3. Види робочого органу вібраційної плити:

*а – гладка поверхня; б – рифлена поверхня з проточками; в – плита з вальцями*

Рух плити здійснюється за рахунок дії вібратора та мускульної сили оператора який штовхає плиту за допомогою ручки 6, яка закріплюється на осі 7. Вісь ручки встановлюється в гумовий стабілізатор 8, який, у свою чергу, є вібраційним ізолятором. Відповідно до цього гумовий стабілізатор закріплюється через планку 9, у якій нарізана різьба для закріплення за допомогою болтів 11 хомута 10.

Оператор захищений від шкідливого впливу вібрації за допомогою гумових чотирьох вібраційних опор 12, які встановлюються між корпусом та рукою для найкращого захисту. Ці вібраційні опори виконують ключову роль у зниженні передачі вібрації від робочого елемента до рук оператора, що сприяє забезпеченню комфортних робочих умов та запобіганню можливих негативних впливів на здоров'я. Ця конструкція є важливим аспектом ергономіки та безпеки при роботі з вібраційним обладнанням, надаючи оператору зручні умови для продуктивної та безпечної роботи.

Керування пристроєм здійснюється за допомогою кнопки «старт-стоп» 13, яка кріпиться до ручки для забезпечення максимальної зручності для оператора. Ця кнопка використовується для запуску та зупинки робочого процесу, надаючи оператору легкий і швидкий спосіб управління пристроєм.

Розташування кнопки на ручці має практичну мету – забезпечити миттєвий доступ до керування пристроєм, не вимагаючи від оператора додаткових зусиль або переривання робочого процесу. Це сприяє підвищенню продуктивності та ефективності використання обладнання. Завдяки такому розташуванню, оператор може швидко реагувати на зміни у робочому процесі та легко керувати пристроєм у зручному положенні, що сприяє комфортній та ефективній роботі з обладнанням.

Визначення відповідного типу вібраційної плити є ключовим етапом при виборі обладнання для будівельних робіт. При цьому важливо врахувати характер робіт, які будуть виконуватися, об'єм і потужність двигуна, а також розміри плити для відповідності вимогам проекту. Врахування цих параметрів дозволяє забезпечити ефективність та оптимальні умови для виконання завдань.



У табл. 1 наведено технічну характеристику вібраційної плити. Складання технічних характеристик важливо для належного документування та розуміння функціональних можливостей вібраційної плити це дозволяє здійснювати порівняння з іншими обладнаннями, а також забезпечує визначення її відповідності вимогам та потребам у конкретних умовах використання.

Таблиця 1 – Технічна характеристика вібраційної плити

| №   | Назва параметра           | Позначення         | Одиниця вимірювання | Величина |
|-----|---------------------------|--------------------|---------------------|----------|
| 1.  | Вага                      | m                  | кг                  | 74       |
| 2.  | Ширина робочого органу    | B                  | мм                  | 380      |
| 3.  | Довжина робочого органу   | L                  | мм                  | 530      |
| 4.  | Вимушуюча сила            | F                  | кН                  | 10       |
| 5.  | Джерело енергії           | електрична напруга |                     |          |
| 6.  | Матеріал робочої поверхні | сталь              |                     |          |
| 7.  | Напруга                   | U                  | В                   | 220      |
| 8.  | Потужність двигуна        | P                  | Вт                  | 750      |
| 9.  | Частота вібродвигуна      | n                  | об/хв               | 2840     |
| 10. | Рівень шуму               | A                  | дБ                  | 70       |

Визначення ефективності робочих органів виконується за допомогою динамічного щільноміру для ґрунту Д-51А зображеного на рис. 4. Під час контролю ущільнення ґрунту необхідно підготувати площадку. На підготовлену поверхню вертикально встановлюється пристрій, за допомогою якого здійснюється контроль. Стрижень пристрою опускають на глибину 20 см, але кількість ударів не враховується. Потім опускають стрижень до краю, тобто на глибину 30 см, при цьому підраховується кількість ударів. Процедура вимірювання слід виконувати безперервно з певною частотою ударів (приблизно 2 удари в 1 секунду). Під час дослідження необхідно постійно стежити за вертикальною лінією занурення стрижня і при необхідності коригувати її. За результатами перевірки визначається щільність ґрунту за допомогою спеціальних графіків для конкретного виду ґрунту за ДСТУ Б В.2.1-2-96.



Рис. 4. Динамічний щільномір для ґрунту Д-51А

Враховуючи особливості конструкції робочих органів та різноманіття поверхонь, які необхідно підготувати для наступних технологічних процесів, ми рекомендуємо такі типи плит для ущільнення матеріалів:

1. Для ущільнення матеріалів як пісок ми пропонуємо гладку поверхню робочого органу, тому що матеріал легко ущільнюється, а робочий орган найдешевше виготовляти і він є простим за конструкцією. Також гладка робоча поверхня забезпечує рівномірний розподіл вібрацій по всій площі плити. Це сприяє рівномірному ущільненню матеріалу.

2. У випадку коли ми ущільнюємо матеріал типу гранвідсів ми пропонуємо як робочий орган використовувати рифлену поверхню з проточками. Це обґрунтовано тим, що під час ущільнення такого матеріалу між його частинками може залишатися повітря. Рифлена поверхня з проточками сприяє видаленню повітря за допомогою прорізаних канавок. Це також сприяє рівномірному ущільненню.

3. Для матеріалів неправильної форми та середніх розмірів гранул рекомендуємо використовувати плити з вальцями. Вальці дозволяють прокручувати матеріал і знаходити оптимальне положення гранул. Вони забезпечують рівномірний розподіл навантаження по всій площі плити. Це допомагає запобігти утворенню пустот і нерівномірності ущільнення.

Наші рекомендації спрямовані на оптимізацію вибору робочих органів вібраційної плити в залежності від конкретних властивостей та типу ущільнюваного матеріалу. Вони дозволяють максимізувати продуктивність ущільнення матеріалів, забезпечуючи високу якість будівельних робіт.

**Висновки.** Проаналізовано існуючі конструкції і види ручної вібраційної техніки. Були визначені переваги та недоліки кожного методу ущільнення матеріалів для будівництва. Зокрема, аналіз показав, що метод вібрації відзначається здатністю ущільнювати більшу площу протягом однакового проміжку часу, порівняно з іншими методами.

Однією з основних перспектив дослідження є подальше розширення розуміння взаємодії робочого органу вібраційної плити з різними типами ущільнюваного матеріалу. Виконаний аналіз та виготовлення під кожен тип ущільнюваного матеріалу різних типів робочих органів для різних поверхонь може сприяти покращенню процесу ущільнення та забезпечити оптимальні умови для різних видів будівельних матеріалів, враховуючи їхні унікальні властивості.

Для виконання операцій з ущільнення ґрунту була розроблена вібраційна машина зі змінним робочим органом, що дозволяє вибрати оптимальні режими роботи для різних видів матеріалу та підвищити якість ущільнення. Дослідження спрямовані на покращення вибору конструкції вібраційної плити залежно від конкретних властивостей та типу матеріалу.

Загалом, ця робота може зробити суттєвий внесок у розробку ефективних методів ущільнення матеріалів у будівельній галузі, що сприятиме підвищенню якості будівництва.

### Список використаних джерел

1. Назаренко, І. І. Вібраційні машини і процеси будівельної індустрії : навч. посіб. / І. І. Назаренко. – Київ : КНУБА, 2007. – 230 с.
2. Будівельна техніка : підручник / О. Г. Онищенко, В. О. Онищенко, Б. О. Коробко, В. В. Вірченко / за ред. В. О. Онищенка. – Київ : Кондор-Видавництво, 2017. – 416 с.
3. Ярошевич, М. П. Динаміка розбігу вібраційних машин з дебалансним приводом / М. П. Ярошевич, Т. С. Ярошевич. – Луцьк : ЛНТУ, 2010. – 220 с.
4. Ланець, О. С. Високоєфективні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення) / О. С. Ланець. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2008. – 324 с.
5. Сукач, М. К. Будівельна техніка : навч. посіб. / М. К. Сукач, І. В. Ніколенко, О. Ю. Вольтерс. – Київ, Сімферополь : КНУБА – НАПКС, 2010. – 296 с.
6. Maslov, A. G. Study of the interaction of the vibrating plate of the working body with the sealing concrete mixture / A. G. Maslov, Y. S. Salenko, I. I. Zhovtyak // Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. – 2014. – Vol. 100. – P. 51-57.
7. Свідерський, А. Т. Визначення конструктивних параметрів три масної трамбовки / А. Т. Свідерський, О. П. Дед // Галузеве машинобудування, будівництво : зб. наук. праць. – 2009. – Вип. 23, Т. 2. – С. 119-127.

8. Maslov, A. G. Study of the interaction between a vibrating plate with cement concrete mixture / A. G. Maslov, Y. S. Salenko, N. A. Maslova // Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. – 2011. – Is. 67. – P. 93-98.

9. Batsaikhan, Zh. Study of the interaction of the vibration plate working body with sealed medium / Zh. Batsaikhan // Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. – 2015. – Vol. 90. – P. 92-97.

10. Maslov, A. G. The Research of oscillations of the machine working body of the for compaction of concrete mixes in vibration working mode / A. G. Maslov, Zh. Batsaikhan, // Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. – 2015. – Vol. 91. – P. 92-97.

11. Itkin, A. F. Vibratsionnyie mashinyi dlya formovaniya betonnyih izdeliy “Les MP” / A. F. Itkin. – Kyiv, 2009.

12. Васильєв, О. С. Вивчення обладнання для проведення робіт з ущільнення ґрунту для об’єктів малого будівництва / О. С. Васильєв, А. М. Яковенко, Ю. Ю. Пустовіт // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2022. – № 1 (11). – С. 12-16. DOI:10.20998/2413-4295.2022.01.02.

13. Gutierrez J. High-frequency vibrations on the compaction of dry fibrous reinforcements / J. Gutierrez, E. Ruiz, F. Trochu // Journal of Advanced Composite Materials. – 2013. – Vol. 22(1). – P. 13-27.

14. Yaroshevich, M. P. Dynamics of vibrating machines starting with unbalanced drive in case of bearing body flat vibrations / M. P. Yaroshevich, I. P. Zabrodets, T. S. Yaroshevich // Науковий вісник НГУ. – 2015. – № 3. – С. 39-45.

### References

1. Nazarenko, I.I. (2007). *Vibratsiini mashyny i protsesy budivelnoi industrii [Vibration machines and processes of the construction industry]*. KNUBA Publ.

2. Onyshchenka, V.O. (2017). *Budivelna tekhnika [Construction equipment]*. Kondor-Vydavnytstvo Publ.

3. Yaroshevych, M.P. (2010). *Dynamika rozbihu vibratsiinykh mashyn z debalansnym pryvodom [Dynamics of start-up of vibrating machines with an unbalanced drive]*. LNTU Publ.

4. Lanets, O.S. (2008). *Vysokoefektyvni vibratsiini mashyny z elektromahnitnym pryvodom (Teoretychni osnovy ta praktyka stvorennia) [Highly efficient vibrating machines with an electromagnetic drive (Theoretical foundations and practice of creation)]*. NU «Lvivska politekhnika» Publ.

5. Sukach, M.K. (2010). *Budivelna tekhnika [Construction machinery]*. KNUBA – NAPKS.

6. Maslov, A.G., Salenko, Y.S., Zhovtyak, I.I. (2014). Study of the interaction of the vibrating plate of the working body with the sealing concrete mixture. *Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 100, 51–57.

7. Sviderskyi, A.T., Diedov, O.P. (2009). Vyznachennia konstruktyvnykh parametriv try masnoi trambovky [Determination of structural parameters of three mass rammers]. *Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo – Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(23), 119-127.

8. Maslov, A.G., Salenko, Y.S., Maslova, N.A. (2011). Study of the interaction between a vibrating plate with cement concrete mixture. *Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenichug*, 67, 93–98.

9. Batsaikhan, Zh. (2015). Study of the interaction of the vibration plate working body with sealed medium. *Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 90, 92–97.

10. Maslov, A.G., Batsaikhan, Zh. (2015). The Research of oscillations of the machine working body of the for compaction of concrete mixes in vibration working mode. *Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 91, 92–97.

11. Itkin, A.F. (2009). *Vibrating machines for molding concrete products*. Les MP.

12. Vasyliiev, A.S., Yakovenko, A.M., Pustovit, Y.Y. (2021). yvchennia obladdannia dlia provedennia robit z ushchilnennia gruntu dlia obiektiv maloho budivnytstva [Study of equipment for conducting soil compactions for small construction objects]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*, 1(11), 12-16. doi:10.20998/2413-4295.2022.01.02.

13. Gutierrez, J., Ruiz, E., Trochu, F. (2013). High-frequency vibrations on the compaction of dry fibrous reinforcements. *Journal of Advanced Composite Materials*, 22(1), 13–27.

14. Yaroshevich, M.P. (2015). Dynamics of vibrating machines starting with unbalanced drive in case of bearing body flat vibrations. *Journal "Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu"*, 3, 39–45.

Отримано 21.12.2023

UDC 624.1

**Alexey Vasyliiev<sup>1</sup>, Andrii Yakovenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Branch Machinery and Mechatronics  
National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» (Poltava, Ukraine)

**E-mail:** [a.s.vasiliev.76@gmail.com](mailto:a.s.vasiliev.76@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9914-5482>

<sup>2</sup>PhD Student, Department of Branch Machinery and Mechatronics

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» (Poltava, Ukraine)

**E-mail:** [andrii.yakovenko95@gmail.com](mailto:andrii.yakovenko95@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0818-6332>

**VIBRATING MACHINE FOR SURFACE PREPARATION AND SEALING**

*Vibration plates belong to the means of small mechanization and are mainly used for layer-by-layer compaction of various materials, such as sand, gravel, bitumen mixtures, etc. Vibro-tamping methods are used in the technology of road surfaces construction and other structures. Self-propelled vibrating slabs are also used in other construction processes, such as laying, backfilling trenches, land work and laying paving slabs. They provide effective compaction of materials using vibro-tamping methods. The article is aimed at determining the optimal equipment for compacting materials during the construction of small objects. The goal of the authors is to consider the choice of vibration plates and their working bodies that best meet the requirements and needs for compacting various materials on small construction sites. A detailed study of this aspect will achieve optimal results in the process of compaction and develop recommendations for choosing the best working bodies for specific conditions of construction work.*

*Due to different operating conditions and surface characteristics, we need emphasize on the improvement of the compaction method for best results. In general, this analysis can make a significant contribution to the development of effective material compaction strategies in the construction industry, contributing to improved construction quality. The key area of research is to expand the knowledge of the interaction of the working body of the vibration plate with various types of compressible material. Analysis of different types of working bodies for different surfaces can improve the compaction process and provide optimal conditions for different types of building materials, taking into account their unique properties.*

*To perform soil compaction, we developed a vibration machine with a replaceable working body. This design allows to choose the optimal working body for each type of working material and thereby improve the quality of the compaction. In general, this analysis can make a significant contribution to the development of effective material compaction strategies in the construction industry, contributing to improved construction quality.*

**Key words:** vibration; vibrating plate; vibration exciter; vibration machine; unbalance; analysis of parameters; forced oscillations.

*Fig.: 4. Table: 1. References: 14.*

**Антон Клименко<sup>1</sup>, Зоя Сазанішвілі<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (Дніпро, Україна)

E-mail: [03udhtu021990@ukr.net](mailto:03udhtu021990@ukr.net). SCOPUS Author ID: 57190270871

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (Дніпро, Україна)

E-mail: [szanishvili.z.v@nmu.one](mailto:szanishvili.z.v@nmu.one). ORCID: 0000-0003-4138-9238

ResearcherID: [JUV-1144-2023](https://orcid.org/0000-0003-4138-9238). SCOPUS Author ID: 57222006833

**РОЗРОБКА ТЕРМОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ ТРИБОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ МЕТА-АРАМІДУ**

*Дослідження триботехнічних характеристик композиційних покриттів на основі мета-араміду актуальне у зв'язку з його важливістю для промисловості, технологій та екологічних стандартів. В експериментах з сухим тертям при високому тиску та швидкості ковзання визначено, що концентрація антифрикційного наповнювача суттєво впливає на тертя та зношення покриттів. Покриття з фталоціаніном міді (20–25 мас.%) демонструють найкращі триботехнічні показники, зменшуючи знос та коефіцієнт тертя у 2 та 2,1 рази відповідно. Аналіз результатів рекомендує оптимальну концентрацію наповнювача для мета-арамідних покриттів на рівні 20 мас.% з огляду на триботехнічні властивості.*

**Ключові слова:** триботехнічні характеристики; покриття; композиційні покриття; мета-арамід; зносостійкість; зношування.

Рис.: 4. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** Одним з основних недоліків, які зустрічаються під час роботи важконавантажених машин і механізмів є ненадійна та недовговічна робота їх пар тертя. Для вирішення цієї проблеми потрібно використовувати нові, сучасні матеріали триботехнічного призначення, зокрема полімерні [1].

Застосування полімерів для створення таких матеріалів дозволяє отримати необхідний комплекс властивостей вузлів тертя, зменшити їхню масу, а також знизити їхню собівартість.

**Постановка проблеми.** Прогресивним методом для вирішення подібних завдань є використання полімерних покриттів. Їх нанесення на металеві деталі дозволяє успішно вирішити завдання створення поверхонь тертя з певним комплексом експлуатаційних параметрів і відкриває широкі можливості управління фізико-механічними властивостями контактуючих поверхонь [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Перспективним матеріалом для отримання покриттів триботехнічного призначення є ароматичні поліаміди [3-7], зокрема мета-арамід (Nomex).

Проте слід відмітити, що мета-арамід, як і інші ароматичні поліаміди, мають низьку адгезію до металів, що ускладнює отримання якісних покриттів [8-9]. Невідомий також вплив більшості твердих шаруватих наповнювачів на умови формування та експлуатаційні показники таких покриттів.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Авторами роботи [10] розроблена методика отримання антифрикційних покриттів на основі ароматичного поліаміду фенілон, що є кополімером мета-араміду. Але слід відмітити, що даний кополімер не синтезується в Україні та країнах Європи, а його виробництво так і не дійшло до промислових масштабів.

Виходячи з цього, **метою даної роботи** є розробка термостійких покриттів триботехнічного призначення на основі саме мета-араміду, який широко використовується в країнах ЄС та США. Кінцевим результатом у даній роботі є визначення оптимальної концентрації антифрикційного наповнювача для максимізації зносостійкості та мінімізації коефіцієнта тертя у композиційних покриттях на основі мета-араміду. Отримані результати передбачається використовувати для розробки покращених матеріалів для вузлів тертя з різними умовами експлуатації.

**Виклад основного матеріалу.** Мета-арамідні покриття та композиційні покриття на його основі отримували шляхом приготування відповідного розчину з наступним його нанесенням на металеву поверхню та сушінням. В якості розчинника використовували диметилацетамід (ДМАА), оскільки плівки з ароматичних поліамідів на його основі мають найкращі фізико-механічні властивості [5,7].

В якості наповнювачів використовували шаруваті тверді мастила, які широко використовуються для створення самозмащувальних матеріалів на основі полімерів: нітрид бору, графіт, фталоціанін міді та дисульфід молібдену. Обрані антифрикційні наповнювачі використовували у дрібнодисперсному вигляді з розміром частинок 1–2 мкм. Вмістом наповнювача варіювали від 5 мас.% до 25 мас.%.

Перед нанесенням розчин перемішували в лопатевій лабораторній мішалці з частотою обертання 60 об/хв протягом двох хвилин. Розроблена методика приготування покриттів дозволяє отримати необхідний розподіл наповнювача в об'ємі полімерної матриці (рис. 1).

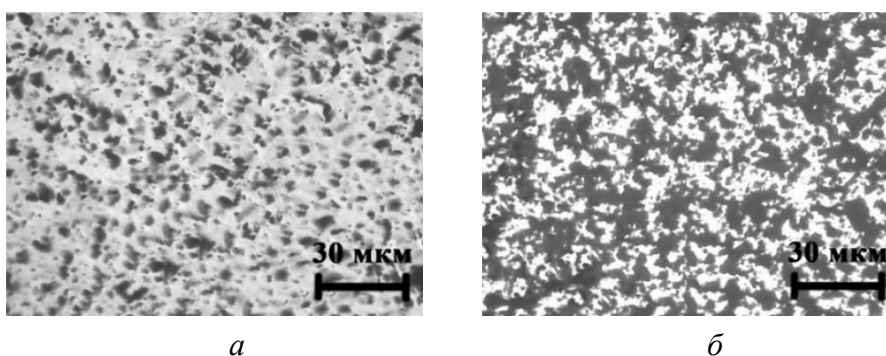


Рис. 1. Мікроструктура композиційних покриттів на основі мета-араміду з різним вмістом графітового наповнювача:  
а – 5 мас.%; б – 20 мас.%

Джерело: розроблено авторами.

Мікроструктуру зразків полімерних покриттів вивчали за допомогою оптичного фотомікроскопа відбитого світла ПОЛАМ Р-312 при збільшеннях 450–500.

Триботехнічні властивості покриттів досліджували на машині тертя 2070 СМТ-1 за схемою диск-колодка (рис. 2), по контртілу зі сталі 45, яке термооброблене до твердості 45–50 HRC, і має діаметр 50 мм. Досліди проводилися при терті у сухому режимі та терті зі змащуванням. Зношення матеріалів визначали на аналітичних вагах ВЛР-200.

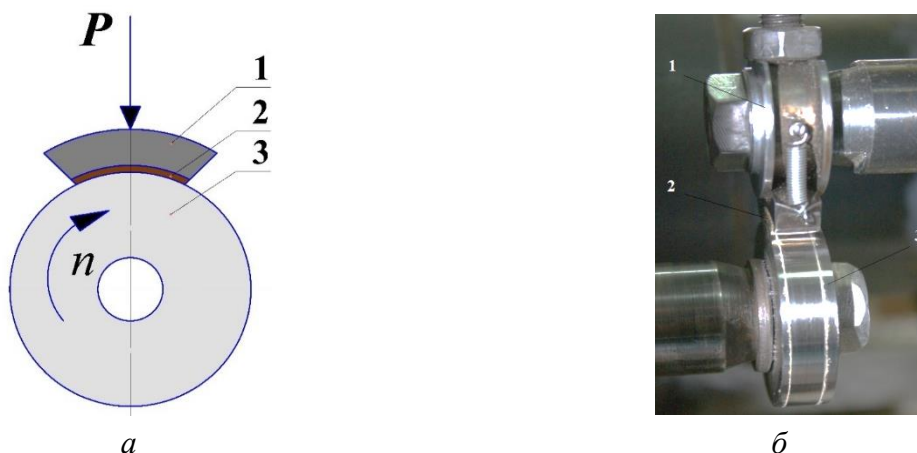


Рис. 2. Схема вузла тертя (а) та випробування зразка на тертя та зношення (б):  
Р – навантаження; n – частота обертання контртіла; 1 – металева підложка;  
2 – полімерне покриття; 3 – контртіло

Джерело: розроблено авторами.

Дослідження триботехнічних властивостей композиційних покриттів на основі мета-араміду проводили у сухому режимі тертя при навантаженні  $P = 1$  МПа і швидкості ковзання  $v = 1$  м/с.

Результати досліджень на зносостійкість та коефіцієнт тертя наведені на рис. 3.

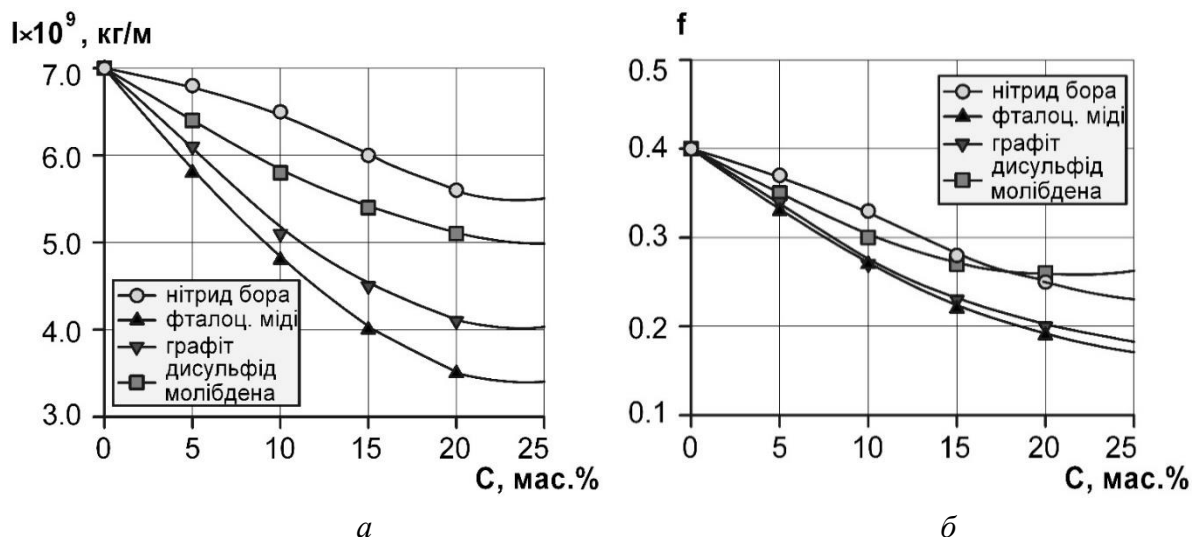


Рис. 3. Залежність інтенсивності масового зношування (а) та коефіцієнта тертя (б) від вмісту наповнювача (С) у складі покриття

Джерело: розроблено авторами.

Встановлено, що кількість антифрикційного наповнювача суттєво впливає на тертя та зношення мета-арамідних покриттів. Зносостійкість розроблених композицій по мірі збільшення вмісту наповнювача різко зростає, однак введення його більше ніж 20 мас.% призводить до стабілізації і поступового зменшення цього показника (рис. 3, а). Криві інтенсивності зношування досягають своїх мінімальних значень при вмісті наповнювача 20–25 мас.%.

Слід відмітити, що обрані наповнювачі мають подібну шарувату структуру та однаковий механізм змащування, чим пояснюється подібний характер кривих зношування та коефіцієнту тертя (рис. 3, б). У процесі тертя на поверхні контртіла антифрикційний наповнювач утворює змащувальну плівку, параметри якої (щільність, рівномірність та швидкість утворення) знаходиться в прямій залежності від кількості наповнювача у композиційному покритті. Саме цим і пояснюється різке збільшення зносостійкості композиційного покриття, що має у своєму складі наповнювач у кількості до 20 мас.%. Подальше збільшення вмісту антифрикційного наповнювача призводить до суттєвого погіршення міцнісних властивостей та збільшення крихкості композиційного покриття, що призводить до деякого зниження зносостійкості при вмісті наповнювача більше ніж 25 мас.%.

Серед розроблених композиційних покриттів найкращі триботехнічні показники мають покриття з фталоціаніном міді у своєму складі, у кількості 20–25 мас.%. Інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя цих покриттів, у порівнянні з вихідним мета-арамідним покриттям, зменшились у 2 та у 2,1 раза відповідно.

Враховуючи те, що перспективною областю застосування мета-арамідних покриттів є вузли тертя, що працюють у рідких середовищах, проведено додаткове дослідження триботехнічних властивостей розроблених покриттів при терті зі змащенням.

Випробування проводили при різному питомому навантаженні. Як мастило використовували індустріальне мастило І-40.

Результати досліджень на зносостійкість та коефіцієнт тертя наведені на рис. 4.

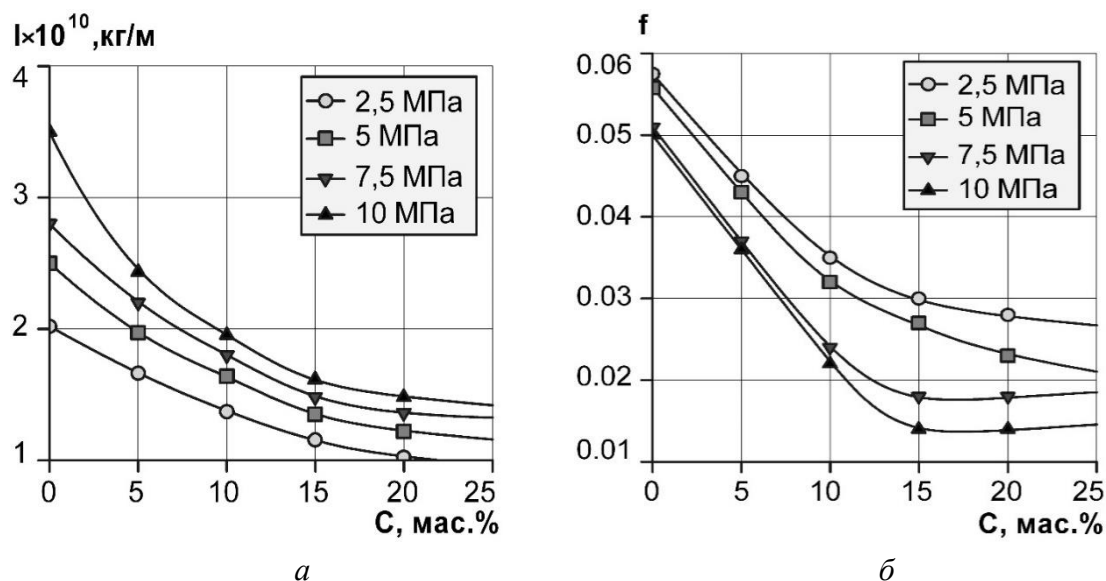


Рис. 4. Залежність інтенсивності масового зношування (а) коефіцієнту тертя (б) від вмісту наповнювача (С) при різному питомому навантаженні

Джерело: розроблено авторами.

З наведених залежностей видно, що зі збільшенням питомого навантаження інтенсивність зношування композиційних покриттів зростає (рис. 4, а). Концентраційні залежності інтенсивності зношування мають схожий характер з відповідними залежностями при терті у сухому режимі. Слід також відмітити, що чим менша кількість антифрикційного наповнювача у складі мета-арамідного покриття, тим різкіше зростають значення інтенсивності зношування при збільшенні питомого тиску у парі тертя.

При терті зі змащенням, інтенсивність зношування розроблених покриттів, при питомому навантаженні 2,5–10 МПа, у порівнянні з вихідним мета-арамідним покриттям, зменшилась у 1,5–2,5 раза, а коефіцієнт тертя – у 2,1–3,6 раза відповідно.

Встановлено, що зі зростанням питомого навантаження коефіцієнт тертя розроблених покриттів зменшується. Аналіз концентраційних залежностей коефіцієнта тертя (рис. 4, б) показав, що при високому питомому навантаженні (7,5–10 МПа) значення коефіцієнту тертя композиційних покриттів стабілізується при кількості наповнювача 15–20 мас.%. При меншому питомому навантаженні коефіцієнт тертя має більші значення і продовжує змінюватись із збільшенням вмісту наповнювача.

Такі результати можна пояснити тим, що на якість і швидкість формування змащувальної плівки, яку на поверхні контртіла утворює антифрикційна добавка, крім концентрації наповнювача суттєво впливає і тиск у парі тертя.

Узагальнюючи дані, робимо висновок, що оптимальна кількість антифрикційного наповнювача у складі мета-арамідного покриття, з огляду на триботехнічні властивості, становить 20 мас.%.

**Висновки.** Досліджено вплив таких антифрикційних наповнювачів як фталоціанін міді, дисульфід молібдена, графіт та нітрид бора на закономірності формування та експлуатаційні показники мета-арамідних покриттів.

Виявлено залежність триботехнічних властивостей мета-арамідних покриттів від концентрації антифрикційного наповнювача. Встановлено, що зі зростанням питомого навантаження коефіцієнт тертя розроблених покриттів зменшується.



Встановлено, що оптимальна кількість антифрикційного наповнювача у складі метарагідного покриття, з огляду на триботехнічні властивості, становить 20 мас. %.

Виявлено, що найкращі експлуатаційні показники, серед розроблених композиційних покриттів, мають покриття з фталоціаніном міді у своєму складі.

### Список використаних джерел

1. Полімерні композити: одержання, властивості, застосування / за ред. О. І. Бурі. – Дніпропетровськ : Вид-во «Федорченко А.А.», 2010. – 383 с.
2. Fink, J. K. High performance polymers / J. K. Fink. – New York : William Andrew Inc, 2008
3. Gallini, J. Polyamides, aromatic / J. Gallini // Encyclopedia of polymer science and technology. – Vol. 3. – New York : John Wiley & Sons, 2005. – P. 558-584.
4. Yang, H. H. Aromatic high-strength fibers / H. H. Yang. – New York : Wiley, 1989. – 248 p.
5. High-performance aromatic polyamides / J. M. García, F. C. García, F. Serna, J. L. Peña // Progress in Polymer Science. – 2010. – Vol. 35. – P. 623-686.
6. Joven, R. V. Manufacturing Kevlar panels by thermo-curing process / V. R. Joven. – Bogotá : Los Andes University, 2007. – 233 p.
7. High-performance aromatic polyamides / J. M. García, F. C. García, F. Serna, de la J. L. Peña // Progress in Polymer Science. – 2010. – Vol. 35. – P. 623-686.
8. Pocius, A.V. Adhesion and Adhesives Technology / A.V. Pocius. – Munich : Carl Hanser Verlag, 2012. – 370 p.
9. Adhesion of polymers / F. Awaja, M. Gilbert, G. Kelly, B. Fox, P. Pigram // Progress in Polymer Science. – 2009. – Vol. 34. – P. 948-968.
10. Klymenko, A. Adhesion of poly (m-p-phenylene isophthalamide) coatings to metal substrates / A. Klymenko, V. Sytar, I. Kolesnyk // Progress in Organic Coatings. – 2014. – Vol. 77. – P. 1597-1602.

### References

1. Buri, O.I. (Ed.). (2010). *Polimerni kompozyty: oderzhannia, vlastyvoli, zastosuvannia [Polymer composites: preparation, properties, application]*. Fedorchenko A.A.
2. Fink, J. K. (2008). *High performance polymers*. William Andrew Inc.
3. Gallini J. (2005). Polyamides, aromatic. *Encyclopedia of polymer science and technology*. (Vol. 3). John Wiley & Sons.
4. Yang, H. H. (1989). *Aromatic high-strength fibers*. Wiley.
5. García, J., García, F., Serna, F., & Pena, J. (2010). High-performance aromatic polyamides. *Progress in Polymer Science*, 35, 623–686.
6. Joven, R.V. (2007). *Manufacturing Kevlar panels by thermo-curing process*. Los Andes University.
7. García, J., García, F., Serna, F., & Pena, J. (2010). High-performance aromatic polyamides. *Progress in Polymer Science*, 35, 623–686.
8. Pocius, A.V. (2012). *Adhesion and Adhesives Technology*. Carl Hanser Verlag.
9. Awaja, F., Gilbert, M., Kelly G., Fox B., Pigram P. (2009). Adhesion of polymers. *Progress in Polymer Science*, 34, 948–968.
10. Klymenko, A., Sytar, V., Kolesnyk I. (2014) Adhesion of poly (m-p-phenylene isophthalamide) coatings to metal substrates. *Progress in Organic Coatings*, 77, 1597–1602.

Отримано 02.12.2023

**Anton Klymenko<sup>1</sup>, Zoia Sazanishvili<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Engineering and Generative Design Department  
Dnipro University of Technology (Dnipro, Ukraine)

E-mail: [03udhtu021990@ukr.net](mailto:03udhtu021990@ukr.net). SCOPUS Author ID: 57190270871

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Engineering and Generative Design Department  
Dnipro University of Technology (Dnipro, Ukraine)

E-mail: [sazanishvili.z.v@nmu.one](mailto:sazanishvili.z.v@nmu.one). ORCID: 0000-0003-4138-9238

ResearcherID: JUV-1144-2023. SCOPUS Author ID: 57222006833

**DEVELOPMENT OF HEAT-RESISTANT TRIBOLOGICAL COATINGS  
BASED ON META-ARAMID**

*Research on the tribotechnical properties of composite coatings is relevant due to its potential impact on industry, technology, and environmental standards. In the conducted study, tribotechnical properties of composite coatings based on meta-aramid were investigated under dry friction conditions with a load of 1 MPa and a sliding speed of 1 m/s. The results showed that the amount of anti-friction filler significantly influences the friction and wear of coatings. Wear resistance increases up to 20 wt.%, after which the introduction of more filler stabilizes and leads to a decrease in this parameter. The most optimal amount of filler to achieve minimal wear is 20–25 wt.%.*

*It was found that the anti-friction filler forms a lubricating film on the counterface surface, and its parameters depend on the filler concentration. At a high content (up to 20 wt.%), a sharp increase in wear resistance is observed. However, with an increase in the filler concentration above 25 wt.%, a deterioration in strength properties and an increase in the coating's brittleness are observed.*

*Coatings with copper phthalocyanine demonstrated the most effective tribotechnical indicators when the filler concentration was 20–25 wt.%. The wear intensity and friction coefficient of these coatings decreased by 2 and 2.1 times, respectively, compared to the original meta-aramid coating.*

*Additional research on the tribotechnical properties of coatings in liquid environments with I-40 lubricant showed that with an increase in the specific load, the wear intensity increases, but this decreases with the addition of the anti-friction filler. At a specific load of 2.5–10 MPa, the wear resistance of the coatings decreased by 1.5–2.5 times, and the friction coefficient decreased by 2.1–3.6 times compared to the meta-aramid coating.*

*The analysis of the results allows determining the optimal amount of filler for meta-aramid coatings as 20 wt.%, considering tribotechnical properties.*

**Keywords:** Tribotechnical characteristics; Coatings; Composite coatings; Meta-aramid; Wear resistance; Wear.

Fig.: 4. Ref.: 10.

**Олександр Мановицький<sup>1</sup>, Сергій Клименко<sup>2</sup>, Юрій Рижов<sup>3</sup>, Сергій Сапон<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)  
**E-mail:** [m5m5@i.ua](mailto:m5m5@i.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3882-7866>  
**Researcher ID:** [FFQ-3675-2022](https://orcid.org/FFQ-3675-2022). **Scopus Author ID:** [57197629303](https://orcid.org/57197629303)

<sup>2</sup>доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, заступник директора з наукової роботи Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)  
**E-mail:** [atmu@meta.ua](mailto:atmu@meta.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>  
**Researcher ID:** [Q-8928-2019](https://orcid.org/Q-8928-2019). **Scopus Author ID:** [57221904325](https://orcid.org/57221904325)

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)  
**E-mail:** [super.t-55@ukr.net](mailto:super.t-55@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9047-1903>. **Scopus Author ID:** [6701431900](https://orcid.org/6701431900)

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій машинобудування та деревообробки  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
**E-mail:** [s.sapon@gmail.com](mailto:s.sapon@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>  
**Researcher ID:** [G-7764-2014](https://orcid.org/G-7764-2014). **Scopus Author ID:** [56736964700](https://orcid.org/56736964700)

## ВИЗНАЧЕННЯ МИТТЄВИХ ЗНАЧЕНЬ КУТІВ У ПЛАНІ ІНСТРУМЕНТУ Й ВЕЛИЧИН КОНТУРНОЇ ПОДАЧІ ПІД ЧАС ТОЧІННЯ ДЕТАЛІ СКЛАДНОГО ПРОФІЛЮ

*Розглянуто особливості складнопрофільної токарної обробки інструментом, оснащеним круглою змінною різальною пластинкою для випадків обробки опуклих та увігнутих тороїдних поверхонь. Показано, що параметри режимів різання і практично усі геометричні параметри інструменту є миттєво змінними залежно від особливостей профілю оброблюваної поверхні деталі. Залежно від кута нахилу твірної профілю поверхні деталі до її осі обертання змінюються швидкість різання, товщина зрізаного шару матеріалу, головний і допоміжний кути в плані різця та інші характеристики процесу різання. Відповідно змінюються площі контактуючих поверхонь інструмента з припуском, що зрізається та оброблюваною поверхнею деталі. Наведено залежності для визначення товщини, площі перетину зрізаного шару матеріалу, дійсної подачі, довжини різальних кромки, головного кута в плані інструменту.*

**Ключові слова:** складно профільна деталь; різальний інструмент; обробка; режими різання; геометричні параметри інструменту.

*Рис.: 4. Бібл.: 10.*

**Актуальність теми дослідження.** Розвиток машинобудівної галузі супроводжується створенням складних конструкцій механізмів і машин, що відповідно призводить до ускладнення профілю поверхонь деталей та змушує металообробників використовувати нові та удосконалювати існуючі технологічні процеси механічної обробки. Доволі часто виготовлення таких деталей потребує використання інструментів, які працюють в умовах нестационарного навантаження, наприклад, зі змінними подачею, швидкістю, глибиною різання. Забезпечення ефективності такої обробки можливо на основі поширення уявлень щодо навантаження на різальний інструмент у зоні різання, що дозволяє створити та використовувати у виробництві різальні інструменти з оптимальними для обробки деталей складного профілю геометричними параметрами.

**Постановка проблеми.** Термобаричне навантаження в процесі обробки та напружений стан у зоні різання пов'язані з такими показниками інструменту, як система кутів, радіус заокруглення різальної кромки, розмір ділянок контакту інструменту зі стружкою та оброблюваною деталлю з урахуванням зносу інструменту тощо. Визначення цих показників при обробці деталей складного профілю дозволяє встановити миттєві значення величин подачі та глибин різання, які формують алгоритм керування ними на верстатах із ЧПК, забезпечують ефективну роботу інструменту та якість оброблених поверхонь виробів, яка потрібна за умов їх експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасної літератури з питань механічної обробки показує, що основна кількість робіт присвячена вивченню впливу змінних умов різання на сили різання, якість обробленої поверхні або знос та стійкість різальних інструментів. Отримані результати також використовуються при оптимізації умов процесів обробки.

Авторами [1] виконано дослідження з метою оптимізації умов обробки для досягнення потрібних економічних показників виробництва і показана роль у цьому процесі величини глибини різання. Була розроблена емпірична модель впливу умов обробки на сили різання та показано, що питома сила різання зменшується зі збільшенням подачі та глибини різання.

Автори роботи [2] вивчали динамічну модель коливань у зоні різання та реакцію системи на профіль інструменту. Як основні характеристики процесу розглядалися глибина різання та її зміна. Було показано, що зміна глибини різання впливає на рівномірність розподілу висоти мікронерівностей на обробленій поверхні.

У статті [3] розглянуто вплив нерівностей на поверхні заготовки на якість обробленої поверхні виробу й показано, що найбільш якісна поверхня виробу формується у процесі обробки заготовки в умовах мінімальних вібрацій, що пов'язано з коливанням подачі та глибини різання.

Автори [4] вивчали можливості підвищення продуктивності обробки при точінні зі змінними умовами різання під час знімання припуску за один прохід та в умовах багатопрхідної обробки та показали ефективність обробки при однопрхідній схемі.

При розробці технології точіння деталей в [5; 6] запропонований розподіл припуску на такий, що знімається на чистовому й чорновому проходах. При цьому чорновий прохід супроводжувався коливанням глибини різання, що мало безпосередній вплив на розподіл зносу інструменту на всьому циклі обробки.

Ті ж автори [7] займалися оптимізацією процесів обробки виробів складної форми з перемінною глибиною різання та розраховували ресурс різального інструменту в цих умовах.

Авторами [8] вивчений вплив умов обробки, у тому числі змінної глибини різання, на ефективність обробки тонкостінних деталей, що пов'язано із силами різання, які притаманні низці траєкторій руху інструменту.

Розроблені в [9] математичні моделі дозволяють визначити період стійкості, величину зносу інструменту в час різання при обробці деталей зі змінними умовами різання для контактів, що описуються аналітично, включаючи контури, які апроксимуються сплайнами.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Аналіз технічної літератури показав, що результати досліджень з вивчення рухів у процесі механічної обробки складно профільних виробів, які обумовлюють змінні умови обробки – подачу, глибину різання, геометричні параметри інструменту тощо на теперішній час існують у вкрай обмеженому обсязі. Проведення таких досліджень дуже актуальне у зв'язку з широким використанням верстатів із ЧПК. Ефективна робота інструмента на цих верстатах значною мірою залежить від зміни умов різання, що має місце під час переміщення робочої вершини інструменту вздовж різальної кромки при обробці деталі складного профілю.

**Метою статті** є теоретичне визначення зв'язку між особливостями конфігурації деталі, що обробляється, та миттєвими значеннями головного кута в плані, робочої довжини різальних кромки інструменту, максимальної товщини і площі перетину зрізу на прикладі інструменту, оснащеного круглою різальною пластиною.

**Виклад основного матеріалу.** Складно профільна (контурна) токарна обробка має значні відмінності від токарної обробки циліндричних, конічних або ступінчастих поверхонь. Загальна схема аксіально-радіальної токарної обробки деталі зі складним профілем наведена на рис. 1 [10].

З рис. 1 видно, що режими різання змінюються від попереднього положення різця до наступного навіть за один оберт деталі. При цьому задній кут інструменту на вигнутій поверхні є більшим, ніж на увігнутій. Варіювання заднього кута створює суттєві перепони для визначення оптимальних геометричних параметрів інструмента, що підходять для обробки заготовок зі специфічними радіальними контурами. На додачу до змінювання заднього кута залежно від радіуса контуру в площині  $YZ$  допоміжні передні та задні кути, радіус заокруглення різальної кромки теж змінюються залежно від контуру в площині  $ZX$ . Все це призводить до зміни складових сили різання залежно від положення різця на контурній лінії.

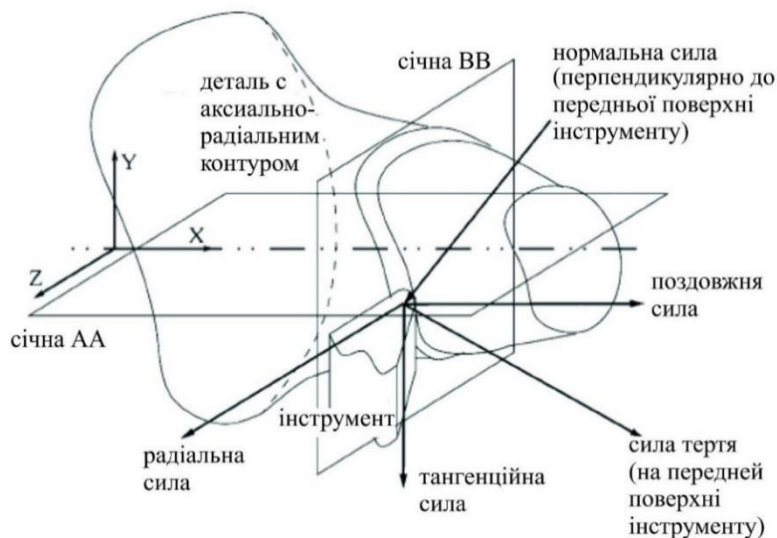


Рис. 1. Загальна схема аксіально-радіальної обробки деталі зі складним профілем [10]

Основною відмінною рисою складнопрофільної токарної обробки зовнішніх і внутрішніх поверхонь деталей інструментом з радіусом при вершині, наприклад, інструментом з круглою різальною пластиною, яким здебільшого обточуються складні профілі, є відсутність сталого положення вершини інструменту. Залежно від кута нахилу твірної профілю деталі до її осі обертання змінюються головний і допоміжний кути в плані різця, змінним є також і перетин зрізу, а відповідно – і площі контактних поверхонь інструменту з припуском, що знімається, і оброблюваною поверхнею деталі. Змінні значення площ контактуючих поверхонь різця, в поєднанні зі змінним положенням вершини різця, призводять до збільшення загальної ділянки зносу різального інструменту на передній і задній поверхнях.

Проте, в практичному виготовленні складнопрофільних деталей превалюють осесиметричні контури, які можна поділити на циліндричні, конічні, торцеві, опуклі і увігнуті поверхні. Якщо обробка циліндричних і торцевих поверхонь виглядає досить детально формалізованою, а точіння конічних можна забезпечити в більшості випадків за допомогою виконавчих органів обладнання, то закономірності обробки тороїдних поверхонь потребує додаткового вивчення

Оскільки вершина різця в залежності від кривизни опуклого або увігнутого профілю «мігрує» по довжині різальної кромки, істотно зростає інтегральна площа зношеної поверхні інструменту в порівнянні з точінням гладких циліндричних або конічних валів.

Якщо циліндрична оброблена поверхня характеризується радіусом її утворення, який прагне до нескінченності, а конічна – ще й додатковим кутом нахилу твірної конуса до осі обертання деталі, то складно профільна поверхня обертання з наявністю криволінійних виступів і западин визначається положенням центру і величиною поточного радіуса кривизни профілю деталі.

Під час використання інструменту, оснащеного круглою різальною пластиною, поточне положення вершини, значення головного і допоміжного кутів у плані, радіуса заокруглення різальної кромки, максимального перетину зрізу, сумарної довжини різальних кромки, площі контактних поверхонь та ділянок зносу, поточні векторні значення осьової і радіальної складових сили різання та інші характеристики процесу різання залежать, головним чином, від співвідношення величини і положення центрів поточного радіуса кривизни, твірної криволінійної поверхні й радіуса круглої різальної пластини, в поєднанні зі швидкістю різання, подачею і глибиною різання.

Залежно від діаметра, що змінюється на перехідних криволінійних поверхнях деталі, при постійній частоті обертання, пропорційно змінюється і швидкість різання. При значному відхиленні швидкості різання від оптимальної по стійкості інструменту, залежно від збільшення або зменшення поточного діаметра деталі, буде відчутно змінюватися знос інструменту, тому треба примусово зменшувати або відповідно збільшувати частоту обертання деталі, щоб повернутися в діапазон оптимальних по стійкості значень швидкості різання при складно профільному точінні.

Токарна обробка складно профільних поверхонь проводиться в умовах, коли робоча вершина інструмента, оснащеного круглою різальною пластиною, не є постійно розташованою, а в кожний момент часу займає відмінне від попереднього положення на його різальній кромці. Інструмент працює, практично «обкочуючись» по оброблюваній поверхні. Положення умовної вершини різця залежить від фактичних значень  $\varphi$  головного та допоміжного  $\varphi_1$  кутів у плані різця. Відповідно буде змінюватися і сумарна довжина різальних кромки, а значить, і ділянка зносу різця. На величину зносу різальної пластини круглої форми при точінні складно профільних поверхонь впливає товщина і ширина зрізу, сумарна довжина різальних кромки, фактичне значення радіуса заокруглення різальної кромки. Ці параметри при точінні опуклого і увігнутого профілів суттєво відрізняються.

Потрібно враховувати, що для великих значень перетину зрізу вплив заокругленої різальної кромки на показники процесу різання може бути малозначущим, а при малих подачах цей вплив ігнорувати не можна – значна частка припуску, що зрізається, припадає на таку різальну кромку.

Під час токарної обробки складнопрофільних деталей потрібно забезпечити такі значення глибини різання і подачі, при яких зношені ділянки на інструменті не збігалися б з його умовною вершиною, що переміщається по різальній кромці залежно від профілю оброблюваної деталі.

Уявімо умови контактної взаємодії інструменту з круглою різальною пластиною з профілем деталі, як показано на рис. 2.

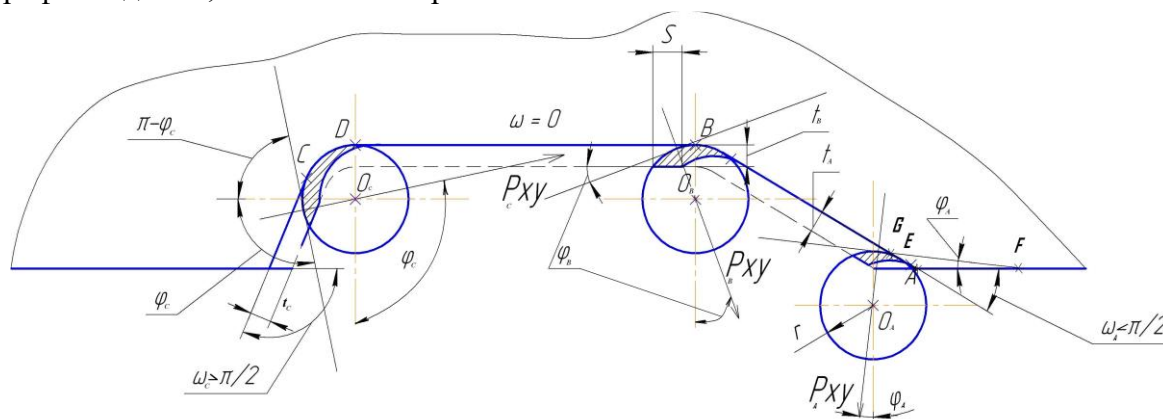


Рис. 2. Схема для визначення кута положення вершини різця з круглою пластиною на складному профілі в основній площині

Джерело: розроблено авторами.

Позначимо  $\omega$  кут нахилу профілю деталі. На ділянці входження різця в западину будемо вважати кут  $\omega$  кутом входу, а на ділянці виходу із западини – виходу. Припустимо, що кут  $\omega_2$  більше  $\omega_1$  і зони підвищеного зносу локалізовані в точках  $E$ , у випадку з кутом нахилу профілю  $\omega_1$ , і  $C$ , у випадку з кутом нахилу профілю  $\omega_2$ , що як раз і є несприятливим випадком. Тоді з положення вершини різця маємо на вході у профіль деталі:

$$\operatorname{tg}\omega_{\text{вх}} = \frac{S}{2r} \quad (1)$$

і, відповідно, на виході з профілю:

$$\operatorname{ctg}\omega_{\text{вих}} = \frac{r-t}{r}, \quad (2)$$

де  $S$  – подача різця на оберт деталі вздовж твірної профілю деталі, мм/об;  $r$  – радіус пластини;  $t$  – глибина різання в напрямку, перпендикулярному до твірної профілю деталі, мм.

Оскільки кути профілю деталі задаються контуром твірної тіла обертання і, головним чином, визначаються кутом нахилу профілю деталі, а радіус пластини вибирається, виходячи з мінімального радіуса западини деталі і обидві ці характеристики задаються спочатку, то вирішуємо рівняння (1) і (2) щодо невідомих величин  $S$  і  $t$ . Беручи до уваги, що даний випадок є несприятливим і наявність підвищеного зносу на вершині різця викличе спотворення профілю, відхилення розміру деталі і погіршення шорсткості обробленої поверхні, перетворимо рівняння в нерівності, які накладають обмеження на шукані значення подачі інструменту уздовж твірної профілю:

$$0 < S < 2r(\operatorname{tg}\omega_{\text{вх}}) \quad (3)$$

і глибини різання в напрямку, перпендикулярному до твірної профіля деталі:

$$0 < t < r(\operatorname{ctg}\omega_{\text{вих}} - 1). \quad (4)$$

Таким чином, отримуємо обмеження, що накладаються на вибір подачі та глибини різання залежно від наявності локальних зон підвищеного зносу інструменту, оснащеного круглою різальною пластиною, на вході і виході в струмок оброблюваного профілю.

На рис. 3, *a* наведена схема контакту інструменту, оснащеного круглою різальною пластиною, на передній поверхні зі стружкою при обробці опуклої тороїдальної частини складно профільної поверхні.

На відміну від точіння по циліндричній твірній лінії, при обробці складного профілю, коли вершина різця і центр кола різальної пластини зміщуються на однакову величину подачі на один оберт деталі, при переміщенні центру різальної пластини з точки  $O_1$  в точку  $O_2$  за один оберт, вершина різця переходить з точки  $B$  в точку  $A$ . Припустимо, що відрізок  $O_1O_2$  дорівнює подачі різця, тобто  $O_1O_2 = S_0$  ( $S_0$  – контурне зміщення центру пластини на оберт деталі), тоді відрізок  $AB = S_{\text{вс}}$ , а саме  $S_{\text{вс}}$  – дійсна подача вершини різця на опуклій тороїдальній частині криволінійної поверхні деталі.

Точкою  $X$  відзначено положення максимального виступу мікронерівностей обробленої поверхні, що формується головною і допоміжною кромками різця. Ця точка лежить на перпендикулярі, проведеному через середину відрізка  $AB$ , а точки  $A$  і  $B$  знаходяться на лініях сполучення радіусів оброблюваної деталі і різальної пластини (рис. 3, *a*).

Контурна подача, яка визначається по центру різальної пластини, пов'язана з подачею уздовж осі  $X$ :

$$S_0 = S_x \cdot \cos \delta. \quad (5)$$

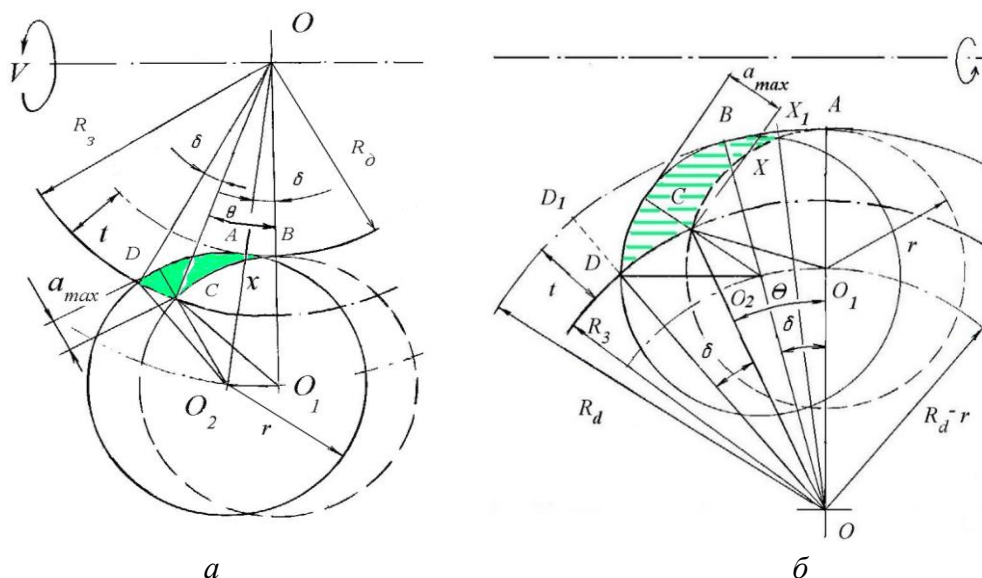


Рис. 3. Схема до розрахунку максимальної товщини зрізу на опуклій (а) і увігнутій (б) тороїдних частинах складно профільної деталі

Джерело: розроблено авторами.

З геометричних побудов маємо, що трикутники  $O_1OC$  і  $O_2OD$  рівні між собою і максимальна товщина зрізу знаходиться як:

$$a_{max}^{oc} = r - O_2C. \tag{6}$$

З трикутника  $O_1OC$  маємо:

$$(O_1C)^2 = r^2 = R_3^2 + (r + R_3 - t)^2 - 2R_3(r + R_3 - t)\cos \Theta; \tag{7}$$

$$\cos \Theta = \frac{R_3^2 - r^2 + (r - t + R_3)^2}{2R_3(r - t + R_3)}, \tag{8}$$

де  $r$  – радіус пластини, мм;  $R_3$  – радіус виступу профілю заготовки, мм;  $t$  – глибина різання, мм.

Кут  $O_1OC = \Theta$ :

$$\Theta = \arccos \frac{R_3^2 - r^2 + (r - t + R_3)^2}{2R_3(r - t + R_3)}. \tag{9}$$

Кут  $\delta$ , на який переміщується вершина різця за один оберт деталі, знаходимо з трикутника  $O_1OO_2$ :

$$\delta = \arctg \frac{S_x}{R_d + r}, \tag{10}$$

де  $R_d$  – радіус виступу профілю деталі на опуклій тороїдній ділянці.

З трикутника  $O_2OC$  маємо:

$$(O_2C)^2 = R_3^2 + (r + R_d)^2 - 2R_3(r + R_d)\cos(\Theta - \delta). \tag{11}$$

Знаходячи квадратний корінь з отриманого виразу і підставляючи отриманий вираз в рівняння (10) для розрахунку максимальної товщини зрізу при точінні ділянки виступу тороїдної поверхні й беручи до уваги, що радіус заготовки становить сумарну величину радіуса деталі і припуску на обробку, знаходимо максимальну товщину зрізу на цій ділянці:



$$a_{max}^{bc} = r - \sqrt{\left( (R_d + t)^2 + (r + R_d)^2 - 2(R_d + t)(r + R_d) \right) \rightarrow \cdot \rightarrow \cos \left[ \arccos \frac{(R_d + t)^2 - r^2(r + R_d)^2}{2(R_d + t)(r + R_d)} - \arctg \frac{S_x}{r + R_d} \right]}. \quad (12)$$

Сумарну довжину різальних кромок знаходимо з криволінійного трикутника  $DXC$ . Довжина  $L$  різальних кромок дорівнює довжині дуг  $DA$  чи  $BC$  і дорівнює добутку радіуса  $r$  пластини і кута  $CO_1O$ .

З трикутника  $CO_1O$  знаходимо кут  $CO_1O$ :

$$CO_1O = \arccos \frac{r^2 + (r + R_d)^2 - (R_d + t)^2}{2r(r + R_d)}. \quad (13)$$

І тоді сумарна довжина різальних кромок:

$$L = r \cdot \arccos \frac{r^2 + (r + R_d)^2 - (R_d + t)^2}{2r(r + R_d)}. \quad (14)$$

Площу перетину зрізу  $A_{Rbc}$  для виступаючої тороїдної ділянки складно профільної деталі знаходимо як площу криволінійного трикутника  $DXC$  з підставою  $L$  і висотою  $a_{max}^{bc}$ .

$$A_{Rbc} = \frac{r}{2} \cdot \arccos \frac{r^2 + (r + R_d)^2 - (R_d + t)^2}{2r(r + R_d)} \cdot \left\{ r - \sqrt{\left( (R_d + t)^2 + (r + R_d)^2 - 2(R_d + t)(r + R_d) \right) \rightarrow \cdot \rightarrow \cos \left[ \arccos \frac{(R_d + t)^2 - r^2(r + R_d)^2}{2(R_d + t)(r + R_d)} - \arctg \frac{S_x}{r + R_d} \right]} \right\}. \quad (15)$$

Дійсне значення подачі на радіусній частині виступаючої тороїдної поверхні знаходимо з подібності криволінійних трикутників  $OO_1O_2$  і  $OBA$ . З урахуванням  $AB = S_{bc}$ , значення дійсної подачі на виступаючому тороїдному профілі радіусом  $R_d$ :

$$S_{bc} = \frac{S_o \cdot R_d}{R_d + r} \quad (16)$$

або після перетворень:

$$S_{bc} = \frac{S_o}{1 + \frac{r}{R_d}}. \quad (17)$$

З огляду на призначення радіуса різальної пластини, нерівність  $R_d \geq r$  є необхідною умовою. Виходячи із рівняння (17) очевидно, що фактична подача по контурній лінії складного профілю на виступаючій тороїдній ділянці радіусом  $R_d$  завжди буде меншою за номінальну, що задається по лінії переміщення центру різальної пластини. Виходячи з цього положення, можна стверджувати, що приймаючи значення подачі

$S = const$  на циліндричній ділянці профілю деталі, при переході на виступаючу тороїдну поверхню значення подачі можна збільшувати, призначаючи такі значення без шкоди для шорсткості обробленої поверхні на цій ділянці:

$$S_{ec} = S_o \cdot \frac{1}{1 + \frac{r}{R_d}}. \quad (18)$$

Враховуючи залежності контурної подачі від подачі уздовж осі  $X$ , з рівняння (5), отримуємо:

$$S_{bc} = S_x \cdot \cos \delta \cdot \frac{1}{1 + \frac{r}{R_d}}. \quad (19)$$

З урахуванням значення кута  $\delta$ , з рівняння (10) знаходимо значення дійсної подачі на виступаючому тороїдному профілі залежно від осьової подачі:

$$S_{bc} = S_x \cos \arctg \frac{S_x}{R_d + r} \cdot \frac{1}{1 + \frac{r}{R_d}}. \quad (20)$$

При цьому другий співмножник можна вважати коефіцієнтом підвищення продуктивності обробки. Оскільки знаменники множників в рівнянні (16) більші за одиницю, то фактична подача по опуклому тороїдному контуру деталі завжди буде менше заданої по центру різальної пластини.

Отримані вирази для розрахунку максимальної товщини зрізу і площі перетину зрізаного шару в подальшому використовуються для розрахунку складових сили різання та оцінки міцності різального клину різця.

Для визначення положення головного кута в плані на тороїдній частині опуклого профілю деталі (рис. 4, *a*) проведемо в точці  $B$  перпендикуляр до осі  $X$  і добудуємо трикутник  $OCO_1$ .

Точка  $G$  перетину прямої, проведеної через точку  $A$  перпендикулярно відрізьку  $OO_2$ , і точка  $F$  перетину цих перпендикулярів утворюють трикутник  $DFG$ , подібний трикутнику  $AO_2G$ . У цих подібних трикутниках кути  $GFD$  і  $O_2A$  рівні між собою. Оскільки центр пластини  $O_2$  зміщений щодо центру  $O_1$  на кут  $\delta$ , на цей же кут буде повернута і дотична  $DA$  щодо осі  $X$ . Отже, кут  $GDF$  буде дорівнювати куту  $\varphi_2$ , збільшеному на кут  $\delta$ . У такому випадку з трикутника  $O_2OC$  маємо:

$$(OC)^2 = (O_2C)^2 + (O_2O)^2 - 2 \cdot O_2C \cdot O_2O \cdot \cos(\varphi_2 + \delta). \quad (21)$$

Підставляючи в рівняння (21) значення відрізків, виражені через радіуси заготовки, деталі і пластини, а також максимальну товщину зрізу, отримуємо:

$$R_3^2 = (r - a_{max})^2 + (r + R_d)^2 - 2(r - a_{max}) \cdot (r + R_d) \cos(\varphi_2 + \delta). \quad (22)$$

Сума кутів, знайдена після перетворень:

$$\varphi_2 + \delta = \arccos \frac{(r + a_{max})^2 - 2R_3^2 + (r - R_d)^2}{2(r - a_{max}) \cdot (r + R_d)}. \quad (23)$$

Знаючи з рівняння (10) кут  $\delta$  відхилення центру пластини за один оберт деталі, підставимо його значення для заданих умов і отримаємо значення кута в плані для положення центру різальної пластини в точці  $O_2$ :

$$\varphi_2 = \arccos \frac{(r + a_{max})^2 - 2R_3^2 + (r - R_d)^2}{2(r - a_{max}) \cdot (r + R_d)} - \operatorname{arctg} \frac{S_x}{r + R_d}. \quad (24)$$

Залежно від положення умовної вершини різальної пластини щодо осі  $X$  на тороїдній ділянці з  $R_d = \text{const}$ , кут  $\delta$  буде змінювати своє значення від  $n\delta$  від початкової точки твірної тороїдного профілю до  $\delta_0$  в точці перетину умовної вершини різця осі ординат  $Y$  і далі до  $N\delta$  – точки виходу умовної вершини різця з тороїдної поверхні радіуса  $R_d$ . Тоді в загальному вигляді рівняння для розрахунку головного кута в плані для інструменту з круглою різальною пластиною на тороїдній опуклій поверхні буде:

$$\varphi_{n(N)} = \arccos \frac{(r + a_{max})^2 - 2R_3^2 + (r - R_d)^2}{2(r - a_{max}) \cdot (r + R_d)} - (N - n) \operatorname{arctg} \frac{S_x}{r + R_d}, \quad (25)$$

де  $n(N)$  – накопичене число обертів до відповідної точки на випуклому тороїдному профілі радіуса  $R_d$ , рахуючи від точки перетину з віссю  $Y$ .

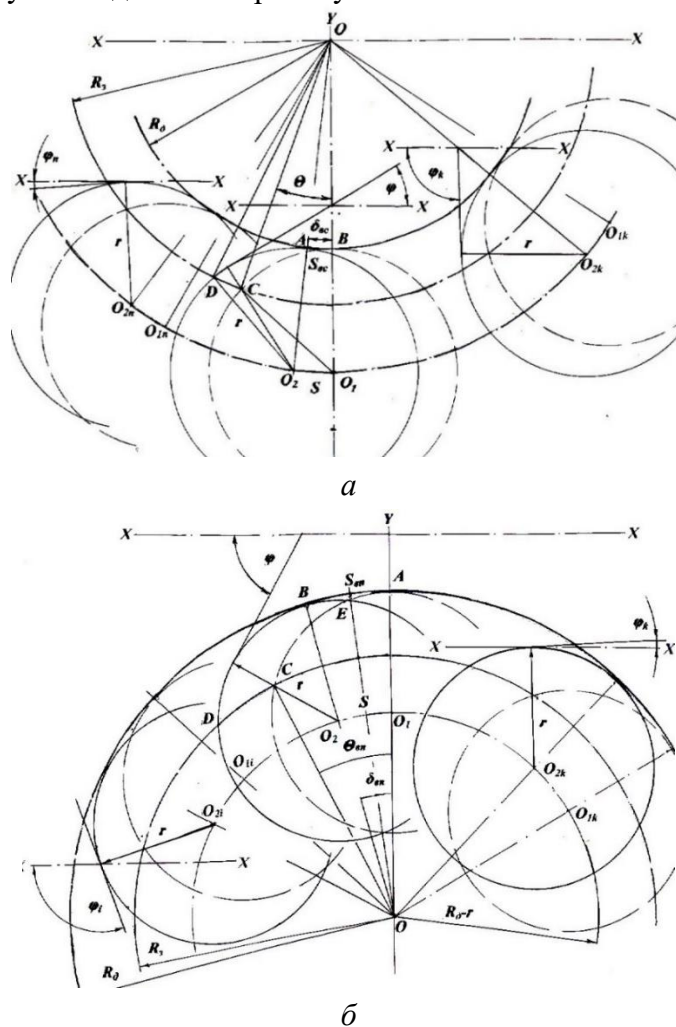


Рис. 4. Схема до розрахунку головного кута в плані на опуклій (а) і увігнутій (б) тороїдних частинах складно профільної деталі

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 4, б наведена схема контакту інструменту, оснащеного круглою різальною пластиною, на передній поверхні зі стружкою при обробці увігнутої тороїдної частини складно профільної поверхні.

Визначимо відрізок переміщення центру пластини за один оберт деталі  $O_1O_2$  через подачу різця вздовж осі  $X$ :

$$S_o = \frac{S_x}{\cos \delta}, \quad (26)$$

де  $S_x$  – задана подача на оберт впродовж осі  $X$ ; тоді відрізок  $AB = S_{\text{вп}}$ , а саме  $S_{\text{вп}}$  – дійсна подача вершини різця на увігнутій тороїдній частині криволінійної поверхні деталі.

Точка  $X$  лежить на перпендикулярі, проведеному через середину відрізка  $AB$  в положенні максимального виступу мікронерівностей обробленої поверхні, точки  $A$  і  $B$  знаходяться на лініях сполучення радіусів оброблюваної деталі й різальної пластини (рис. 3, б). З геометричних побудов маємо, що трикутники  $O_1OC$  і  $O_2OD$  рівні між собою, а максимальна товщина зрізу:

$$a_{\text{max}}^{\text{en}} = r - O_2C. \quad (27)$$

З трикутника  $O_1OC$  маємо:

$$(O_1C)^2 = r^2 = R_3^2 + (R_d - r)^2 - 2R_3(R_d - r)\cos \Theta \quad (28)$$

і

$$\cos \Theta = \frac{R_3^2 + (R_d - r)^2}{2R_3(R_d - r)}, \quad (29)$$

де  $r$  – радіус пластини, мм;  $R_3$  – радіус виступу профілю заготовки, мм;  $R_d$  – радіус виступу профілю деталі, мм;  $t$  – глибина різання, мм.

Оскільки на увігнутій тороїдній ділянці профілю радіус деталі становить сумарну величину радіуса заготовки та припуску на обробку, визначаємо косинус кута  $\Theta$  через радіус виступу профілю деталі:

$$(O_1C)^2 = r^2 = (R_d - t)^2 + (R_d - r)^2 - 2(R_d - t)(R_d - r)\cos \Theta, \quad (30)$$

$$\cos \Theta = \frac{(R_d - t)^2 + (R_d - r)^2}{2(R_d - t)(R_d - r)}. \quad (31)$$

Відрізок  $O_2C$  знаходимо з трикутника  $OO_2C$ :

$$(O_2C)^2 = (R_d - t)^2 + (R_d - r)^2 - 2(R_d - t)(R_d - r)\cos(\Theta - \delta). \quad (32)$$

Поточний кут переміщення умовної вершини різального інструмента за один оберт деталі, знаходимо через тангенс кута  $O_2OO_1$ :

$$\delta = \arctg \frac{S_x}{R_d - r}. \quad (33)$$

Тоді з урахуванням рівнянь (29), (31) і (33) знаходимо вираз для максимальної товщини зрізу на увігнутому тороїдному контурі деталі (у западині):

$$a_{\text{max}}^{\text{вп}} = r - \sqrt{\frac{(R_d - t)^2 + (R_d - r)^2 - 2(R_d - t)(R_d - r)\cos \Theta}{\cos \left[ \arccos \frac{(R_d - t)^2 - r^2 + (R_d - r)^2}{2(R_d - t)(R_d - r)} - \arctg \frac{S_x}{R_d - r} \right]}}. \quad (34)$$

Для знаходження сумарної довжини  $L$  різальних кромок  $DX$  допустимо, з огляду на малість значень шуканих величин, що дуги  $D_1X_1$  і  $DX$  рівні. Тоді

$$L = R_d \sphericalangle DOX = R_d \left( \Theta + \frac{\delta}{2} \right), \text{ тобто:}$$

$$L = R_d \left( \arccos \frac{(R_d - t)^2 + (R_d - r)^2}{2(R_d - t)(R_d - r)} + \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{S_x}{R_d - r} \right) \quad (35)$$

і після підстановки з (31) і (33) знаходимо площу перетину зрізу  $A_{Ren}$  для увігнутої тороїдної ділянки, яка може бути знайдена як площа криволінійного трикутника  $DXC$  з основою  $L$  і висотою  $a_{max}^{вп}$ :

$$A_{R}^{вп} = \left\langle \frac{1}{2} R_d \left( \arccos \frac{(R_d - t)^2 + (R_d - r)^2}{2(R_d - t)(R_d - r)} + \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{S_x}{R_d - r} \right) \right\rangle \cdot \left\langle r - \sqrt{(R_d - t)^2 + (R_d - r)^2 - 2(R_d - t)(R_d - r) \rightarrow \cdot \rightarrow \cos \left[ \arccos \frac{(R_d - t)^2 - r^2(R_d - r)^2}{2(R_d - t)(R_d - r)} - \operatorname{arctg} \frac{S_x}{R_d - r} \right]} \right\rangle. \quad (36)$$

Дійсне значення подачі на радіусній частині увігнутої тороїдної поверхні знаходимо з подібності трикутників  $OO_1O_2$  і  $OBA$ . З урахуванням  $AB = S_{en}$  вираз для визначення значення дійсної подачі на увігнутому тороїдному профілі радіусом  $R_d$ :

$$S_{вп} = \frac{S_o \cdot R_d}{R_d - r}. \quad (37)$$

Після перетворень з урахуванням виразу для визначення величини переміщення центру різальної пластини (33):

$$S_{вп} = \frac{S_x}{\left( 1 - \frac{r}{R_d} \right) \cos \delta}. \quad (38)$$

Вираз для дійсної подачі по увігнутій тороїдній поверхні:

$$S_{вп} = S_x \cdot \frac{1}{\cos \operatorname{arctg} \frac{S_x}{R_d - r} \cdot \left( 1 - \frac{r}{R_d} \right)}. \quad (39)$$

Оскільки  $R_d \geq r$ , виходячи із рівняння (39) очевидно, що знаменник завжди менше одиниці, а дійсна подача по лінії, котра утворює складний профіль на увігнутій тороїдній ділянці радіусом  $R_d$  більше номінальної, що задається по лінії переміщення центра круглої різальної пластини.

Виходячи з цього, можна стверджувати, що приймаючи значення подачі на циліндричній ділянці складного профілю деталі, при переході на увігнуту тороїдну поверхню, значення подачі потрібно зменшувати, призначаючи такі значення з метою забезпечення заданої шорсткості обробленої поверхні на цій ділянці.

При цьому другий співмножник у рівнянні (39) можна вважати коефіцієнтом забезпечення шорсткості обробленої поверхні.

Отримані вирази для розрахунку максимальної товщини зрізу і площі перетину зрізаного шару надалі використовуються для розрахунку складових сили різання і міцності різального клину різця.

Для визначення величини головного кута в плані на тороїдній частині увігнутого профілю деталі проведемо в точці перпендикуляр до осі  $X$  і побудуємо трикутник  $CO_2B$  (рис. 4, б). З умови рівності кутів між двома взаємно перпендикулярними прямими головний кут у плані  $\phi_{02}$  в положенні центру різальної пластини в точці  $O_2$  буде:

$$\phi_{02}^{BP} = \sphericalangle CO_2B + \delta. \quad (40)$$

З трикутника  $BOC$  знаходимо відрізок  $BC$

$$BC = \sqrt{(OC)^2 + (OB)^2 - 2OC \cdot OB \cdot \cos(\Theta_{BP} - \delta_{BP})}. \quad (41)$$

Косинус кута  $CO_2B$ :

$$\sphericalangle CO_2B = \arccos \frac{(CO_2)^2 + (O_2B)^2 - (CB)^2}{2r \cdot CO_2}. \quad (42)$$

І тоді, після перетворень з урахуванням того, що  $O_2C = r - a_{max}^{BP}$ ,  $O_2B = r$ ,  $OC = R_d^{BP} - t$ ,  $OB = R_d^{BP}$ , миттєвий головний кут в плані при знаходженні центру пластини в точці  $O_2$ :

$$\phi_{02}^{BP} = \arccos \sqrt{\frac{2[r^2 - ra_{max}^{BP} - R_d^{BP}t - (R_d^{BP} - t)R_d^{BP} \cos(\Theta_{BP} - \delta)_{BP}]}{a_{max}^{2BP} + t^2}} + \delta_{BP} \quad (43)$$

При переміщенні вершини різця з точки  $A$  в сторону зростання діаметра деталі кут  $\delta_i$  буде зростати з кожним обертом деталі, а кут  $C_iOB_i$  залишатиметься постійним. Разом з тим при обробці в западині на ділянці від максимального діаметра  $D_k^{BP}$  в точці  $K$  до мінімального в точці  $A$  головний кут в плані буде спадати на величину накопиченого кута  $n\delta$ .

У загальному вигляді рівняння для розрахунку миттєвого головного кута в плані при точінні увігнутої тороїдної поверхні для правого різця:

$$\phi_{BP_i} = \arccos \sqrt{\frac{2[r^2 - ra_{max}^{BP} - R_d^{BP}t - (R_d^{BP} - t)R_d^{BP} \cos(\Theta_{BP} - \delta_{BP})]}{a_{max}^{2BP} + t^2}} \mp n\delta_{BP}. \quad (44)$$

Значення кутів  $\Theta_{BP}$  і  $\delta$  знаходимо з виразів (27) і (29). При переміщенні вершини різця від максимального значення діаметра на твірній увігнутої тороїдної поверхні до його мінімального значення застосовується негативне значення, а при подальшому зростанні діаметра деталі при виході різця із западини – позитивне значення кута  $\delta_{BP}$ , помножене на число обертів деталі, відповідне даному відрізку ділянки профілю.

**Висновки.** Під час обробки складно профільної деталі інструментом, оснащеним круглою різальною пластинною, характеристики процесу різання залежать головним чином від співвідношення величини та положення центрів поточного радіуса кривизни

утворюваної криволінійної поверхні й радіуса різальної пластини, у поєднанні зі швидкістю, подачею і глибиною різання.

Спільний вплив режимів різання, величин і положення центрів поточного радіуса кривизни утвореної криволінійної поверхні і радіуса різальної пластини інструменту на характеристики процесу різання представлено у вигляді аналітичних залежностей. За наведеними в роботі залежностями можна визначити поточне положення вершини, значення головного і допоміжного кутів в плані, радіуса заокруглення різальної кромки, максимального перетину зрізу, сумарної довжини різальних кромок, площі контактуючих поверхонь та ділянок зносу, поточні векторні значення осьової і радіальної складових сили різання та інші важливі характеристики процесу різання.

З врахуванням особливостей складного профілю деталі, що обробляється, встановлені обмеження на можливі значення подачі і глибини різання та запропоновано залежності для розрахунку величин контурної подачі, головного кута в плані інструменту, максимальної товщини зрізу, сумарної довжини різальних кромок, площі перетину зрізу на окремих ділянках деталі.

Отримані результати можуть бути використані при визначенні сил різання, оцінки зносу різального інструмента, створення алгоритму зміни умов різання при обробці складно профільних деталей на верстатах з ЧПК.

#### Список використаних джерел

1. Supriya, J. P. Study on Effect of Basic Cutting Variables on Machining Characteristics of Low Carbon Steel Work-Material in Turning / J. P. Supriya, V. A. George // *Inter. J. of Eng. Res. & Technol.* – 2014. – Vol. 3, № 8. – Pp. 712-716.
2. Xichun, L. The effects of machining process variables and tooling characterisation on the surface generation: modelling, simulation and application promise / L. Xichun, K. Cheng, R. Ward // *Inter. J. of Advanc. Manuf. Technol.* – 2005. – № 25. – Pp. 1089-1097.
3. Analysis of the Effect of Cutting Variables against Surface Hardness / E. Diniardi1, S. A. Yudistirani, H. Basri, A. I. Ramadhan // *J. of Applied Sci. and Advanc. Technol.* – 2021. – Vol. 3, № 3. – Pp. 81-88.
4. Туромша, В. И. Анализ алгоритмов управления параметрами режима резания при обработке деталей с переменной глубиной резания на станках с числовым программным управлением / В. И. Туромша, С. Н. Мищенко // *Машиностроение.* – 2010. – № 4. – С. 2-6.
5. Increasing tool life during turning with a variable depth of cut / M. Sadílek, R. Lep, Z. Sadílková, J. Valíek, L. Petřokovsk // *Materials and technology.* – 2013. – Vol. 47, № 2. – Pp. 199-203.
6. Sadilek, M. Turning Thin-Walled Workpieces with Variable Depth of Cut / M. Sadilek, L. Petrkovska, J. Kratochvil // *Inter. J. of Mechnic. and Mechatron. Eng.* – 2013. – Vol. 7, № 9. – Pp. 1868-1872.
7. Туромша, В. И. Точение деталей сложной формы с переменной глубиной резания / В. И. Туромша // *Машиностроение.* – 2000. – № 16. – С. 133-137.
8. The variable radial depth of cut in finishing machining of thin-walled blade based on the stable-state deformation field / H. Yaohua, Z. Dinghua, Z. Ying, W. Baohai // *The Inter. J. of Advanc. Manuf. Technol.* – 2021. – № 113. – Pp. 141-158.
9. Туромша, В. И. Моделирование износа и стойкости инструмента при обработке деталей с переменной глубиной резания / В. И. Туромша, С. Н. Мищенко // *Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого.* – 2011. – № 2 (45).
10. Reddy, R. G. A mechanistic force model for combined axial-radial contour turning / R. G. Reddy, R. E. DeVor, S. G. Kapoor // *Inter. J. of Machine Tools & Manuf.* – 2001. – № 41. – Pp. 1551-1572.

#### References

1. Supriya, J.P., George, V.A. (2014). Study on Effect of Basic Cutting Variables on Machining Characteristics of Low Carbon Steel Work-Material in Turning. *Inter. J. of Eng. Res. & Technol*, 3(8), 712–716.

2. Xichun, L., Cheng, K., Ward, R. (2005). The effects of machining process variables and tooling characterisation on the surface generation: modelling, simulation and application promise. *Inter. J. of Advanc. Manuf. Technol*, 25, 1089–1097.
3. Diniard, E., Yudistirani, S. A., Basri, Hasan, R., Anwar, I. (2021). Analysis of the Effect of Cutting Variables against Surface Hardness. *J. of Applied Sci. and Advanc. Technol*, 3(3), 81–88.
4. Turomsha, V.I., Mishchenko, S.N. (2010). Analiz algoritmov upravleniia parametramy rezhima rezaniia pri obrabotke detalei s peremnoi glubinoi rezaniia na stankakh s chislovym programmym upravleniem [Analysis of algorithms for controlling cutting parameters when processing parts with variable depth of cut on machines with numerical control]. *Mashinostroenie – Mechanical engineering*, 4, 2–6.
5. Sadilek, M., Lep, R., Sadilková, Z., Valiek, J., Petokovsk, L. (2013). Increasing tool life during turning with a variable depth of cut. *Materials and technology*, 47, 2, 199–203.
6. Sadilek, M., Petrkovska, L., Kratochvil, J. (2013). Turning Thin-Walled Workpieces with Variable Depth of Cut. *Inter. J. of Mechnic. and Mechatron. Eng.*, 7, 9, 1868–1872.
7. Turomsha, V.I. (2000). Tochenye detalei slozhnoi formy s peremnoi hlubynoi rezaniia [Turning of parts of complex shapes with variable depth of cut]. *Mashinostroenie – Mechanical engineering*, 16, 133–137.
8. Hou, Y., Zhang, D., Zhang, Y., Wu, B. (2021). The variable radial depth of cut in finishing machining of thin-walled blade based on the stable-state deformation field. *The Inter. J. of Advanc. Manuf. Technol*, 113, 141–158.
9. Turomsha, V.I., Mishchenko, S.N. (2011). Modelirovanie iznosa y stoikosti instrumenta pri obrabotke detalei s peremnoi glubinoi rezaniia [Modeling of wear and tool life when machining parts with variable depth of cut]. *Vestnik HHTU ym. P. O. Sukhoho – Bulletin of GGTU named after P.O. Sukhoi*, 2(45).
10. Reddy, R.G., DeVor, R.E., Kapoor, S.G. (2021). A mechanistic force model for combined axial-radial contour turning. *Inter. J. of Machine Tools & Manuf.*, 41, 1551–1572.

Отримано 08.12.2023

UDC 621.9.025

**Oleksandr Manovytsky<sup>1</sup>, Sergiy Klymenko<sup>2</sup>, Yuriy Ryzhov<sup>3</sup>, Serhii Sapon<sup>4</sup>**<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences,Senior Researcher of the Department «Technological Control of the Quality of Machining Tools with SHM»  
V.N. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)E-mail: [msm5@i.ua](mailto:msm5@i.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3882-7866>Researcher ID: [FFQ-3675-2022](https://orcid.org/0000-0003-3882-7866). Scopus Author ID: [57197629303](https://orcid.org/0000-0003-3882-7866)<sup>2</sup>Dr. Technical Science, Professor, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Deputy Director of Science

V.N. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [atmu@meta.ua](mailto:atmu@meta.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>Researcher ID: [Q-8928-2019](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771). Scopus Author ID: [57221904325](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771)<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences,

Senior Researcher of the Department «Technological Control of the Quality of Machining Tools with SHM»

V.N. Bakul Institute for Superhard Materials of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [super.t-55@ukr.net](mailto:super.t-55@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9047-1903>. Scopus Author ID: [6701431900](https://orcid.org/0000-0001-9047-1903)<sup>4</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Wood Technology  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)E-mail: [s.sapon@gmail.com](mailto:s.sapon@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>Researcher ID: [G-7764-2014](https://orcid.org/0000-0003-1082-6431). Scopus Author ID: [56736964700](https://orcid.org/0000-0003-1082-6431)

## MESSURING THE EXACT VALUES OF ANGLES IN A TOOL PLAN AND CONTOUR FEED RATES WHEN TURNING A PART WITH A COMPLEX PROFILE

The paper considers the peculiarities of complex profile turning with a tool equipped with a round cutting insert in relation to the cases of machining convex and concave toroidal surfaces. Current vertex position, values of the main and auxiliary angles in the plan, radius of curvature of the cutting edge, maximum section of the cut, total length of the cutting edges, contact surface area and wear areas, the current vector values of the axial and radial components of the cutting force



and other characteristics of the cutting process depend mainly on the ratio of the size and position of the centers of the current radius of curvature of the curved surface and the radius of the cutting insert, in combination with the cutting speed, feed rate and depth of cut. The tip of the cutter, depending on the curvature of the convex or concave profile, "migrates" along the length of the cutting edge, significantly increasing the integrated area of the tool's wear surface compared to turning smooth cylindrical or tapered shafts.

Depending on the diameter of the workpiece, which varies on transitional curved surfaces, the cutting speed changes proportionally at a constant speed.

Taking into account the peculiarities of the complex profile of the workpiece, restrictions on the possible values of feed and depth of cut are established and dependencies are proposed for calculating the contour feed, main angle in the tool plan, maximum cut thickness, total length of cutting edges, and cut cross-sectional area in individual parts of the workpiece.

The results obtained can be used to determine cutting forces, assess cutting tool wear, and create an algorithm for changing cutting conditions when machining complex parts on CNC machines.

**Keywords:** complex part; cutting tool; machining; cutting mode; tool geometric parameters.

*Fig.: 4. References: 10.*

## РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-4(34)-82-90

UDC 004.02:[323.266:316.472.4]

*Liudmyla Mishchenko<sup>1</sup>, Iryna Klymenko<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>PhD student of Department of Computer Engineering,  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [liudamishchenko@gmail.com](mailto:liudamishchenko@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5101-2517>

<sup>2</sup>Prof., ScD of Department of Computer Engineering  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [ikliryna@gmail.com](mailto:ikliryna@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5345-8806>

### METHOD FOR DETECTING FAKE NEWS THROUGH WRITING STYLE

*In the era of digital technologies, distinguishing truth from misinformation is a challenging task. Fake news, characterized by deceitful narratives, poses a significant threat. Traditional fact-checking methods often overlook the nuances of linguistic stylistic coloring. This study employs an advanced writing style analysis that extends beyond conventional methodologies. Several linguistic dimensions of texts are considered in this research, emphasizing on pre-processing and function development. The experiments are based on various datasets. Thus, the developed method for detecting fake news utilizes a multidimensional approach. The proposed development includes meticulous verification of the dataset, pre-processing, and function development, focusing on emotionally charged vocabulary, word groups used in reports indicating event likelihood, mild cursing, and non-standard lexicon. Significant differences in linguistic features were identified, contributing to a nuanced understanding of the construction and creation of deceptive texts. The research results demonstrate that this method accurately distinguishes genuine from fake news articles based on writing style. This study represents significant progress in identifying phony news through writing style analysis, aiding in combating misinformation in the era of digital technologies.*

**Keywords:** fake news; real news; writing style analysis; emotionally colored words; emotional language; probabilistic words; profanity detection.

Table: 2. Fig.: 1. References: 10.

**Urgency of the research.** The proliferation of misinformation and fake news in the digital sphere poses a severe threat to society. With the exponential growth of information sources and the ease of disseminating content online, distinguishing between credible and false information has become increasingly challenging. This research addresses the critical need to combat the spread of fake news, providing methods to analyze the text through linguistic patterns and writing styles.

The topic covered in this research aligns closely with the interdisciplinary realm encompassing language, computer science, and artificial intelligence. It intersects with natural language processing, machine learning, and linguistic analysis. The study aims to develop sophisticated algorithms and models capable of differentiating between genuine and fabricated news articles based on nuanced linguistic features. This amalgamation of linguistic expertise and technological innovation is pivotal in enhancing information reliability and trustworthiness in our digital age.

In essence, the urgency of this research lies in its ability to bridge the gap between linguistic analysis and technological advancements, providing a robust framework to combat the proliferation of fake news.

**Target setting.** The problem statement for the research on "Method for Detecting Fake News Through Writing Style" centers on developing robust techniques to differentiate between authentic and fake news articles based on linguistic patterns. The critical challenge lies in combating the proliferation of misinformation, which undermines public trust and distorts societal discourse.

Solving this problem is essential as fake news disrupts information integrity, affects decision-making processes. Detecting deceptive news through writing styles and advanced computational methods contributes to increasing reliability of methods for detecting fake news, ensuring the dissemination of accurate information to the public.

The significance of addressing this problem extends to various fields such as computer science, journalism, and information technology. It aligns with the urgent need to create reliable tools that leverage linguistic analysis and machine learning to enhance media literacy, safeguard democratic processes, and promote ethical journalism practices in the digital age.

**Actual scientific researches and issues analysis.** The problem of fake news in the era of digital media and the rapid circulation of information, characterized by the deliberate dissemination of deceptive or false information, has drawn significant attention from numerous researchers. Detecting fake news is a complex task, and many scientific works delve into the nuances of this issue with a focus on writing style analysis.

The research "Fake News Detection on Social Media: A Data Mining Perspective" [1] outlines the problem of identifying fake news on social media platforms, introducing a structure for intelligent data analysis. Emphasis is placed on the importance of linguistic and stylistic features in detecting deceptive content, with a specific analysis of writing style. However, the work highlights the need for a multidimensional approach that includes linguistic analysis and pays more attention to user behavior, source reliability, and domains not covered within the proposed method.

In another scholarly work [2], a theoretical approach to early detection of fake news is employed. Linguistic features and writing style are crucial indicators, focusing on language differences between true and false news. However, while the researchers propose a theoretical analysis model, practical implementation and actual experiments still need to be improved. Moreover, their reliance on templated article writing may not align with contemporary standards.

This comprehensive review [3] discusses fundamental theories and methods for detecting fake news. It emphasizes the role of linguistic characteristics and writing style in differentiating genuine news from fake news. However, the work only covers certain aspects of writing style, such as emotional tone or cursing.

In the study by other authors [4], the language of hostility is frequently encountered in fake news. This work identifies hostile expressions based on writing style analysis, emotional tone, and linguistic markers associated with harmful content, contributing to a comprehensive understanding of detecting fake news. However, certain aspects of this work still need resolution, such as achieving more detailed classification and a broader range of categories in the database.

Researchers in [5] develop automatic methods for detecting fake news based on writing style. They create two classifiers: a neural network and a model based on stylometric characteristics. The stylometric model analysis focuses on an affective lexicon typical of fake news. However, the study does not consider profanity, words describing event likelihood, or emotional coloration in the text. These factors significantly impact the results and broaden the possibilities of news analysis.

Natural Language Processing (NLP) involves creating algorithms and models to identify and autonomously differentiate accurate news articles from deceptive or fabricated content. As discussed in a previous article [6], NLP technology was central to detecting fake news. All subsequent developments aim to improve existing methods' accuracy, classification, or speed.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Despite making a valuable contribution to the detection of fake news through writing style analysis, it's important to acknowledge certain limitations:

- limited representativeness of the dataset: Research outcomes rely on the representativeness of the input data. If the dataset fails to encompass the full spectrum of writing styles and characteristics present in digital spaces, the model's generalizability may be limited;
- static nature of analysis: The study primarily focuses on static analysis of writing styles, potentially overlooking the dynamic evolution of language models. A more proactive approach considering temporal changes could enhance the model's effectiveness;
- exclusion of multimedia elements: Fake news often includes multimedia elements (images, videos) to deceive audiences. Solely focusing on textual content analysis may restrict applicability to rich multimedia disinformation;

- human interpretation: Understanding the decision-making process of the model's outcomes requires a more detailed discussion. Exploring alternative AI methods could enhance transparency in the model's results;

- intercultural sensitivity: To improve research outcomes, it's crucial to consider intercultural differences in writing styles and linguistic characteristics fully. Adapting the model to diverse cultural contexts is essential for its global applicability.

Acknowledging these shortcomings lays the groundwork for future research or refining and expanding the proposed methodology for detecting fake news.

**The research objective.** This research aims to advance the field of detecting fake news through a complex writing style analysis. Delving into the intricate dimensions of linguistic stylistics, the study seeks to identify characteristic patterns that distinguish deceptive narratives from authentic content. Another essential objective is to contribute to a comprehensive understanding of writing styles as a powerful tool in addressing issues related to fake news in the era of digital technologies. The research is focused on developing reliable methods to differentiate between genuine and deceptive narratives based on writing style models through careful feature engineering, text vectorization, and model selection.

**The statement of basic materials.** The implementation of the proposed method is a complex approach, which by such other methods and means. To achieve the goal and test the ideas in practice, it is necessary to perform the following points: collection and preparation of data, development of a technique for distinguishing stylistic color (departure from the standard algorithm and a feature of the method), vectorization of text selection, model and its training. A detailed description of each step and evaluation of the model's performance are described below.

*Data Collection and Preparation.* The fundamental step in this scientific research involves a meticulous check and preparation of the dataset, a process crucial for building a solid foundation upon which further analysis is grounded. Choosing the appropriate dataset is paramount as it is a significant basis encompassing various writing styles and subtleties. The richness of diverse input data combined systematically aids in training the model.

The dataset chosen for the proposed method comprises a collection of textual artifacts gathered from various online sources. This ensures a representative sample encompassing diverse writing styles, tones, and contexts. Such a selection encapsulates many writing styles and texts authored by different individuals, allowing an analysis of stylistic content within the text, such as profanity, emotionally charged language, reporting lexicon, casual language, and words indicating event likelihood. This diversity is an integral part of the multifaceted language of writing. It also enables the analysis of news texts used across various online platforms, ranging from news articles to social media discourse.

The subsequent stage involves a meticulous data preparation process. It consists of systematic steps to refine the raw text corpus. Text preprocessing techniques are applied to standardize the dataset, ensuring uniformity while preserving authentic linguistic characteristics inherent in various sources. This phase involves tokenization, stemming, and lemmatization, guaranteeing a consistent and standardized representation of linguistic artifacts.

Moreover, the dataset undergoes a thorough cleansing process to mitigate the influence of stop words (known as noise) and irrelevant artifacts. Punctuation marks are unrelated, and extraneous symbols are removed, creating an appropriate environment for subsequent analyses. Overall, the preparation process results in a dataset cleansed of irrelevant information for training purposes while retaining its authentic emotional tone [7].

*Feature Engineering.* Since the research aims to recognize writing style entities, the traditional development of software functions must be altered. Based on this, specific lexical directions have been highlighted:

- **emotionally charged lexicon:** this includes words and phrases that carry a strong emotional tone, often evoking certain feelings, reactions, and moods in the reader or listener. These words can elicit positive and negative emotional responses and are frequently used to persuade, influence, or engage the audience emotionally. Examples include "heartfelt", "horrifying", "charming", "tragic", "inspiring".

- **reportage description words:** these are crucial in storytelling, dialogues, interviews, and journalistic articles; these words help attribute statements and actions to specific individuals, enriching the text and making it more appealing and informative. Examples include say, tell, ask, whisper, assert, suggest, report, explain, agree, deny.

- **probability words:** these convey uncertainty, likelihood, or probability. They often express the possibility of an event or state, creating a sense of probability or randomness. In different contexts, probability words help convey the degree of reliability or uncertainty. Examples include probable, possible, likely, maybe, perhaps, seems, might.

- **"soft swear words"** typically refer to expressions or phrases considered relatively mild or less offensive than more substantial forms of swearing. These expressions can still convey disappointment, irritation, or emphasis but are generally less vulgar or socially unacceptable. People often use soft swear words to express their feelings without explicit or harsh language. Examples of soft swear words include "darn," "nonsense," "crap," "rascal," "scoundrel," "balderdash".

The examples of words are singled out as text units, while soft swear words and profanity are usually phrases or expressions. This poses an additional challenge, requiring a focus on the nuances of syntactic complexity, discourse coherence, and semantic subtleties, aiming to comprehend the word's meaning and the essence of the expression.

A similar classification model based on linguistic features described in the article [8] already exists and can serve as a basis for development. This approach has proven effective, although the authors note the necessity to expand the dataset to include new classifications. Such expansions are proposed in this research.

*Text Vectorization.* The phase of text vectorization in this scientific research is a critical moment for accurate analysis considering the context. This transition from linguistic nuances to numerical representations requires the application of modern methods to encapsulate contextual intricacies.

The process commences with applying contextual embeddings to capture word relationships in the text. The TF-IDF algorithm generates numerical values for words while retaining an understanding of their semantics within the context in which they're used. Compared to static embeddings, this approach provides a more dynamic and contextually sensitive representation, acknowledging the importance of linguistic expression.

Often pre-trained on extensive linguistic corpora, models prove effective in encoding context within textual data, enriching the vectorization process with detailed representations of language structures.

This approach goes beyond the traditional "bag of words" paradigm, acknowledging the limitations of such methodologies in capturing language subtleties. By considering the context of words within a document, vectorization becomes a dynamic exploration of specific words or phrases and their contextual nuances, enhancing the precision of representing core language structures.

The obtained numerical word representations form the basis for subsequent analysis steps but often result in high-dimensional vectors. This occurs because they encapsulate linguistic information within the texts and complex contextual connections between words, enabling the examination of the semantic meaning of expressions and phrases.

*Model Selection and Training.* The formation of the architecture of the neural model is a critical stage. It involves designing the model's architecture and training process, considering

its interpretability and adaptability. Ensemble models form the analytical core due to their interpretability. The training process meticulously calibrates parameters, balancing accuracy and generalization without overfitting. This approach demonstrates the practical utility of models in analyzing linguistic features. The training process refrains from arbitrary optimization, focusing on preserving stylistic features in the input data and adapting to the dynamic evolution of writing styles.

The selected model is based on a hierarchical linguistic tree and a neural network that retains information about the tree. It also involves researching the differential linguistic style of fake news and truth and adopting the peculiarities of some fake news models [9]. These models create a hierarchical linguistic tree of news documents, comparing the linguistic style of each news document based on the words used by its author and how these words are recursively structured into phrases, sentences, paragraphs, and finally, the document. By integrating the hierarchical linguistic tree with the neural network, the proposed method learns and classifies representations of news documents, capturing their locally sequential and globally recursive structures, which are linguistically significant.

An essential step for the proposed algorithm is the word classification stage. A specific approach was chosen for this developmental stage to accomplish classification tasks with high accuracy without extensive computation. The combination of TF-IDF (term frequency-inverse document frequency) and the simple Naive Bayes classifier is a well-established and widely accepted solution in text classification. TF-IDF provides a means to highlight features that capture the importance of words in textual documents. Simultaneously, the Naive Bayes classifier, as a probabilistic classifier, makes predictions based on conditional probabilities of features given class labels.

The Naive Bayes classifier is a family of simple probabilistic classifiers based on the general assumption that all features are independent of each other, given a variable category, and is often used as a baseline in text classification [10].

As words acquire vector values after the computation of the TF-IDF score, they become a discrete quantity. Therefore, the Naive Bayes algorithm was applied to this word representation to execute the classification task.

In the subsequent step, the Naive Bayes classifier is trained using a training set of fake and verified news. During training, the model calculates the probability of the appearance of words in each class. These probabilities are derived from TF-IDF vectors associated with each class.

Once trained, the model can classify new documents without additional training. Initially, new documents are transformed into vectors using the TF-IDF vectorizer used during training. Then, the Naive Bayes model is employed to predict the class label for each document.

*Model Evaluation.* To evaluate the effectiveness of the model in the classification of real and fake news articles, taking into account the goal of the work, the methods of assessment Accuracy, Precision, Recall and F1 were chosen.

*Accuracy* – the accuracy of the results, compared to other studies or data sets. Calculated according to formula (1).

$$Accuracy = \frac{(True\ Positives + True\ Negatives)}{True\ Positives + False\ Positives + True\ Negative + False\ Negative} \quad (1)$$

Precision (2) measures the accuracy of optimistic predictions made by the model. It is the ratio of correctly predicted positive observations to the total number of positive observations. A high Precision score indicates a low level of false positive results.

$$Precision = \frac{True\ Positives}{True\ Positives + False\ Positives} \quad (2)$$

Recall, also known as sensitivity, measures the model's ability to find all positive instances. It is the ratio of correctly predicted positive observations to the actual positive observations.

$$Recall = \frac{True\ Positives}{True\ Positives + False\ Negatives} \tag{3}$$

The F1 score is a combination of precision and recall, and calculates (4) a balanced measure between the two, indicating the optimal mean between the precision and recall measures.

$$F_1 = 2 \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \tag{4}$$

In the context of fake news detection, Precision will help estimate the proportion of correctly identified genuine news articles among all articles that are believed to be genuine. At the same time, Recall will estimate how many genuine news articles were correctly identified out of all genuine news articles. Accuracy acts as a fundamental indicator that calculates the overall correctness of system classifications.

The classification accuracy values were calculated based on the evaluation methods described above. Building on the training results, a classification accuracy of 92% was achieved, indicating the model's ability to distinguish real news articles from fake ones. However, in this case, an essential indicator that should be considered in similar studies is the precisely defined and limited criteria for classification.

A rather high result was obtained according to the Recall assessment. Chosen input data contains more than half of the true news, but to train the model, it is necessary to select a set with more false information. Then further analysis will increase the accuracy rate of fake news recognition.

To calculate the results, the model was trained and based on it, 4 different sets of news from different sources were analyzed: social networks Facebook and X, verified news databases EUvsDisinfo, ZaboronaMedia. The total sample size is 5,000 news items. All news are verified by journalists and marked as "true" or "fake", where 3,750 of them are fake, the rest are true. The results of the classification of the proposed approach compared to news brands from fact-checkers are shown in Table 1.

Table 1. Obtained results of binary classification

| Result             | True positive | True negative | False positive | False negative |
|--------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| Number of entities | 3150          | 1050          | 200            | 600            |

In accordance with the above-described evaluation method, the following indicators were calculated:

- $Accuracy = \frac{3150 + 1050}{5000} = 0.84$  or 84 %;
- $Precision = \frac{3150}{3150 + 200} = 0.94$  or 94 %;
- $Recall = \frac{3150}{3150 + 600} = 0.84$  or 84 %;
- $F_1 = 2 \frac{0.94 \cdot 0.84}{0.94 + 0.84} = 0.88$  or 88 %.

Thus, the value of the accuracy of the classification Accuracy and the F1 indicator were calculated. Based on the results of the model's training, a classification accuracy of 84 % was achieved, which indicates the ability of the model to distinguish real news articles from fake ones. Although in this case it is also important for accuracy, an important indicator that should not be neglected in similar studies is precisely defined and limited classification criteria.

To justify the proposed method of recognizing fake news by written style, a number of experiments were conducted. The obtained results showed that the amount of light swearing and obscene

expressions, emotionally colored words, words of probability make up a larger percentage of the text in fake news, compared to true ones. However, the words to describe the reports are a smaller share. The percentage of such groups of words in news texts is shown in Table 2.

Table 2. Presence of a certain group of words in true and fake news in percentage

| Type of emotionally colored words | Real news, % | Fake news, % |
|-----------------------------------|--------------|--------------|
| Mild curses                       | 7            | 12           |
| Emotional words                   | 36           | 55           |
| Profanity                         | 3            | 8            |
| Reporting Words                   | 23           | 17           |
| Probabilistic Words               | 10           | 26           |

For visual representation of the influence of emotionally colored words on the contextual content of the text of fake news, a graph of the percentage ratio of a certain group of words in false or manipulated and true texts is plotted. It is shown in Figure 1.

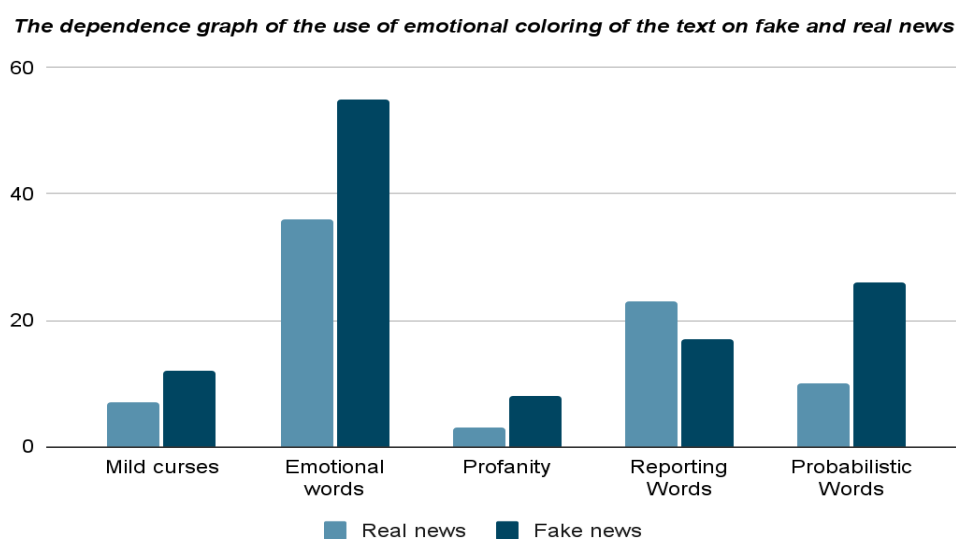


Fig. 1. Comparison of the percentage content of emotionally colored words in the news text.

The graph shows that fake news contains a significantly higher percentage of emotional, probabilistic words, light taunts, and profanity. However, directive words are used less frequently. Typically, authors of fake news try to refrain from concluding less often. Thus, they encourage readers to make subjective or inaccurate conclusions.

**Conclusions.** The research aims to distinguish fake news from genuine news through writing style analysis. Traditional fact-checking methods often overlook linguistic nuances in texts that conceal deceptive narratives. Thus, this study delves into the detailed stylistic features of specific language expressions, such as emotionally charged words, profanity, probabilistic terms, and reports. A carefully curated dataset represented diverse linguistic shades prevalent in the digital space. Preprocessing methods were meticulously chosen to ensure dataset standardization while preserving its internal diversity.

This work represents a significant step towards developing reliable methods to detect fake news using writing style analysis. It explores intricate dimensions of linguistic expression and highlights the critical role of function development, text vectorization, model selection, and teaching the differentiation between deceptive narratives and truthful content.

The results indicate a high classification accuracy of 92 %, demonstrating the model's effectiveness in recognizing real and fake news articles based on writing style. The obtained results were analyzed for the presence of a certain group of words in the news texts and presented as a percentage. The findings reveal that fake news contains a higher occurrence of emotionally



charged words, probabilistic terms, and profanity. Moreover, words indicating reports or journalism are used less frequently, often avoiding explicit conclusions, prompting readers to form conclusions and subjectively interpret events.

The research underscores the importance of a nuanced understanding of writing styles as a potent tool in combating fake news issues in the digital era. The findings provide a foundation for future advancements in this field, pointing towards avenues for studying multimodal analysis, deep learning architectures, contextual analysis, user behavior, cross-lingual detection, source verification, real-time analysis, ethical considerations, and educational and informational initiatives.

Therefore, this work contributes to ongoing efforts to mitigate the impact of fake news in society by understanding linguistic nuances prevalent in deceptive narratives. It successfully enhances the precision of fake news detection systems and broadens the identification methods of misleading information. Thus, the research goal can be achieved. This work forms a crucial foundation for future developments aimed at combating the spread of misinformation and upholding the integrity of digital information systems.

### References

1. Shu, K., Sliva, A., Wang, S., Tang, J., & Liu, H. (2017). Fake news detection on social media: A data mining perspective. *ACM SIGKDD explorations newsletter*, 19(1), 22-36.
2. Zhou, X., Jain, A., Phoha, V. V., & Zafarani, R. (2020). Fake news early detection: A theory-driven model. *Digital Threats: Research and Practice*, 1(2), 1-25.
3. Zhou, X., & Zafarani, R. (2020). A survey of fake news: Fundamental theories, detection methods, and opportunities. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 53(5), 1-40.
4. Schmidt, A., & Wiegand, M. (2017, April). A survey on hate speech detection using natural language processing. In *Proceedings of the fifth international workshop on natural language processing for social media* (pp. 1-10).
5. Przybyla, P. (2020, April). Capturing the style of fake news. In *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*. (Vol. 34, No. 01), (pp. 490-497).
6. L. Mishchenko, I. Klymenko. (February, 2023). Method For Detecting Fake News Based On Natural Language Processing. *The VI International Scientific and Practical Conference «Modern ways of solving the problems of science in the world»*. (pp. 375-378). Warsaw, Poland.
7. Caihong, Z. (2022). Quantitative Evaluation of Vocabulary Emotional Color in Language Teaching. *Occupational Therapy International*. <https://www.hindawi.com/journals/oti/2022/5203122/>.
8. Pathak, A., & Srihari, R. K. (2019, July). BREAKING! presenting fake news corpus for automated fact checking. In *Proceedings of the 57th annual meeting of the association for computational linguistics: student research workshop*. (pp. 357-362).
9. Zhou, X., Li, J., Li, Q., & Zafarani, R. (2023). *Linguistic-style-aware Neural Networks for Fake News Detection*. arXiv preprint arXiv:2301.02792.
10. Xu, S. (2018). Bayesian Naïve Bayes classifiers to text classification. *Journal of Information Science*, 44(1), 48-59.

Отримано 01.12.2023

УДК 004.02

**Людмила Міщенко<sup>1</sup>, Ірина Клименко<sup>2</sup>,**

<sup>1</sup>аспірантка кафедри обчислювальної техніки

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", (Київ, Україна)

**E-mail:** [liudamishchenko@gmail.com](mailto:liudamishchenko@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5101-2517>

<sup>2</sup>професор, доктор технічних наук кафедри обчислювальної техніки

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", (Київ, Україна)

**E-mail:** [ikliryna@gmail.com](mailto:ikliryna@gmail.com). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5345-8806>

### МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ФЕЙКОВИХ НОВИН ЗА СТИЛЕМ НАПИСАННЯ

У сучасну цифрову епоху відрізнити правду від дезінформації є складною проблемою, а фейкові новини, становлять значну загрозу можливості маніпуляції думкою суспільства. Традиційні методи перевірки фактів рідко звертають увагу на емоційне мовне забарвлення, властивими оманливому вмісту. Це дослідження націлене на розробку підходу до виявлення фейкових новин шляхом аналізу стилю написання у поєднанні з обробкою природної мови.

Базуючись на різноманітному наборі даних, у дослідженні розглянуто різні лінгвістичні аспекти, з особливим акцентом на попередній обробці та розробці функцій. На відміну від традиційних методів, цей багатовимірний підхід спрямований на розкриття нюансів у стилі написання як справжніх, так і фейкових новинних статей.

Дослідження передбачає ретельну підготовку та обробку вхідного набору даних, розробку функцій, зосереджуючись на ключових лінгвістичних елементах, таких як емоційно забарвлена лексика, звітні слова, ймовірнісні слова, легкі лайки та нецензурна лексика. Завдяки ретельному аналізу таких груп слів дослідження спрямоване на виявлення характерних моделей стилю написання фейкових новин, сприяючи розробці надійних механізмів їх виявлення.

Процес оцінювання ретельно перевіряє точність розпізнавання справжніх та фейкові статті новин запропонованим способом на основі визначених стилів написання. Результати підтверджують доволі високу точність підходу та здатність виявляти відмінності в лінгвістичних особливостях написання новин.

Це дослідження впливає на підвищення точності виявлення фейкових новин за допомогою аналізу стилю написання. Поєднуючи ретельну перевірку набору даних, передові методи попередньої обробки та комплексну розробку функцій, дослідження сприяє боротьбі з дезінформацією в епоху цифрових технологій. Такий підхід доповнює уже існуючі методи та робить їх більш комплексним для розпізнавання фейкових новин. Це демонструє його потенціал для підвищення медіаграмотності, захисту демократичних процесів, коли дезінформація становить серйозну проблему для цілісності інформації.

**Ключові слова:** фейкові новини; справжні новини; аналіз стилю письма; емоційно забарвлені слова; емоційна мова; ймовірнісні слова; виявлення ненормативної лексики.

Табл.: 2. Рис.: 1. Бібл.: 10.

**Анатолій Борода<sup>1</sup>, Тарас Петренко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, головний науковий співробітник науково-дослідного відділу науково-дослідного центру Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації (Київ, Україна)

E-mail: [anv\\_boroda@ukr.net](mailto:anv_boroda@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9302-8297>. ResearcherID: [JRX-2757-2023](https://orcid.org/0009-0007-9302-8297)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та математичного моделювання

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [mail\\_taras@stu.cn.ua](mailto:mail_taras@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5571-3815>. ResearcherID: [G-5801-2014](https://orcid.org/0000-0001-5571-3815)

**ВПЛИВ АТАК ЗА ПОБІЧНИМИ КАНАЛАМИ НА ІНФОРМАЦІЙНУ БЕЗПЕКУ**

Усім відомо, що для того, щоб криптографічна система забезпечувала безпеку інформації необхідно, щоб секретні ключі, які використовуються в криптографічних алгоритмах, залишалися секретними за будь-яких обставин. Проте на практиці реалізація та експлуатація криптографічних механізмів безпеки ніколи не забезпечує «ідеального» захисту інформації. Однією з вразливостей цих систем є незахищеність криптографічних модулів від з атак за побічними каналами, яка завжди буде серйозною загрозою безпеці криптографічних модулів та, як наслідок, інформаційній безпеці обчислювальних і комунікаційних систем. Тому під час реалізації криптографічних механізмів захисту повинні оцінюватися всі можливості таких атак і враховуватися всі аспекти їх застосування.

Метою статті є дослідження атак за побічними каналами на реалізації механізмів криптозахисту, аналіз особливостей їх реалізації та огляд механізмів забезпечення інформаційної безпеки під час деструктивних впливів цих атак. У роботі розглядається один із практичних напрямів криптоаналізу – атаки за побічними каналами на реалізації механізмів криптозахисту. Досліджуються відмінності між теоретичним криптоаналізом і атаками за побічними каналами. Аналізуються можливості атак за побічними каналами та особливості виконання атак з ін'єкції збоїв. Розглядаються особливості забезпечення інформаційної безпеки механізмів криптозахисту стосовно атак за побічними каналами. Доводиться необхідність врахування загрози цих атак при забезпеченні інформаційної безпеки обчислювальних і комунікаційних систем.

**Ключові слова:** атаки за побічними каналами; криптосистема; інформаційна безпека.

Рис.: 2. Бібл.: 19.

**Актуальність теми дослідження.** Важливим завданням при побудові обчислювальних і комунікаційних систем є забезпечення їх інформаційної безпеки. Будівельними блоками механізмів безпеки, заснованих на криптографії, є криптографічні примітиви<sup>1</sup>, а саме криптографічні алгоритми – симетричні шифри, шифри з відкритим ключем та хеш-функції, які використовуються для реалізації необхідних функцій механізму безпеки. З погляду теоретичної криптографії не важливо, як ці примітиви будуть реалізовані – за допомогою програмного забезпечення, що виконується на звичайному комп'ютері, або в окремому спеціалізованому пристрої (криптографічному модулі, шифраторі), і т. ін. Тому в процесі теоретичного криптоаналізу криптосистем і протоколів безпеки спосіб реалізації не враховується. Але передбачається, що реалізація криптографічних примітивів задовольняє специфічним вимогам, а саме, що виконання криптографічних операцій (операцій з секретним ключем) відбувається всередині ідеального «чорного ящика», який забезпечує повну ізоляцію обчислювальних процесів, що в ньому відбуваються, від зовнішнього середовища. Тобто, неможливо отримати будь-яку інформацію про ці процеси, або зробити на них який-небудь вплив. Зважаючи на ці припущення, у теоретичній криптографії рівень безпеки оцінюється, з огляду на математичні властивості криптографічних алгоритмів і розмірів їхніх ключів.

Для того, щоб криптографічна система забезпечувала безпеку інформації необхідно, щоб секретні ключі, які використовуються в криптографічних алгоритмах реалізації безпеки, залишалися секретними (не були розкриті) при будь-яких обставинах. Самі криптографічні алгоритми, перш ніж вони будуть використовуватися в реальних криптосистемах, протягом довгого часу вивчаються великою кількістю

<sup>1</sup> Найнижчий рівень криптосистеми. Це найменші «цеглинки», або деталі, з яких вона може бути складена. Джерелом примітивів є математичні проблеми, що важко розв'язуються, (наприклад, проблема дискретного логарифма може слугувати основою односпрямованої функції) і спеціально створені конструкції (блокові шифри, хеш-функції).

експертів з метою виявлення вразливостей, і якщо такі вразливості не були виявлені – можуть вважатися досить надійними. Тому зловмисники швидше будуть намагатися атакувати ту частину криптосистеми, – так званий «криптографічний модуль», що реалізує криптографічні алгоритми.

**Постановка проблеми.** Навіть у повністю ізольованих від зовнішніх впливів системах, практичне застосування будь-яких криптографічних алгоритмів не забезпечує досконалий захист від несанкціонованого доступу як до зашифрованих даних, так і до інформації про суб'єктів обміну цими даними. Криптографічні алгоритми реалізуються програмно або апаратно деяким фізичним пристроєм, який у процесі роботи може взаємодіяти з іншими компонентами криптосистеми і з навколишнім середовищем, здійснюючи на них певний вплив, який може бути зафіксований ззовні. Ці взаємодії можуть контролюватися зловмисником і давати йому деяку інформацію, корисну для криптоаналізу. Така інформація називається побічною інформацією, а сам тип криптоаналітичних атак з використанням побічної інформації називається атаками за побічними каналами.

Такі атаки можуть використовуватися для несанкціонованого доступу до пам'яті криптографічного обладнання, де зберігається ключ-модифікатор алгоритму, який програмується виробником обладнання, є секретним і тільки йому відомим. За наявністю цього ключа (або алгоритму його генерації) у деяких випадках надалі можливе подолання криптозахисту інформаційних систем методами теоретичного криптоаналізу. З іншого боку, за допомогою атак за побічними каналами можливе відновлення невідомих фрагментів криптопротоколів та протоколів комунікаційного обладнання, знання яких надає можливість отримання доступу до інформації, що передається.

Саме тому атаки за побічними каналами є серйозною загрозою безпеці криптографічних модулів та, як наслідок, – інформаційній безпеці обчислювальних і комунікаційних систем. Тому при реалізації механізмів захисту повинні оцінюватися всі можливості таких атак і враховуватися всі аспекти їх застосування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Перша інформація щодо застосування атаки за побічними каналами сходить до 1965 року [1]. У цьому році підрозділ британської розвідки MI5 намагався розкрити шифр єгипетського посольства в Лондоні, але ці зусилля не мали успіху через недостатність обчислювального ресурсу. Тоді було запропоновано таємно розмістити мікрофон поруч з ротором єгипетської електромеханічної шифромашини, щоб вловлювати звуки, які вона видавала. Прослуховуючи клацання роторів при скиданні їх шифрувальником щоранку в початкове положення, в MI5 успішно визначали початкові положення 2 або 3 роторів шифромашини. Ця додаткова інформація зменшувала обсяг обчислень, необхідних для розкриття шифру, внаслідок чого MI5 могла читати листування посольства протягом багатьох років.

Подібні атаки були відомі і застосовувалися ще в 1980-х роках, проте широке поширення атаки за побічними каналами отримали після публікації результатів криптоаналітика Пола Кохера в 1996 році [1]. Розроблений ним цілий клас атак базувався на тому, що є певна кореляція між результатами фізичних вимірювань деяких параметрів криптосистеми в різні моменти часу та процесом виконання в криптографічному модулі обчислень за участю секретних ключів. На отриманих Полом Кохером результатах ґрунтується багато піонерських ідей інших криптоаналітиків, які наукове співтовариство у сфері публічної криптографії відносить до атак за побічними каналами.

Відтоді атаками за побічними каналами називається клас криптоаналітичних атак, спрямований на використання тих чи інших вразливостей у практичній реалізації криптосистеми.

За способом використання побічних каналів атаки розділяються на дві категорії:

- 1) Пасивні: виконується лише аналіз поведінки цільового пристрою, наприклад:
  - відстежується час виконання пристроєм (криптографічних) операцій;
  - вимірюється споживання потужності;
  - реєструється електромагнітне випромінювання.

Ця категорія має назву SCA-атак (Side Channel Analysis Attacks).

- 2) Активні: націлені на змінювання поведінки пристрою за допомогою:
  - збоїв живлення та тактової синхронізації;
  - потужних електромагнітних імпульсів;
  - лазерних імпульсів різної частоти та інтенсивності.

Друга категорія зветься атаками з ін'єкції збоїв або FI (Fault Injection) атаками.

Сьогодні фахівцями з криптографічного захисту інформації досліджено багато типів атак побічними каналами та виокремлені загальні методи захисту від їх успішної реалізації.

Так, у 2008 р. було продемонстровано, як атаки типу DPA можна використовувати для відновлення ключів криптосистеми на RFID-картах. Зловмисники могли аналізувати енергоспоживання пристрою під час виконання операцій та використовувати цю інформацію для отримання секретних ключів [9]. Уже у 2013 р. дослідники провели експериментальну таймінг-атаку на Hash-based Message Authentication Code (HMAC), який використовується для перевірки цілісності повідомлень. Вони використовували варіації в часі виконання алгоритму HMAC для отримання секретного ключа. У 2018 р. були досліджені атаки на ECC-пам'ять апаратних криптосистем та виокремлені особливості захисту від них [17].

Проте, закономірно, із вдосконаленням атак постійно змінюються і заходи та механізми, призначені до їхньої протидії. Виробники вбудованих чипів і постачальники смарт-карток усвідомлюють загрози, які створює розробка і впровадження все більш досконалих атак за побічними каналами, і у відповідь реалізують комбінації контрзаходів, при цьому найбезпечніші смарткарти повинні містити поєднання апаратних і програмних функцій безпеки.

Звичайно, кожен контрзахід має свою ціну. Основні компроміси полягають у вартості виробництва апаратних систем захисту, їхньої продуктивності порівняно з програмними криптосистемами та їх стійкості до атак за побічними каналами. Ефективного захисту не можливо досягти на основі дешевих рішень. Тому сьогодні реально застосовні контрзаходи мають на меті зробити атаки за побічними каналами на криптографічні системи економічно не вигідними, але не можуть їм запобігти загалом.

Разом з тим, останні публікації в області аналізу побічних каналів свідчать про те, що найбільшої ефективності досягли активні атаки з ін'єкції збоїв. У деяких випадках ці атаки дозволяють відновлювати секретні ключі на основі мінімальної інформації про поведінку цільового пристрою: іноді достатньо взнавати, як пристрій спрацював у результаті ін'єкції збоїв – правильно чи ні.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Нині у роботах вітчизняних та закордонних учених недостатньо уваги приділяється тим загрозам, що становлять для інформаційних та телекомунікаційних систем активні атаки за побічними каналами, які потребують розробки специфічних заходів протидії, і це не дозволяє повною мірою захиститися від існуючих атак цієї категорії, а також передбачати заходи щодо пом'якшення наслідків від подібних перспективних атак.

**Мета статті.** Ця стаття розглядає методи і прийоми, які використовуються в атаках за побічними каналами, дані щодо можливостей таких атак, стандартизовані підходи до тестування та оцінки механізмів безпеки. Обґрунтовується важливість розуміння методів та практичних можливостей атак за побічними каналами для забезпечення інформаційної безпеки в сучасних умовах.

**Виклад основного матеріалу.** Основна ідея атак за побічними каналами полягає в тому, щоб здійснювати спостереження за процесом обробки даних при виконанні криптографічного алгоритму й намагатися застосувати отриману таким чином побічну інформацію для послаблення стійкості механізмів безпеки.

1) **1. Відмінності між теоретичним криптоаналізом і атаками за побічними каналами [2].** Криптографічний примітив можна розглядати як мінімум із двох точок зору: з одного боку, його можна розглядати як абстрактний математичний об'єкт (перетворення, можливо параметризоване ключем, що перетворює деякі вхідні дані в деякі вихідні); з іншого боку, цей примітив реалізується належною програмою, яка виконується на певному процесорі, в конкретному обладнанні і, отже, буде мати конкретні характеристики. Перший погляд являє собою підхід з боку «класичного» криптоаналізу; а інший – з боку SCA-аналізу. Криптоаналіз за побічними каналами використовує конкретні характеристики реалізації криптографічного примітиву для відновлення секретних параметрів, які беруть участь у перетворенні. Методи SCA-аналізу є менш загальними, оскільки часто прив'язані до конкретної реалізації, але часто набагато більш потужними, ніж класичний криптоаналіз, і тому дуже серйозно розглядаються розробниками криптографічних пристроїв.

У багатьох випадках SCA-атаки можуть бути значно ефективніші, ніж криптоаналітичні атаки, які базуються на звичайних методах математичного аналізу, і такі SCA-атаки набагато практичніше здійснювати. Під час аналізу протоколу шифрувального пристрою або його програмного забезпечення, можна застосовувати певні формальні методи для моделювання роботи пристрою, щоб змодельовати вплив на нього ворожих дій противника й оцінити наскільки правильно, незважаючи на це, забезпечується функціонування пристрою. Таким чином можна отримати деяке уявлення про те, що в межах такої абстрактної моделі пристрій може протистояти ворожим атакам.

У традиційному криптоаналізі, при оцінці безпеки криптографічного протоколу переважно передбачається, що противник має повний опис протоколу, має у своєму розпорядженні всі відкриті ключі, і тільки не вистачає знання секретних ключів. Крім того, противник може перехопити деякі дані, що передаються між легальними учасниками шифрованого листування, і навіть може мати деякий контроль над природою цих даних (наприклад, шляхом вибору повідомлень в атаці на цифровий підпис методом селекції повідомлень, або шляхом вибору шифртексту в атаці на схему шифрування з відкритим ключем методом селекції шифртексту). Противник намагається розкрити криптопротокол або шляхом обернення того важкооборотного перетворення, що лежить у його основі, або використовуючи якусь ваду в побудові криптопротоколу.

У цьому випадку математична абстракція може бути дуже корисним інструментом у дослідженні криптографічних примітивів. Криптографи часто оцінюють безпеку шифрів, розглядаючи їх як математичні функції, які використовуються в ситуації, аналогічній наведеної на рис. 1.

Традиційно, надійні криптографічні алгоритми забезпечують безпеку проти супротивника, по відношенню до якого відповідне шифробладнання має властивості «чорного ящика», тобто забезпечує неможливість доступу до будь-якої інформації, пов'язаної з секретними даними учасників шифрованого листування. Однак такі моделі не завжди адекватні. Зокрема, безпека криптоалгоритму може бути зламана при можливості атак, які здійснюють крадіжку або підробку секретного ключа.

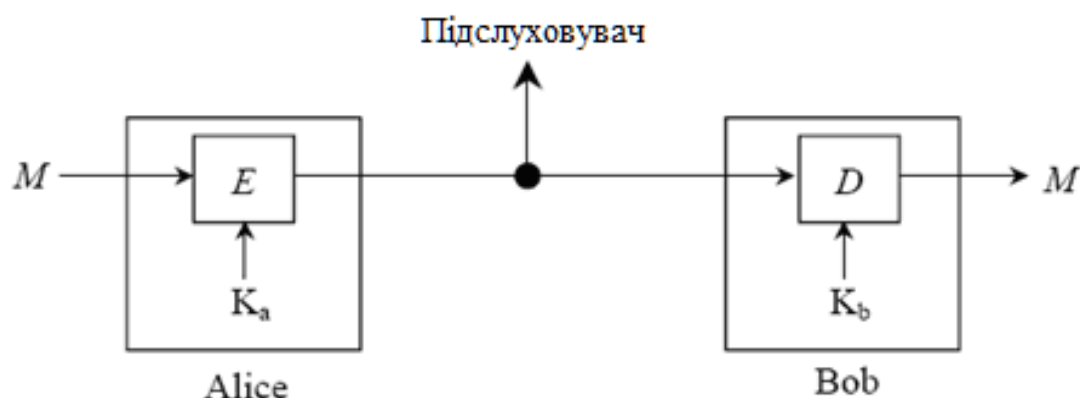


Рис. 1. Сценарій теоретичного криптоаналізу

Атаки, що розглядаються в цій традиційній криптографічній моделі, використовують математичні специфікації криптопротоколів.

Однак, якщо переходити від абстрактного поняття безпеки до її конкретного забезпечення в реальному фізичному світі, усе стає складніше. Безліч реальних нюансів, які абстрактна модель не враховує, стають значущими. Яка конструкція корпусу цього конкретного криптографічного пристрою? Які вихідні дані з пристрою противник може спостерігати, і якими вхідними даними противник може маніпулювати, щоб впливати на пристрій? У загальному випадку на ці питання важко відповісти, але при проектуванні архітектури пристрою, що забезпечує захист від SCA-атак, обов'язковою є формулювання таких відповідей.

Крім того, часто фізичні процеси обчислень у процесі виконання криптоалгоритму можуть призводити до певних ефектів, які зможе спостерігати супротивник, і ці спостереження можуть іноді відображати чутливі внутрішні дані, які не повинні виходити за межі захищеного криптографічного модуля. Такий тип атак називають також аналізом за побічними каналами, так як у цьому випадку витіки інформації з модуля або пристрою відбуваються по інших каналах, на відміну від основних інтерфейсів призначених для обміну інформацією.

Здійснюючи фізичний напад на криптографічний пристрій, супротивник сподівається якимось чином підірвати його захисні властивості, зазвичай, витягуючи деякий секрет, який цей пристрій не повинен був розкривати. На перший погляд, природним шляхом досягнення цієї мети є прямий підхід: необхідно якимось чином обійти захист криптографічного пристрою і прочитати ці дані. Але такі атаки прямого типу можуть бути легко зірвані за допомогою застосування технологій захисту від несанкціонованого доступу (tamper-resistant) під час практичного проектування криптографічного пристрою. Хоча цей прямий підхід часто може виявитися досить успішним, більш вірним є використання сімейства витончених непрямих підходів, у ході яких противник замість прямого втручання намагається викликати помилку у функціонуванні пристрою через деякі фізичні несправності, і якщо, не дивлячись на помилку, модуль продовжить працювати, він може в кінцевому підсумку розкрити досить інформації для відновлення супротивником секрету.

Останніми роками дослідники дедалі більше усвідомлюють можливість атак, що використовують специфічні властивості реалізації і конкретного обладнання (рис. 2).

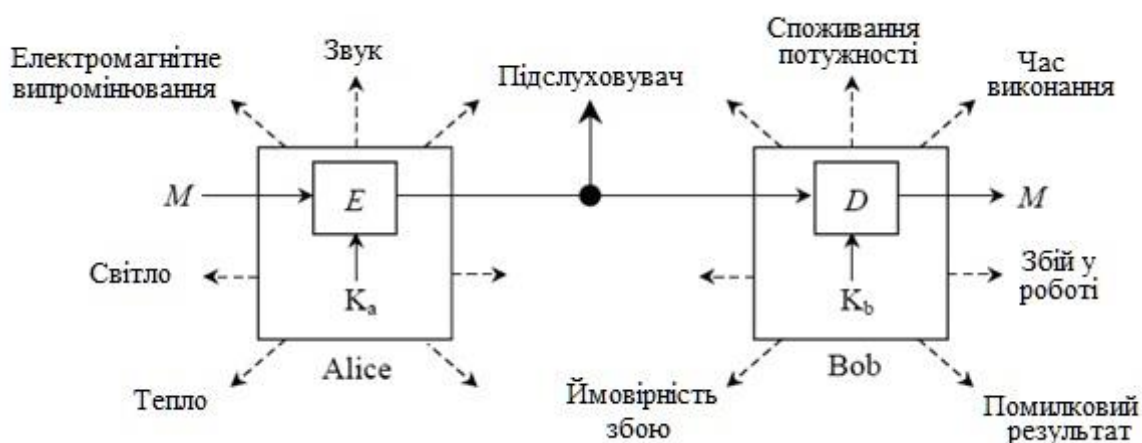


Рис. 2. Сценарій атаки, який включає використання побічних каналів

Такі SCA-атаки використовують деякий витік інформації в процесі виконання цього криптопротоколу і не враховуються в традиційних моделях безпеки. Наприклад, супротивник може бути в змозі контролювати споживану потужність або електромагнітне випромінювання, що генерується смарт-карткою під час виконання операцій з секретним ключем, таких як розшифрування і генерація підпису. Супротивник може також бути в змозі визначати час, що витрачається на виконання криптографічних операцій, або проаналізувати, як веде себе криптографічний пристрій при виникненні деяких збоїв. На практиці, побічна інформація може бути досить легко отримана, і тому важливо, щоб загроза SCA-атак була визначена кількісно при оцінці загальної безпеки системи в межах сценарію, представленого на рис. 2.

Відповідно до можливостей зловмисника в обох сценаріях, основні відмінності зазначених класів атак формуються таким чином (табл. 1).

Таблиця 1 – Відмінності основних класів атак

| Теоретичний криптоаналіз                                                                                                                                                                            | SCA-атаки                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Криптопримітиви розглядаються як абстрактні математичні об'єкти: передбачається, що вони реалізуються всередині ідеального «чорного ящика», що забезпечує повну ізоляцію від зовнішнього середовища | Використовують інформацію про фізичні процеси в шифраторі, які не розглядаються в теоретичному описі криптографічного алгоритму. Важлива специфіка реалізації криптопримітивів: у програмі, на конкретному процесорі й т. ін. |
| Має велику загальність (не залежить від конкретної реалізації)                                                                                                                                      | Мають меншу загальність, але в багатьох випадках можуть бути значно ефективнішими                                                                                                                                             |
| Криптопримітиви обираються таким чином, щоб обчислювальна складність визначення їхніх секретних параметрів була максимальною                                                                        | Поряд із побічними каналами, зумовленими специфікою реалізації криптосистеми, можливо цільове створення побічних каналів                                                                                                      |
| Рівень безпеки криптосистеми оцінюється, з огляду на математичні властивості криптографічних алгоритмів і розмірів їхніх ключів                                                                     | Рівень безпеки криптосистеми визначається тим, наскільки її реалізація відповідає характеристикам ідеального «чорного ящика»                                                                                                  |

Джерело: систематизовано авторами.

**2. Можливості атак за побічними каналами.** Бурхливий розвиток методів та практики SCA-атак у 90-х роках ХХ століття і на початку ХХІ століття виявив, що в багатьох випадках зловмисникам недоцільно намагатися подолати обчислювальну складність злому криптографічних примітивів, які використовуються в механізмах інформаційної безпеки, а вигідніше атакувати те обладнання криптосистеми (криптографічний модуль), де реалізовані криптографічні алгоритми.



При певних умовах SCA-атаки можуть бути значно ефективніші, ніж криптоаналітичні атаки, які базуються на звичайних методах математичного аналізу, і такі SCA-атаки набагато простіше реалізувати.

Стосовно SCA-атак, заснованих на вимірюванні часу виконання криптографічних операцій, досягнуто такі практичні показники [3]:

- для розкриття ключа алгоритму RSA (в режимі реалізації Монтгомері) довжиною 512 біт потребується від 5000 до 10000 вимірювань,
- ключ алгоритму RC5 можливо розкрити приблизно за  $10^6$  вимірювань,
- розкриття ключа алгоритму AES потребує порядку  $4 \cdot 10^3$  вимірювань часу виконання певних процедур цього алгоритму.

За подібними показниками можливо реалізувати практичні атаки по часу також на алгоритми DES, IDEA та Open SSL [1].

Розроблено численні методи аналізу побічних каналів, які передбачають певну форму обробки цифрового сигналу та статистичні обчислення. Деякі з найважливіших методів включають простий аналіз потужності (SPA) [6], диференційний аналіз потужності (DPA) і кореляційний аналіз потужності (CPA).

Техніка SPA передбачає, що аналітик має на меті реконструювати секретний ключ, використовуючи лише одне трасування сигналу побічного каналу, і часто використовується різниця в базових операціях з елементами ключа, таких як подвійне додавання або додавання та множення. Проте SPA неможливий, якщо відношення сигнал/шум (SNR) недостатньо високе. У більшості випадків розроблені контрзаходи роблять SPA марним.

Методи DPA базуються на оцінці багатьох трасувань роботи цільового алгоритму із різними вхідними даними [6]. На їх основі може виконуватися атака, яка перевіряє гіпотези щодо елементів підключів для частини алгоритму (за методом «розділай і володарюй»). Для DPA використовується велика кількість трасувань, щоб зменшити шум шляхом усереднення, і зазвичай застосовується однорозрядна модель потужності.

За певних умов застосування цих атак до алгоритму DES дозволяє розкривати як раундові ключі, так і невідомі бітові перестановки [3]. Для інших криптоалгоритмів можливо визначення операндів в операціях порівняння і множення, а також невідомого показника в операції обчислення модульної експоненти [3]. Поєднання таких атак з диференційним аналізом результатів вимірювань дозволяє проводити реверс-інжиніринг, тобто відновлення невідомих фрагментів криптоалгоритмів [3].

Іншим методом є кореляційний аналіз потужності (CPA), який застосовує багатобітну модель споживання потужності для зменшення впливу шуму на можливість виконання успішної атаки. Основна відмінність між цими двома методами полягає в тому, що DPA базується на обчисленні різниці між двома наборами трасувань, тоді як CPA використовує коефіцієнт кореляції для обчислення тесту залежності витоку даних про елементи секретного ключа від поведінки певних ознак у трасуваннях споживання потужності [7].

Вищевказані три методи атак за побічними каналами використовуються щодо широкого спектру криптографічних реалізацій.

Ще більш ефективними ніж DPA і CPA є атаки за шаблоном (Template Attacks – TA) [8], але вони вимагають етапу профілювання, тобто кроку, під час якого криптографічне обладнання знаходиться під повним контролем аналітика, щоб оцінити розподіл ймовірностей витоку інформації та краще використовувати всю інформацію, присутню в кожному трасуванні [8]. Етап профілювання може надати більш реальну статистичну модель процесів, які відбуваються під час роботи пристрою, замість використання якоїсь апріорної моделі. TA є найкращою (оптимальною) технікою з інформаційно-теоретичної точки зору, якщо аналітик має необмежену кількість трасувань, а розподіл шуму слідує закону Гаусса [9; 10].

Далі криптоаналітики з'ясували певні недоліки атак за шаблоном і спробували змінити їх, щоб краще впоратися з проблемами складності цих атак та їх переносу на інші реалізації. Прикладом такого підходу є атака за об'єднаним шаблоном, де використовується лише одна об'єднана коваріаційна матриця, щоб впоратися зі статистичними труднощами [11].

Крім таких спроб, спільнота криптоаналітиків з SCA виявила, що подібний підхід до профілювання використовується в інших сферах у формі керованого машинного навчання. Тому деякі дослідники почали експериментувати з різними методами машинного навчання (ML) і оцінювати їхню ефективність у контексті SCA. Розгляд різних сценаріїв та різних методів ML націлені на встановлення випадків використання, коли методи ML можуть перевершити атаку за шаблоном та стати найкращим вибором для етапу профілювання в SCA. Зокрема, у спільноті SCA показана актуальність методів глибокого навчання (DL), за допомогою яких отримуються значні результати в аналізі побічних каналів, навіть за наявності контрзаходів.

**3. Особливості виконання атак з ін'єкції збоїв.** Атаки з ін'єкції збоїв (або збурень) передбачають активне маніпулювання чипом криптомодуля, щоб викликати тимчасову помилку під час виконання певного процесу. Мета полягає в тому, щоб обійти захист її конфіденційних активів. Наприклад, помилка може дозволити обійти перевірку умов безпеки, як-от перевірку правильності PIN-коду.

Є кілька методів викликання збоїв при обчисленнях. За допомогою неінвазивних атак можливо виконання збоїв тактових імпульсів або напруги живлення [12]. Смарткартки користуються зовнішнім джерелом живлення і тактових імпульсів. В обох цих випадках при застосуванні параметрів живлення та частоти імпульсів поза межами робочих діапазонів можуть виникати збої в процесах, які виконуються на картці.

Під час повністю інвазивних атак відбувається активна інжекція дефекту за допомогою мікрозондування [13]. Для цього потрібно певним чином підготувати чип: декапсулювати чип, зняти шар пасивації та обійти екранування. Хоча таке можливо, але це дуже трудомісткий процес [14]. Через вартість цього методу та необхідних інструментів – це не вважається практичним шляхом атаки.

Проте ін'єкція оптичного збою вимагає лише мінімальної підготовки чипу: потрібно отримати доступ до передньої або задньої сторони чипу. Це можна зробити шляхом декапсуляції або видалення контактної панелі смарткартки. Для новітніх захищених мікроконтролерів вартість зростає через вищі вимоги до точності таких маніпуляцій. Однак, з точки зору витрат часу і грошових витрат, це все ще цілком можливо для достатньо оснащеного аналітика.

**а) Збурення напруги живлення та тактової синхронізації.** При збуренні тактової синхронізації пристрою його робота тимчасово прискорюється шляхом введення одного або кількох коротких імпульсів, що подаються на смарткарту від зовнішнього генератора. Це призводить до можливого внесення помилки у виконання інструкції. Наприклад, коли ЦП зчитує під час збою комірку пам'яті, то результат може бути зчитаний до того, як дані стануть стабільними на шині пам'яті. Це призводить до отримання неправильного значення. Подібним чином збій напруги живлення під час виконання інструкції читання може призвести до зчитування неправильних значень із пам'яті.

Інший ефект, який може виникнути, полягає в тому, що інструкція вибирається з пам'яті, але її виконання не завершується: пришвидшення тактових імпульсів може викликати наступну інструкцію, яка вже вибрана з пам'яті.

**б) Ін'єкція оптичних збоїв.** Оптичні збої виникають під впливом сильного джерела світла, наприклад, фотоспалаху або лазерного променя [15]. Оскільки напівпровідники за своєю природою чутливі до світла, можна перемикає транзистори за допомогою

оптичного імпульсу. Використовуючи прецизійну платформу позиціонування і сфокусований лазерний промінь, можна точно націлитися на певні ділянки мікросхеми. Хоча це створює додаткові труднощі стосовно двовимірного пошуку (координат X і Y) потрібної ділянки, це дозволяє дуже конкретно зосередитися, наприклад, на декодери пам'яті, ЦП або компонентах криптографічного алгоритму. Таким чином можна уникати спрацювання механізмів протидії втручанням у роботу чипу, заснованих на використанні в мікросхемі світлочутливих елементів. У цьому сенсі розмір плями та довжина хвилі фотонів є також важливими параметрами.

З погляду підготовки кристал чипа повинен бути оптично експонований (оголений, доступний для оптичного впливу). Передня сторона містить шар(и) транзисторів і металевих з'єднань, які покриті епоксидною смолою. Ця сторона зазвичай вимагає видалення цієї епоксидної смоли (декапсуляції), хоча для деяких чипів навіть це не є обов'язковим, оскільки часто використовується прозора епоксидна смола. Тильна сторона чипу – це сторона підкладки, яка для забезпечення оптичного доступу до кристалу мікросхеми зазвичай потребує видалення центральної частини контактної панелі смарткартки. Іноді для отримання доступу потрібна декапсуляція та повторне перепаювання контактної панелі.

Через потребу зазначеної мінімальної підготовки чипу, ін'єкція оптичного збою вважається напівінвазивною атакою. Попри цей недолік, метод є найуспішнішою атакою зі збурення смарткартки, оскільки контрзаходи проти неї, як вказано вище, нелегко реалізувати.

**в) Застосування атак з ін'єкції збоїв.** Ін'єкція збоїв може використовуватися для досягнення різних ефектів: обходу механізму розділення доступу, дампу захищеної пам'яті, обнуління (часткове) ключа, диференційного аналізу помилок (DFA) та заходів впливу на реалізовані в чипі механізми протидії аналізу побічних каналів. Обхід розділення доступу досягається, коли криптоаналітик порушує уразливе для доступу рішення (наприклад, результат автентифікації), що призводить до збільшення привілеїв. З цими привілеями зловмисник може отримати доступ до конфіденційних даних. Прикладом може бути порушення верифікації PIN-коду, після чого банківська картка підписуватиме запити на транзакцію.

Щоб отримати дамп пам'яті, криптоаналітик збурює пристрій під час передачі даних. Через збурення дані передаються з неправильного місця пам'яті або видається зайва кількість даних. В обох випадках може статися витік конфіденційних даних. Старіші смарт-картки іноді були вразливі до цієї атаки під час передачі своїх команд ATR, що в крайніх випадках призводило до повних дамнів пам'яті.

Часткове обнуління ключа – це атака, за допомогою якої зловмисник встановлює частину секретного ключа на всі 0-ві біти (або на всі «1») і не впливає на кілька байтів ключа. Знаючи змінену частину ключа, ці кілька байтів, що не змінилися, можна розкрити методом тотального випробування, якщо відомі вхідні та вихідні дані. Повне обнуління ключа може бути доцільним при атаках на протоколи, що використовують секретний ключ: якщо секретний ключ використовується, наприклад, для автентифікації, то примусове присвоєння ключу відомого значення дозволяє протоколу автентифікації успішно працювати без знання фактичного секретного ключа.

Диференціальний аналіз помилок (DFA) можна виконати після порушення криптографічної операції, що призведе до пошкодження підписів або криптограм. За допомогою математичного аналізу ці пошкоджені дані можна використати для вилучення секретного або приватного ключа. Прикладом DFA з однією помилкою є атака RSA/CRT «Bellcore» [16], яка дозволяє отримати повний приватний показник RSA з одного помилкового обчислення. Інші атаки дозволяють отримувати ключі ряду асиметричних і симетричних алгоритмів шифрування, включаючи DES і AES [17].

Виробники пристроїв криптографічного захисту інформації знають про загрози атак з ін'єкції збоїв і зазвичай впроваджують низку контрзаходів для пом'якшення ризиків. Тому вважається, що більшість сучасних захищених мікроконтролерів мають належний захист від певних типів таких атак. Діапазон параметрів для належної роботи цих контролерів чітко визначений [19] і може бути перевірений самою мікросхемою. Захищені мікроконтролери також виконують більшість своїх операцій на основі внутрішнього генератора тактових імпульсів, і тому вони не настільки чутливі до зовнішніх збурень тактової синхронізації, як мікроконтролери, що працюють від зовнішнього генератора тактових імпульсів.

Контрзаходи зосереджені як на запобіганні збоїв шляхом фільтрації вхідних даних, так і на їх виявленні шляхом постійного моніторингу відповідних інтерфейсів. Якщо виявлено введення вхідних даних, що не відповідають специфікаціям, карта може певним чином відреагувати на цю подію.

Водночас зловмисники вдосконалюють методи атаки, щоб кинути виклик цим контрзаходам, що призводить до певної «взаємодії» сторін, яка просуває процес постійного покращення безпеки карток.

Однак зловмисник завжди може покращити ефективність аналізу побічних каналів шляхом впливу на контрзаходи проти DPA та CPA [20]. Подібним чином, за допомогою ін'єкції збоїв у потрібний час можна вимкнути або вплинути на контрзаходи проти збурення. Деякі контрзаходи мають параметри налаштування, які встановлюються в певний момент під час завантаження карти. За допомогою ін'єкції збоїв можна пропустити їх увімкнення або, наприклад, порушити баланс генераторів випадкових чисел.

#### **4. Особливості забезпечення інформаційної безпеки під час реалізації криптографічних алгоритмів.**

В аспекті інформаційної безпеки обчислювальних і комунікаційних систем практична загроза SCA- та FI-атак потребує такої реалізації криптографічних алгоритмів, щоб у процесі обчислень під час виконання цих алгоритмів дані секретного ключа не розкривалися, незважаючи на можливості зловмисника спостерігати і маніпулювати процесом виконання алгоритму.

Існує декілька підходів щодо реалізації цієї вимоги.

Перший підхід полягає в застосуванні Загальних Критеріїв оцінки захищеності інформаційних технологій (Common Criteria for Information Technology Security Evaluation, [4]) – міжнародного стандарту, що описує інфраструктуру, у якій користувачі системи, яка розроблюється, можуть описати вимоги, розробники можуть заявити про властивості безпеки системи, які можуть гарантувати, а експерти з безпеки визначити, чи задовольняє отримана система заявам. Таким чином забезпечуються умови, у яких процес опису, розробки та перевірки інформаційної безпеки буде проведений із необхідною скрупульозністю.

Другий підхід забезпечує кількісне визначення рівня безпеки при оцінці інформаційної захищеності системи в межах сценарію, наведеного на рис. 2. Це реалізовано, наприклад, в стандарті для федеральних органів США FIPS 140-2 (Federal Information Processing Standard, [1]), який визначає специфікації побудованих на основі криптографії систем безпеки, призначених для захисту конфіденційних або цінних даних щодо забезпечення конфіденційності й цілісності такої інформації. Стандарт FIPS 140-2 визначає вимоги, яким повинні задовольняти криптографічні модулі відповідно до чотирьох якісно різних рівнів безпеки: від низького рівня 1 до високого рівня 4.

Третій підхід, звичайно, реалізується у військовій сфері. Він полягає в застосуванні для захисту військового електронного обладнання стандартів TEMPEST (Transient Electromagnetic Pulse Emanation Standard, [5]), які гарантують неможливість витоку корисної інформації шляхом паразитних радіовипромінювань, через лінії електропередач або інші випромінювання.

Разом з тим, застосування цих підходів не надає гарантованого захисту від SCA-атак. Стандарт FIPS 140-2, наприклад, має справу тільки зі специфікаціями щодо пом'якшення впливу атак, для яких нині немає перевірених заходів запобігання. На практиці, можуть бути знайдені або створені нові побічні канали витоку й може бути отримана побічна інформація для криптоаналізу.

**Висновки.** Незважаючи на наявність та використання у світі стандартизованих підходів з забезпечення інформаційної безпеки, стурбованість, що пов'язана із застосуванням SCA- та FI-атак, з порядку денного не знімається.

Для розвинутої держави, яка претендує на свій цифровий суверенітет, нагальною необхідністю є підготовка фахівців у галузі методології та застосування SCA-атак, – як для розуміння їхніх практичних можливостей щодо порушення інформаційної безпеки обчислювальних і комунікаційних систем, так і в аспекті аналізу методів і прийомів зазначених атак для створення нових систем протидії, які реально підвищують рівень інформаційної безпеки.

### Список використаних джерел

1. Zhou, Y. B. Side-Channel Attacks: Ten Years After Its Publication and the Impacts on Cryptographic Module Security Testing [Electronic resource] / Y. B. Zhou, D. G. Fen // Information Security Seminar WS 0607. – 2006. – Access mode: <https://eprint.iacr.org/2005/388.pdf>.
2. Cryptographic processors – a survey / R. Anderson, M. Bond, J. Clulow, S. Skorobogatov // Proceedings of the IEEE. – 2006. – Vol. 94, fasc. 2. DOI: 10.1109/JPROC.2005.862423.
3. Quisquater, J.-J. Side Channel Attacks. State-of-the-art [Electronic resource] / J.-J. Quisquater, F. Koeune. – Access mode: <https://www.cryptrec.go.jp/exreport/cryptrec-ex-1047-2002.pdf>.
4. ISO/IEC 15408-1, Information technology – Security techniques – Evaluation criteria for IT security [Electronic resource]. – Access mode: [www.tools.commoncriteria.pl/ccHelp](http://www.tools.commoncriteria.pl/ccHelp).
5. SST TEMPEST Introduction iss 3 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.giac.org/paper/gsec/4287/tempest-electromagnetic-emanations-security-government-standard/106943>, September 2023.
6. Kocher, P. C. Differential power analysis. In Proceedings of the 19th Annual International Cryptology Conference on Advances in Cryptology / P. C. Kocher, J. Jaffe, B. Jun // CRYPTO '99. – London : Springer-Verlag, 1999. – P. 388-397.
7. Brier, É. Correlation Power Analysis with a Leakage Model / É. Brier, C. Clavier, F. Olivier. // CHES (Cambridge, August 11-13, 2004). – Springer, 2004. – Vol. 3156 of LNCS. – P. 16-29.
8. Chari, S. Template Attacks / S. Chari, J. R. Rao, P. Rohatgi // CHES (San Francisco Bay (Redwood City), August 2002). – Springer, 2002. – Vol. 2523 of LNCS. – P. 13-28.
9. Heuser, A. Good is Not Good Enough — Deriving Optimal Distinguishers from Communication Theory / A. Heuser, O. Rioul, S. Guilley // CHES. – 2014. – Vol. 8731 of LNCS.
10. Template attacks vs. machine learning revisited (and the curse of dimensionality in side-channel analysis) / L. Lerman, R. Poussier, G. Bontempi, O. Markowitch, F.-X. Standaert // Constructive Side-Channel Analysis and Secure Design : 6th International Workshop 252 References COSADE 2015 (Berlin, April 13–14, 2015). Revised Selected Papers. – Springer, 2015. – Vol. 9064 of LNCS. – P. 20-33.
11. Choudary O. Efficient template attacks. / O. Choudary, M. G. Kuhn // Smart Card Research and Advanced Applications : 12th International Conference, CARDIS 2013 (Berlin, November 27-29, 2013). Revised Selected Papers. – Springer, 2013. – Vol. 8419 of LNCS. – P. 253-270.
12. A Taxonomy of Side Channel Attacks on Critical Infrastructures and Relevant Systems / N. Tsalis, E. Vasilellis, D. Mentzelioti, T. Apostolopoulos // Critical Infrastructure Security and Resilience. Advanced Sciences and Technologies for Security Applications. – Springer, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00024-0\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00024-0_15).
13. Joint Interpretation Library, Application of Attack Potential to Smartcards [Electronic resource]. – Version 2.7. – JIL Hardware Attacks Subgroup, 2009. – Access mode: [https://sogis.eu/documents/cc/domains/hardware\\_devices/poi/JIL-Application-of-Attack-Potential-to-POIs-v1-0\\_2011\\_06\\_09-for\\_trial\\_use.pdf](https://sogis.eu/documents/cc/domains/hardware_devices/poi/JIL-Application-of-Attack-Potential-to-POIs-v1-0_2011_06_09-for_trial_use.pdf).

14. Gupta H. Impact of Side Channel Attack in Information Security / H. Gupta // 2019 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE). – Dubai, 2019. – P. 291-295. DOI: 10.1109/ICCIKE47802.2019.9004435.
15. Boneh, D. On the Importance of Eliminating Errors in Cryptographic Computations / D. Boneh, R. A. DeMillo, R. Lipton // Journal of Cryptology. – 2001. – № 14(2). – P. 101-120.
16. Biham, E. Differential cryptanalysis of the data encryption standard / E. Biham, A. Shamir // Advances in Cryptology – CRYPTO '97 : 17th Annual International Cryptology Conference. – LNCS, 1997. – Vol. 1294. – P. 513-525.
17. Practical Fault Attack on a Real-World ECC Library / L. Batina, M. M. Lauridsen, E. Markovski, P. K. Larsen // Cryptographic Hardware and Embedded Systems. – Amsterdam, 2018.
18. ISO/IEC 7816-3:2006. Identification cards – Integrated circuit cards – Part 3: Cards with contacts – Electrical interface and transmission protocols [Electronic resource]. – Access mode: [https://www.en-standard.eu/bs-iso-iec-7816-3-2006-identification-cards-integrated-circuit-cards-cards-with-contacts-electrical-interface-and-transmission-protocols/?gad\\_source=1&gclid=CjwKCAiA-vOsBhAAEiwAIWR0TaqrPeVx1\\_U42rfxlffbryuSiy9Iym9VR3v4SwYEMUAUIdzua3ie7RoClbQQA\\_vD\\_BwE](https://www.en-standard.eu/bs-iso-iec-7816-3-2006-identification-cards-integrated-circuit-cards-cards-with-contacts-electrical-interface-and-transmission-protocols/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA-vOsBhAAEiwAIWR0TaqrPeVx1_U42rfxlffbryuSiy9Iym9VR3v4SwYEMUAUIdzua3ie7RoClbQQA_vD_BwE).
19. Passive and Active Combined Attacks: Combining Fault Attacks and Side Channel Analysis [Electronic resource] / F. Amiel, K. Villegas, B. Feix, L. Marcel – Vienna : FDTC, 2007. – 20 p. – Access mode: <https://fdtc.deib.polimi.it/FDTC07/Feix.pdf>.

### References

1. Yong Bin Zhou, Deng Guo Fen. (2006). Side-Channel Attacks: Ten Years After Its Publication and the Impacts on Cryptographic Module Security Testing. *Information Security Seminar WS 0607*.
2. Anderson, R., Bond, M., Clulow, J., Skorobogatov, S. (2006). Cryptographic processors – a survey. *Proceedings of the IEEE*, 94, fasc. 2. DOI:10.1109/JPROC.2005.862423.
3. Jean-Jacques Quisquater, Francois Koeune. (2002). *Side Channel Attacks. State-of-the-art*. <https://www.cryptrec.go.jp/exreport/cryptrec-ex-1047-2002.pdf>.
4. ISO/IEC 15408-1, Information technology – Security techniques – Evaluation criteria for IT security. [www.tools.commoncriteria.pl/ccHelp](http://www.tools.commoncriteria.pl/ccHelp).
5. SST TEMPEST Introduction iss 3. <https://www.giac.org/paper/gsec/4287/tempest-electromagnetic-emanations-security-government-standard/106943>.
6. Paul C. Kocher, Joshua Jaffe, & Benjamin Jun. (1999). Differential power analysis. In *Proceedings of the 19th Annual International Cryptology Conference on Advances in Cryptology, CRYPTO '99* (pp. 388–397). Springer-Verlag.
7. Éric Brier, Christophe Clavier, & Francis Olivier. (August 11–13 2004). Correlation Power Analysis with a Leakage Model. *CHES, 3156 of LNCS*, 16–29.
8. Suresh Chari, Josyula R. Rao, & Pankaj Rohatgi. (August 2002). Template Attacks. In *CHES, 2523 of LNCS*, 13–28. Springer. San Francisco Bay (Redwood City), USA.
9. Annelie Heuser, Olivier Rioul, & Sylvain Guilley. (2014). Good is Not Good Enough – Deriving Optimal Distinguishers from Communication Theory. In *Lejla Batina and Matthew Robshaw, editors, CHES, 8731 of Lecture Notes in Computer Science*.
10. Liran Lerman, Romain Poussier, Gianluca Bontempi, Olivier Markowitch, & François-Xavier Standaert. (April 13–14, 2015). Template attacks vs. machine learning revisited (and the curse of dimensionality in side-channel analysis). In Stefan Mangard, Axel Y. Poschmann (ed.), *Constructive Side-Channel Analysis and Secure Design - 6th International Workshop, 252 References COSADE 2015*. Berlin, Germany. Revised Selected Papers, volume 9064 of Lecture Notes in Computer Science (pp. 20–33).
11. Omar Choudary, & Markus G. Kuhn. (November 27–29, 2013). Efficient template attacks. In Aurélien Francillon and Pankaj Rohatgi (ed.), *Smart Card Research and Advanced Applications - 12th International Conference, CARDIS 2013*. Berlin, Germany. Revised Selected Papers, volume 8419 of LNCS (pp. 253–270).
12. Tsalis, N., Vasilellis, E., Mentzelioti, D., Apostolopoulos, T. (2019). A Taxonomy of Side Channel Attacks on Critical Infrastructures and Relevant Systems. In Gritzalis, D., Theocharidou, M., Stergiopoulos, G. (eds.), *Critical Infrastructure Security and Resilience. Advanced Sciences and Technologies for Security Applications*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00024-0\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00024-0_15).
13. JIL Hardware Attacks Subgroup, “Joint Interpretation Library, Application of Attack Potential to Smartcards”, Version 2.7, Februari 2009.

14. Gupta H. et al. (2019). Impact of Side Channel Attack in Information Security. *2019 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE)*, Dubai, United Arab Emirates (pp. 291-295). DOI: 10.1109/ICCIKE47802.2019.9004435.
15. Boneh D., DeMillo R. A., Lipton R. (2001). On the Importance of Eliminating Errors in Cryptographic Computations. *Journal of Cryptology*, 14(2), 101–120.
16. Eli Biham, Adi Shamir (1997). Differential cryptanalysis of the data encryption standard. *Advances in Cryptology – CRYPTO '97: 17th Annual International Cryptology Conference, LNCS, 1294*, 513-525.
17. Batina L., Lauridsen M. M., Markovski E., Larsen P. K. (2018). Practical Fault Attack on a Real-World ECC Library. *Cryptographic Hardware and Embedded Systems*. Amsterdam, Netherlands.
18. "Identification cards – Integrated circuit cards – Part 3: Cards with contacts – Electrical interface and transmission protocols", ISO/IEC 7816-3:2006.
19. Amiel F., Villegas K., Feix B., Marcel L. (2007). *Passive and Active Combined Attacks: Combining Fault Attacks and Side Channel Analysis*. FDTC.

Отримано 11.12.2023

UDC 004.056.53

### *Anatoly Boroda<sup>1</sup>, Taras Petrenko<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Chief Researcher of the Research Department of the Research Center State Research Institute of Cyber Security Technologies and Information Protection (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [anv\\_boroda@ukr.net](mailto:anv_boroda@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9302-8297>. ResearcherID: [JRX-2757-2023](https://orcid.org/JRX-2757-2023)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Cyber Security and Mathematical Modeling Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [mail\\_taras@stu.cn.ua](mailto:mail_taras@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5571-3815>. ResearcherID: [G-5801-2014](https://orcid.org/G-5801-2014)

## IMPACT OF ATTACKS THROUGH SIDE CHANNELS ON INFORMATION SECURITY

*The main structural elements of security mechanisms based on cryptography are cryptographic primitives, namely cryptographic algorithms - symmetric ciphers, public key ciphers and hash functions, which are used to implement the necessary functions of the security mechanism. In order for the cryptographic system to ensure information security, it is necessary that the secret keys used in the cryptographic algorithms for security implementation remain secret (not revealed) under any circumstances. However, in practice, the implementation and operation of cryptographic security mechanisms is far from the perfection of an ideal "black box". That is why side channel attacks are a serious threat to the security of cryptographic modules and, as a result, to the information security of computing and communication systems. Therefore, when implementing protection mechanisms, all possibilities of such attacks should be evaluated and all aspects of their application should be taken into account.*

*The analysis of scientific works in the field of protection of cryptographic systems against attacks by side channels proved that these issues are not given enough attention today.*

*The purpose of the article is the study of attacks through side channels on the implementation of crypto-protection mechanisms, the analysis of the features of their implementation, and an overview of the mechanisms for ensuring information security during the destructive effects of these attacks.*

*The paper considers one of the practical directions of cryptanalysis - attacks through side channels on the implementation of crypto-protection mechanisms. The differences between theoretical cryptanalysis and side-channel attacks are studied. The possibilities of side-channel attacks and the specifics of failure injection attacks are analyzed. The features of ensuring information security during the implementation of cryptographic algorithms for protection against side channel attacks are considered. The need to take into account the threat of these attacks when ensuring the information security of computer and communication systems is proven.*

**Keywords:** side channel attacks; cryptosystem; information security.

*Fig.: 2. References: 19.*

*Лілія Буйвал*

кандидат технічних наук, доцент кафедри проектування літаків і вертольотів  
Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут» (Харків, Україна)

E-mail: [l.buival@khai.edu](mailto:l.buival@khai.edu). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3374-7720>

ResearcherID: W-2266-2018. Scopus Author ID: 57214224017

## МЕТОД ТРИВИМІРНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТИПОВОГО КРОНШТЕЙНА НА ОСНОВІ ПРИМІТИВІВ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ SIEMENS NX

*Розроблено метод тривимірної параметричної моделювання типового елемента конструкції, типового кронштейна, на основі примітивів за допомогою комп'ютерної інтегрованої системи CAD/CAM/CAE/PLM SIEMENS NX через використання таблиці Expressions і задавання параметрів у процесі побудови суцільних тіл. Продемонстровані підходи до проведення аналізу і спрощення конструкції типового кронштейну. В основу розроблення методу покладено використання типових елементів форми Form Features (примітивів Block, Cylinder) і типових операцій Feature Operation (Edge Blend, Boolean Operations).*

**Ключові слова:** параметричне моделювання; кронштейн; SIEMENS NX; електронна таблиця; примітиви.

Рис.: 13. Бібл.: 12.

**Актуальність теми дослідження.** Застосування комп'ютерних технологій до процесу проектування літального апарату дозволяє зменшити витрати на створення, виробництво та супровід за його життєвим циклом, підвищити продуктивність та ергономіку праці, що зрештою підвищить якість та конкурентоспроможність виробленої продукції. Створення моделі аналітичних еталонів елементів конструкції планера літака, їх з'єднань і стиків у комп'ютерній інтегрованій системі SIEMENS NX містить повне визначення елементів конструкції, з'єднань і стиків і взаємопов'язану систему їх допусків [1; 2; 3].

Однією з особливостей, що характеризують параметричну тривимірну модель є автоматична перебудова кінцевої моделі при зміні тільки початкових даних. Для реалізації використовують електронну таблицю Expressions системи SIEMENS NX та їх ув'язування через структурні елементи системи в процесі побудови моделі [1; 4]. Розроблену параметричну модель можна багаторазово використовувати для створення сімейства аналогічних об'єктів. Оскільки кронштейни відносяться до найчисельніших, після кріпильних елементів, у конструкції літального апарату й розташовані у вузлах з'єднань, котрі сприймають високі навантаження, мають бути забезпечені всі умови життєвого циклу виробу – використання методу тривимірної параметричної моделювання за допомогою примітивів зможе підвищити ефективність їх застосування вже на початкових етапах проектування.

**Постановка проблеми.** Кронштейни є порівняно простими елементами конструкції літальних апаратів. Їх моделювання в системі SIEMENS NX здійснюють двома способами залежно від складності й конструктивних особливостей: на основі примітивів і ескізів. Якщо в першому випадку за один крок можна отримати вже суцільне тіло певної форми, то у другому – це відповідає двом крокам, відповідно збільшується загальний час на моделювання. Однак для використання примітивів потрібна більш розвинена уява, образне мислення, вміння за теоретичними контурами бачити аксонометрію деталі. Тому слід спершу проводити аналіз конструкції елемента, далі, на основі його результатів, робити проміжні висновки про доцільність наявних методів моделювання і здійснювати їх вибір. Наявність габаритних розмірів і великої кількості, щодо конструктивних елементів кронштейнів, позиційних розмірів зумовлює задавати їх числовими значеннями або виразами на основі ескізів, що ускладнює автоматичну перебудову моделі при асоціативних модифікаціях за результатами проектування, збільшує час на редагування, зменшує спадкоємність в системі літальних апаратів.



**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Тривимірному параметричному моделюванню елементів конструкції присвячена значна кількість наукових праць [1 – 11]. Зокрема розроблення методу створення аналітичного еталона елемента конструкції планера реалізовано на прикладі типової тривимірної параметричної моделі поясу складальної нервюри крила на основі використання елементів електронної таблиці *Expressions* в системі SIEMENS NX [1; 4; 5]. Наведено інтегровані методи проектування і моделювання складальних конструкцій авіаційної техніки, що базуються на розробленні тривимірних аналітичних еталонів складальних вузлів, кріпильних деталей за умов регламентованої довговічності [3; 6]. Відомі дослідження топології з метою оптимізації кронштейна, як в авіації, так і в загальному машинобудуванні за допомогою програмних САД пакетів [2; 7; 8]. Представлено методи автоматизованого проектування і дослідження оцінки важливості їх застосування до тривимірного параметричного моделювання технологічних вузлів і механізмів в CAD/CAM/CAE системах [9; 10; 11].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз досліджень і публікацій показав, що розробленню методів тривимірного моделювання типових кронштейнів нині приділено недостатньо уваги, серед відомих методів і підходів не передбачається комбінування ув'язування геометричних розмірів через їх параметричні функції при використанні найпростіших елементів форми для побудови суцільних тіл типових кронштейнів.

**Метою статті** є розроблення методу тривимірного параметричного моделювання типового кронштейна на основі примітивів за допомогою комп'ютерної інтегрованої системи CAD\CAM\CAE\PLM SIEMENS NX.

**Виклад основного матеріалу.** З огляду на наявні методи об'ємного (3D) моделювання для розроблення методу створення тривимірної параметричної моделі типового кронштейна, як систему тривимірного моделювання, котра дозволяє отримати необхідні можливості для роботи з суцільними тілами з відображенням в повністю асоціативному, параметричному дереві побудови та використовувати повнофункціональні електронні таблиці із задаванням геометричних виразів або звичних систем рівнянь і проводити ітераційний аналіз за заданими критеріями вибрано комп'ютерну інтегровану систему SIEMENS NX [1; 2].

#### 1. Підготовка початкових даних.

Тривимірне параметричне моделювання типового елемента конструкції запропоновано здійснити на прикладі типового кронштейна (рис. 1). Для цього початкові дані формуються як таблиця виразів параметрів Expression (рис. 2), де групи параметрів «а», «b», «с» відповідають розмірам вздовж трьох осей системи координат і вибрані так, щоб їх найменування не збіглися із системними назвами параметрів.

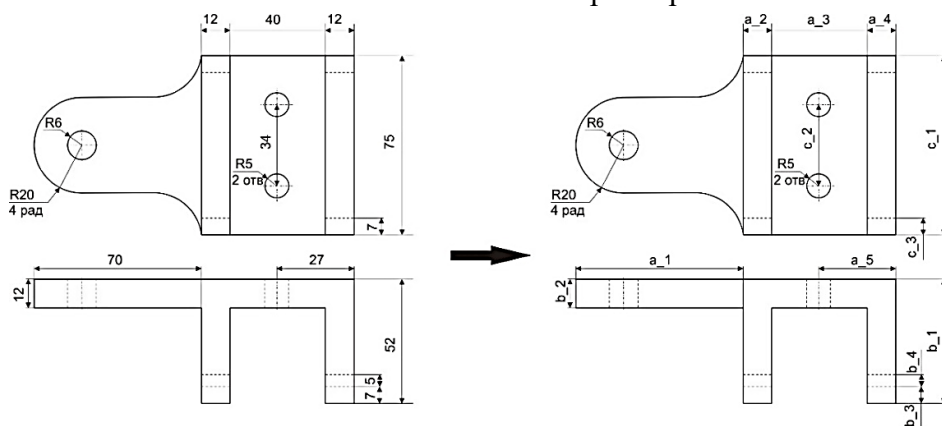


Рис. 1. Фрагмент креслення типового кронштейна [12]

Джерело: розроблено автором.

| Name | Formula | Value | Units | Type   |
|------|---------|-------|-------|--------|
| a_1  | 70      | 70    |       | Number |
| a_2  | 12      | 12    |       | Number |
| a_3  | 40      | 40    |       | Number |
| a_4  | 12      | 12    |       | Number |
| a_5  | 27      | 27    |       | Number |
| b_1  | 52      | 52    |       | Number |
| b_2  | 12      | 12    |       | Number |
| b_3  | 7       | 7     |       | Number |
| b_4  | 5       | 5     |       | Number |
| c_1  | 75      | 75    |       | Number |
| c_2  | 34      | 34    |       | Number |
| c_3  | 7       | 7     |       | Number |
| R_1  | 5       | 5     |       | Number |
| R_2  | 6       | 6     |       | Number |
| R_3  | 20      | 20    |       | Number |

| Name                                           | Formula   |
|------------------------------------------------|-----------|
| p21 (Block(1) Height (ZC))                     | c_1       |
| p22 (Block(2) Length (XC))                     | a_1       |
| p23 (Block(2) Width (YC))                      | b_1-b_2   |
| p24 (Block(2) Height (ZC))                     | c_1       |
| p25 (Block(3) Length (XC))                     | a_3       |
| p26 (Block(3) Width (YC))                      | b_1-b_2   |
| p27 (Block(3) Height (ZC))                     | c_1       |
| p28 (Block(4) Length (XC...))                  | a_1       |
| p29 (Block(4) Width (YC...))                   | b_2       |
| p30 (Block(4) Height (ZC...))                  | c_1/2-R_3 |
| p42_ydelta                                     | -b_2-b_4  |
| p43_zdelta                                     | -b_3      |
| p147 (Edge Blend(12) Radius 1)                 | R_3       |
| p153 (Edge Blend(13) Radius 1)                 | b_4/2     |
| p159 (Edge Blend(14) Radius 1)                 | b_3       |
| p163 (Cylinder(8) Diameter...)                 | R_1*2     |
| p164 (Cylinder(8) Height...)                   | b_2       |
| p166 (Mirror Feature(9) Plane Curve parameter) | c_1/2     |
| p167 (Cylinder(11) Diameter)                   | R_2*2     |
| p168 (Cylinder(11) Height)                     | b_2       |

Рис. 2. Таблиця виразів параметрів Expression

Джерело: розроблено автором.

В основу розроблення підходу покладено використання:

- типових елементів форми Form Features – примітивів, а саме тривимірного паралелепіпеда Block і циліндру Cylinder;
- типових операцій Feature Operation – скруглення Edge Blend і булевих операцій Boolean Operations.

2. Аналіз конструкції типового кронштейна.

Аналіз конструкції слід проводити за теоретичним кресленням або за проекціями креслення, що надає повне уявлення про форму в плані та їх взаємне розташування [4].

Спершу визначити точку розміщення системи координат (СК), напрямки осей і площину – це має бути найкраще положення СК для швидкого і зручного розрахування геометричних параметрів, так, щоб вони відповідали властивостям примітивів. Основною з них, є додатні значення довжин сторін. У системі SIEMENS NX для Block і Cylinder їх задають по модулю, а керують, відносно до чвертей площин системи координат, – зміною напрямку Reverse Direction. Далі – спростити конструкцію до можливих найпростіших геометричних форм, тобто методами нарисної геометрії допрацювати всі скруглення, пази, вирізи (рис. 3) та виділити паралелепіпеди від більшого до меншого габаритів і розташувати за зменшенням товщини (рис. 4).

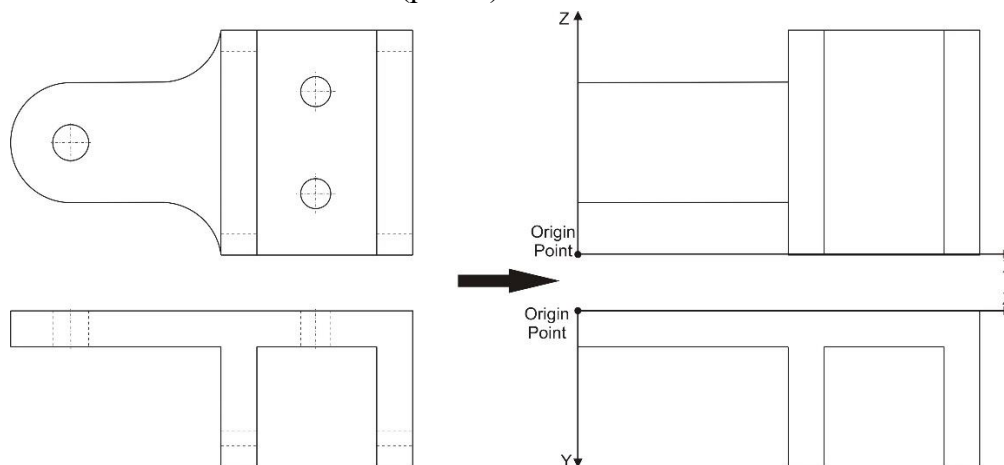


Рис. 3. Спрощення конструкції типового кронштейна

Джерело: розроблено автором.

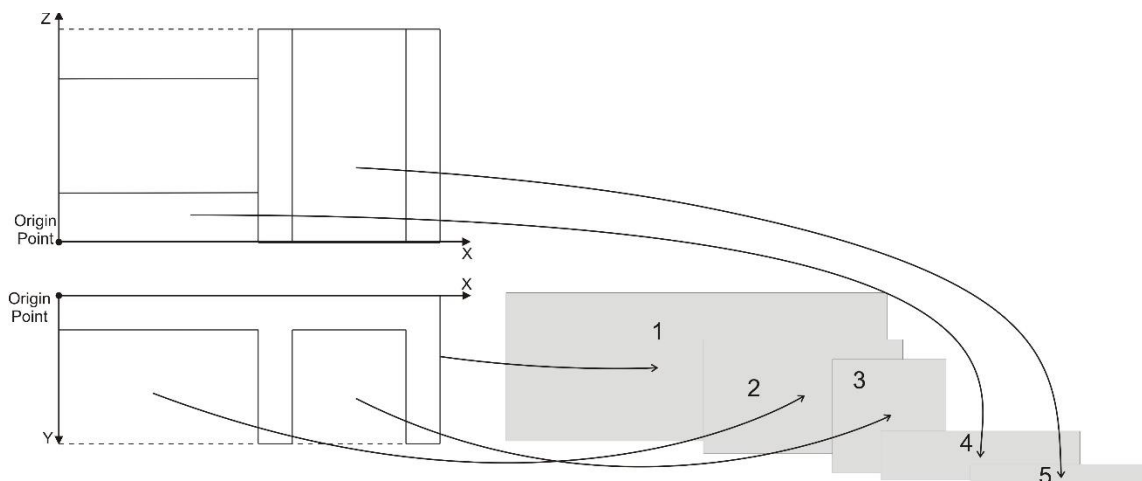


Рис. 4. Виділення паралелепіпедів зі спрощеною конструкцією:

1, 2, 3 – у площині XY; 4, 5 – у площині XZ (при цьому 5 належить до формування паза)  
 Джерело: розроблено автором.

3. Моделювання типового кронштейна у системі SIEMENS NX.

Побудову паралелепіпедів виконуємо за шляхом Insert → Design Feature → Block з одночасним задаванням булевих операцій Boolean Operations.

Паралелепіпед № 1 (рис. 5): його системна назва – Block (1), тип – Origin and Edge Lengths, координати початкової точки – (0; 0; 0).

Паралелепіпед № 2 (рис. 6): його системна назва – Block (2), тип – Origin and Edge Lengths, координати початкової точки – (0; b<sub>2</sub>; 0).

Паралелепіпед № 3 (рис. 7): його системна назва – Block (3), тип – Origin and Edge Lengths, координати початкової точки – (0; a<sub>1</sub>+a<sub>2</sub>; 0).

Паралелепіпед № 4 (рис. 8): його системна назва – Block (4), тип – Origin and Edge Lengths, координати початкової точки – (0; 0; 0).

Паралелепіпед № 5 (рис. 9, б): його системна назва – Block (7), тип – Two Diagonal Points, координати точок великої діагоналі розміщені на зовнішніх гранях ребер жорсткості, їх точне положення визначено асоціативним приростом параметрів до координат базових точок (рис. 9, а).

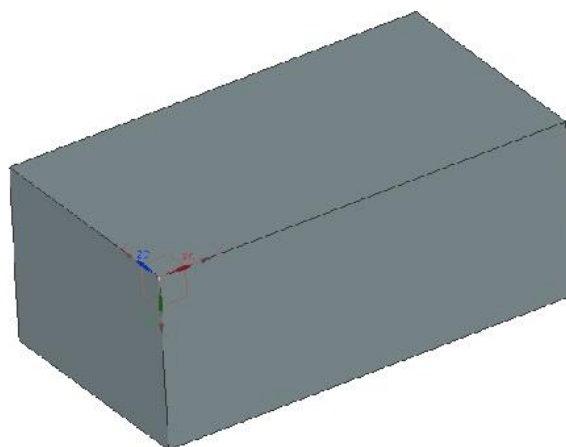
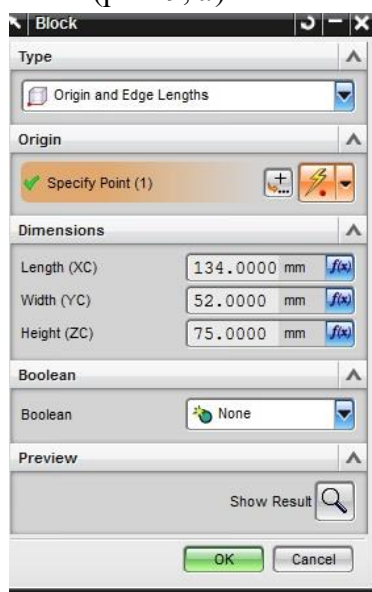


Рис. 5. Block (1) і його параметри, задані функцією

Джерело: розроблено автором.

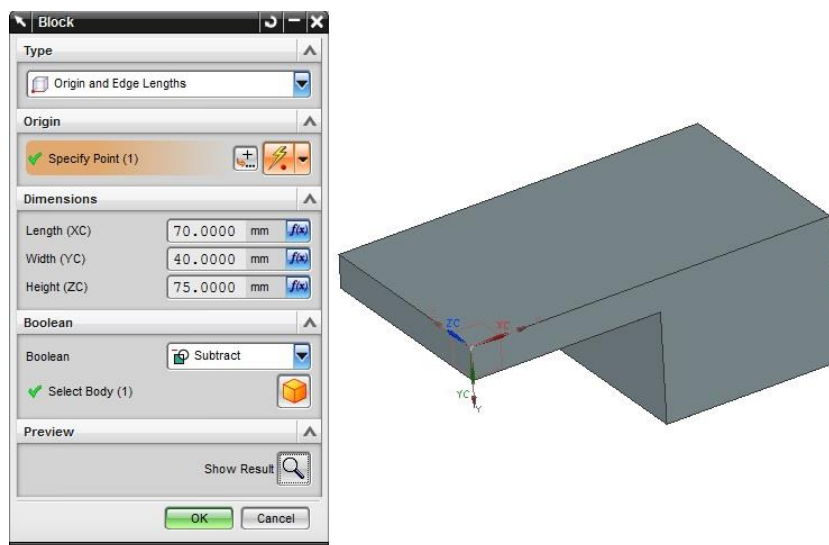


Рис. 6. Block (2) і його параметри, задані функцією

Джерело: розроблено автором.

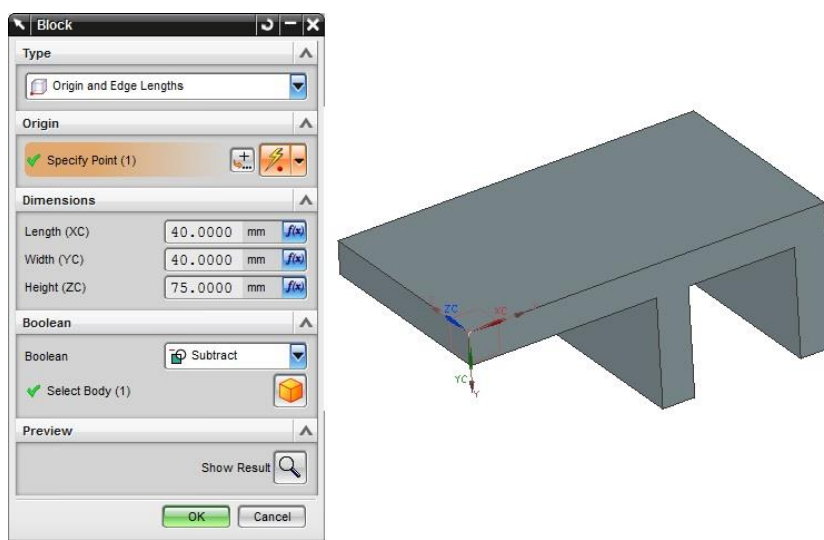
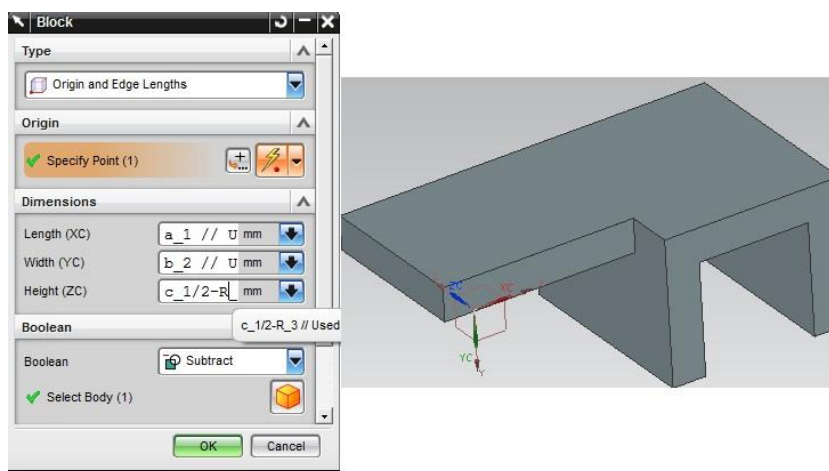
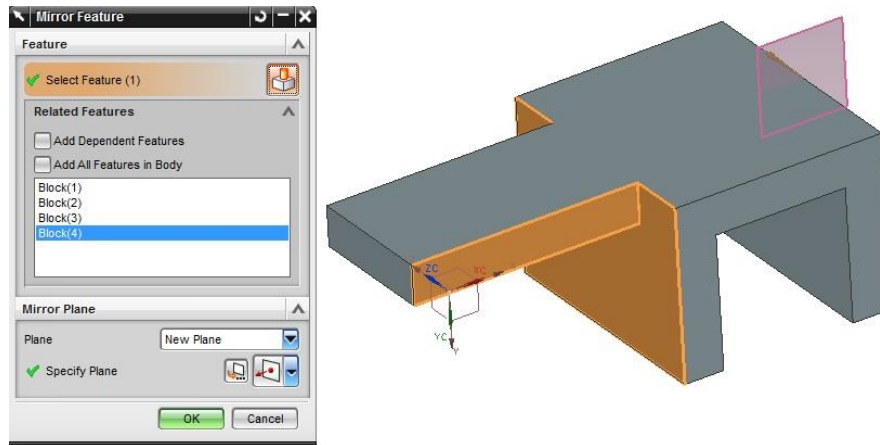


Рис. 7. Block (3) і його параметри, задані функцією

Джерело: розроблено автором.



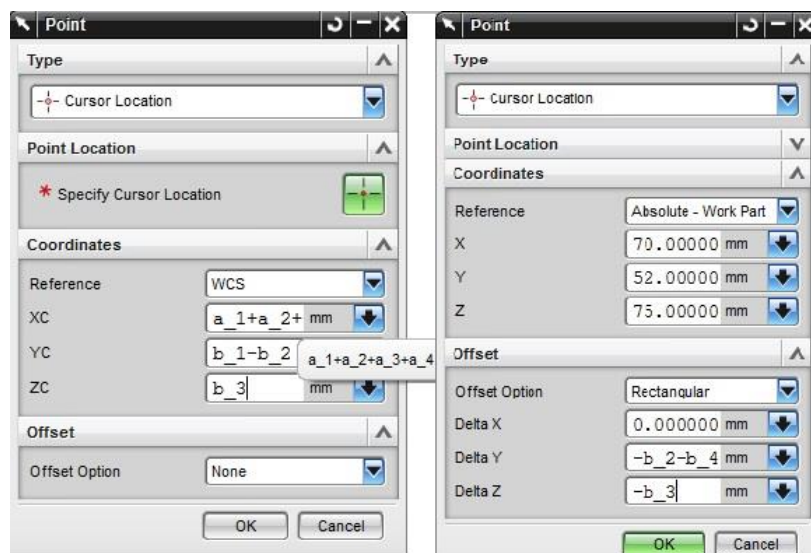
a



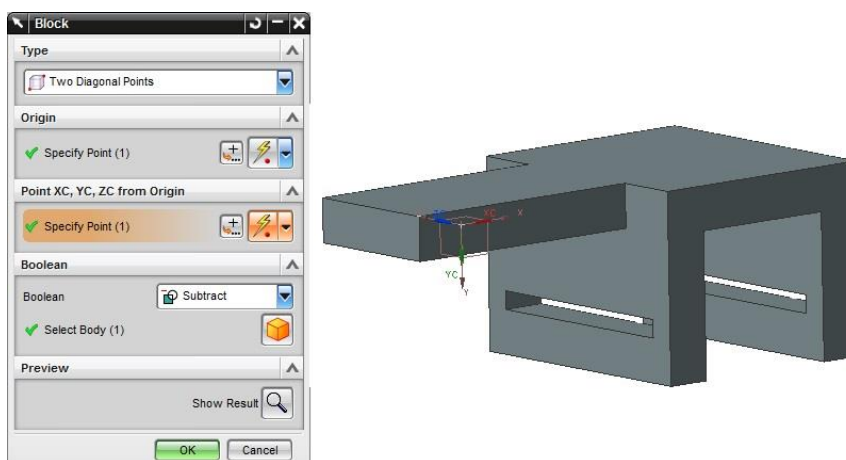
б

Рис. 8. Моделювання паралелепіпеда № 4: а – Block (4) і його параметри, задані функцією; б – асоціативне відображення Block (4)

Джерело: розроблено автором.



а



б

Рис. 9. Моделювання паралелепіпеда № 5:

а – параметри точок великої діагоналі; б – Block (7) із булевою операцією Subtract  
 Джерело: розроблено автором.

Побудову типових елементів форми Form Features (отворів) виконуємо за шляхом Insert → Design Feature → Cylinder з одночасним задаванням булевих операцій Boolean Operations (Subtract). Тип – Axis, Diameter, and Height:

– системна назва – Cylinder (8), центральна точка основи циліндру розташована на грані у площині XZ (рис. 10), її координати –  $(a_1 + a_2 + a_3 + a_4 - a_5; 0; c_1 / 2 - c_2 / 2)$ ;

– системна назва – Mirror Feature (9), площина симетрії побудована за типом On Curve через прив'язку до контрольної точки прямої, якою є ребро (рис. 11);

– системна назва – Cylinder (11), центральна точка основи циліндру розташована на грані у площині XZ (рис. 12), її координати –  $(R_3 + R_2; 0; c_1 / 2)$ .

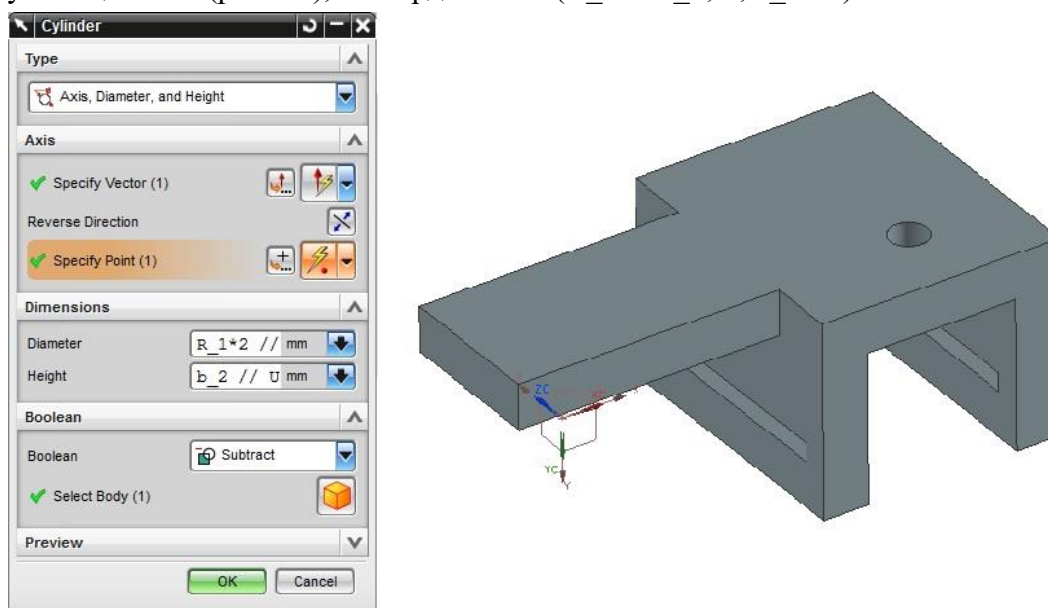


Рис. 10. Моделювання отвору Cylinder (8) із булевою операцією Subtract  
Джерело: розроблено автором.

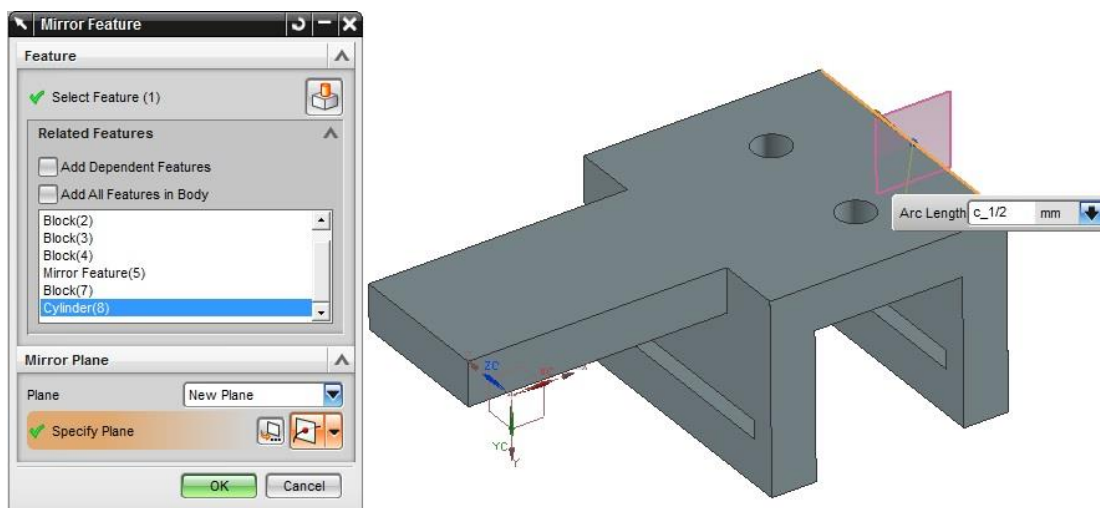


Рис. 11. Дзеркальне відображення Cylinder (8)  
Джерело: розроблено автором.

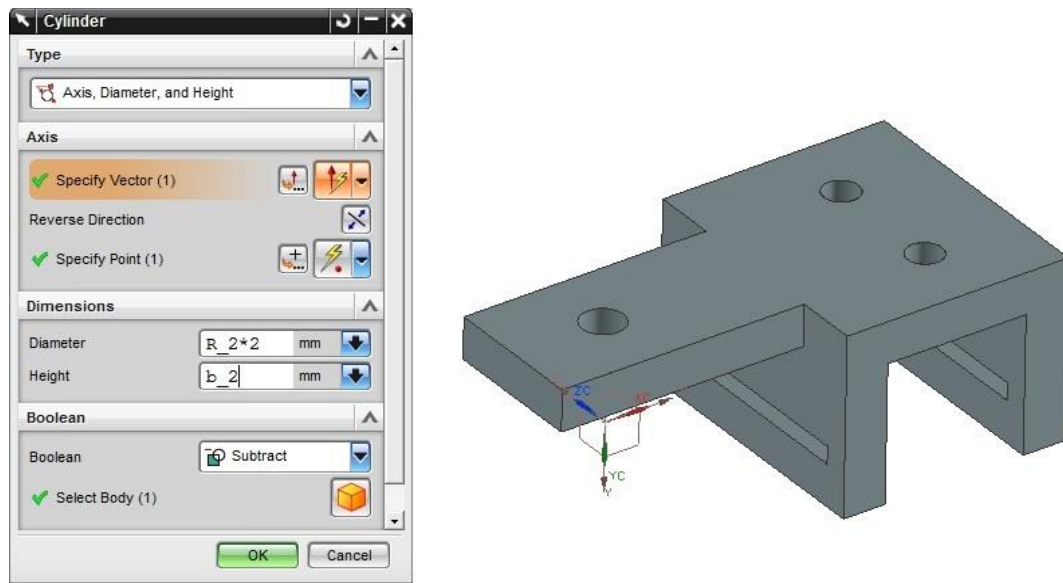


Рис. 12. Моделювання отвору Cylinder (11) із булевою операцією Subtract  
Джерело: розроблено авторами

Типові операції Feature Operation (скруглень необхідних ребер) виконано за шляхом Insert → Detail Feature → Edge Blend (рис. 13).

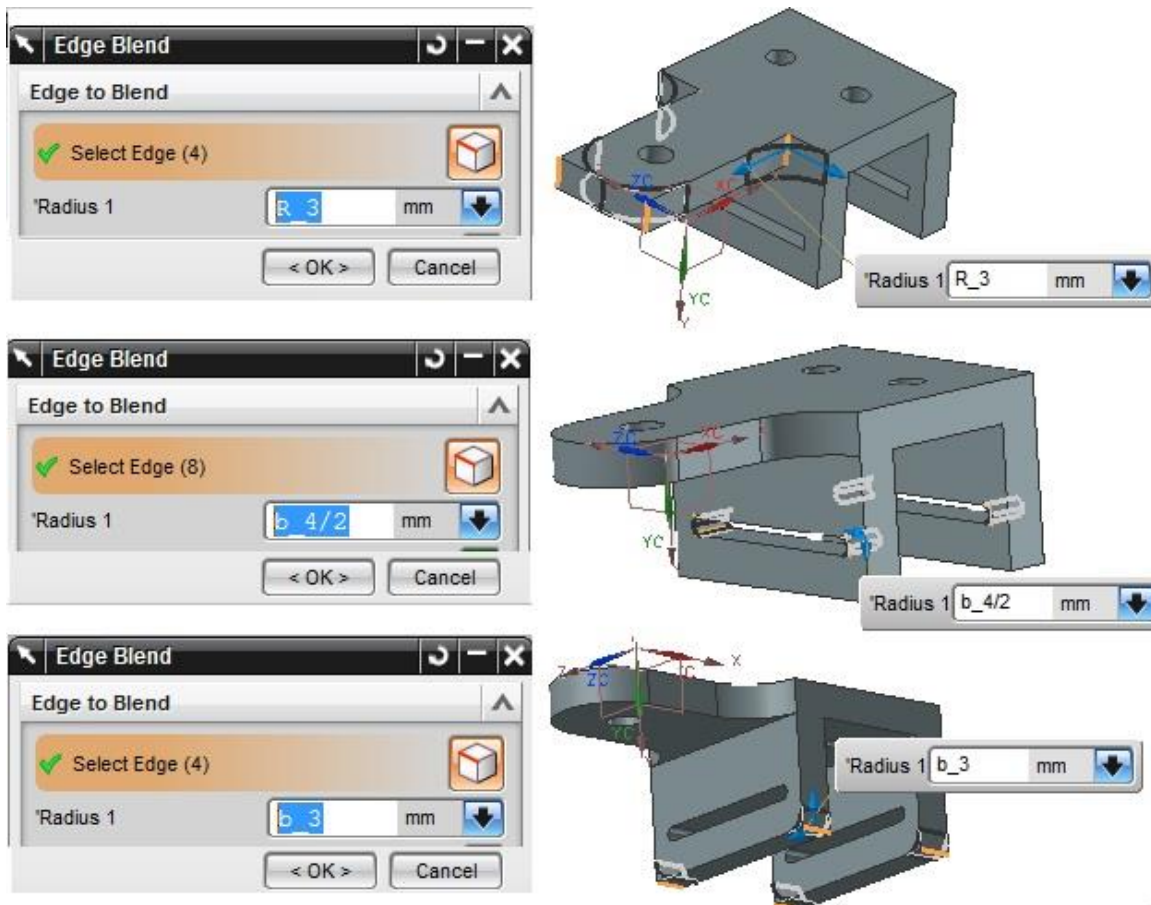


Рис. 13. Моделювання асоціативних скруглень Edge Blend із заданими параметрами  
Джерело: розроблено авторами

#### 4) Структура розробленого методу.

Метод тривимірного параметричного моделювання типового елемента конструкції, типового кронштейна, на основі примітивів за допомогою комп'ютерної інтегрованої системи CAD\CAM\CAE\PLM SIEMENS NX включає в себе:

1. Аналіз конструкції.
2. Спрощення конструкції.
3. Вибір/аналіз типових операцій, типових елементів форми Feature.
4. Синтез властивостей типових елементів і спрощеної конструкції кронштейна.
5. Формування початкових даних через таблицю Expression.
6. Моделювання за результатами аналізу і синтезу за визначеною послідовністю.
7. Аналіз аналітичного еталона.

**Висновки.** У статті розроблено метод тривимірного параметричного моделювання типового елемента конструкції, типового кронштейна, на основі примітивів за допомогою комп'ютерної інтегрованої системи CAD\CAM\CAE\PLM SIEMENS NX через використання таблиці Expressions і задавання параметрів в процесі побудови суцільних тіл та отримано такі результати:

– продемонстровані підходи до проведення аналізу і спрощення конструкції типового кронштейну;

– запропоновано розподіл всіх розмірів кронштейна на три групи відповідно до осей системи координат, у межах кожної групи послідовно у порядку зменшення значення присвоєні назви параметрів розмірів не залежно від площини проєкцій. Це дало змогу швидко зорієнтуватися за таблицею параметрів, їх присвоєнням конструктивним елементам і формування виразів функцій;

– застосовано примітиви у поєднанні із параметричними даними і, влаштованими в команди, булевими операціями, використано дзеркальне відображення операцій над моделлю для збереження асоціативності між елементами форми, які є симетричними,

– до 9-11 дій для побудови типового кронштейна, запропонованого у статті, що відповідає зменшенню кількості дій над об'єктами при створенні тривимірної параметричної моделі з невеликою витратою часу;

– мінімізація різноманітності використаних команд (чотири: Block, Cylinder, Mirror Feature, Edge Blend) без втрати якості моделі привела до спрощення моделювання аналітичного еталона елемента конструкції і можливості швидкої перебудови.

Надалі доцільно провести кількісне дослідження часу, витраченого на тривимірне параметричне моделювання типового кронштейну за розробленим методом, порівняно з існуючими, здобувачами у навчальному процесі та фахівцями авіаційних підприємств. Здійснити реалізацію методу при проєктуванні вузла з'єднання в системі літального апарату.

#### Список використаних джерел

1. Буйвал, Л. Ю. Наукові основи інтегрованого проєктування цивільного легкого літака за допомогою комп'ютерних систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02 [Електронний ресурс] / Л. Ю. Буйвал. – Харків, 2021. – 336 с. – Режим доступу: <https://library.khai.edu/library/fulltexts/2021/complex/BuivalDis.pdf.pdf>.

2. Srivastava, J. Systematic Review of Difference Between Topology Optimization and Generative Design / J. Srivastava, H. Kawakami // IFAC-PapersOnLine. – 2023. – Vol. 56, № 2. – Pp. 6561-6568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.307>.

3. Гребеніков, О. Г. Методологія інтегрованого проєктування збірних літакових конструкцій регламентованої довговічності [Електронний ресурс]: навч. посіб. / О. Г. Гребеніков. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жук. "Харк. авіац. ін-т", 2015. – 538 с. – Режим доступу: <http://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/>.

4. Метод трехмерного параметрического моделирования пояса сборной нервюры крыла самолета транспортной категории с помощью компьютерной интегрированной системы Siemens NX / Л. Ю. Буйвал, А. В. Каламбет, Р. В. Гостудым, А. М. Гуменный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2013. – № 60. – С. 5-13.



5. Devising a concept of integrated design and modeling of aircraft / O. Grebenikov, A. Humennyi, O. Dveirin, O. Soboliev, L. Buival // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – Vol. 5, № 1(113). – Pp. 15-23. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.240108>.
6. Design of High Fatigue Life Joints of Fuselage Structures Considering Fracture Mechanics. / D. Zhyriakov, O. Grebenikov, A. Humennyi, D. Konyshchikov // *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – Synergetic Engineering (ICTM'2022)* : International Scientific and Technical Conference – Kharkiv, 2023. – Pp. 159-173. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-36201-9\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36201-9_14).
7. Єрошенко, А. М. Проведення топологічної оптимізації кронштейна та підготовки до 3D-друку // А. М. Єрошенко, В. Ю. Полюшко // *Технічні науки та технології*. – 2020. – № 3(21). – С. 79-88. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3\(21\)-79-88](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3(21)-79-88) (дата звернення: 27.12.2023).
8. Topology Optimization Design and Experimental Research of a 3D-Printed Metal Aerospace Bracket Considering Fatigue Performance / Y. Chen, Q. Wang, W. Chong et al. // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, № 15. – P. 6671. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11156671>.
9. A method of computer aided design with self-generative models in NX Siemens environment / C. Grabowik, K. Kalinowski, W. Kemp, I. Paprocka // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 95. – P. 012123. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/95/1/012123>.
10. Бідніченко, О. Сучасні тенденції розвитку систем автоматизованого комп'ютерного моделювання / О. Бідніченко // *Управління розвитком складних систем*. – 2022. – № 49. – С. 59-65. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.49.59-65>.
11. Щербак, О. В. Дослідження динамічних навантажень рами фронтального навантажувача з використанням комп'ютерних 3D моделей у середовищі Siemens NX / О. В. Щербак, А. В. Сумінов, С. Л. Хачатурян // *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. – 2023. – Т. 2, № 7(38). – С. 104-112. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.7\(38\).2.104-112](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.7(38).2.104-112).
12. Cad Design Drawing. [indiamart.com](https://www.indiamart.com/proddetail/cad-design-drawing-17514724891.html) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.indiamart.com/proddetail/cad-design-drawing-17514724891.html>.

## References

1. Buival, L. Yu. (2021). *Naukovi osnovy intehrovanoho proektuvannia tsyvilnoho lehkoho litaka za dopomohoiu kompiuternykh system [Scientific basis of integrated design of civil light aircraft using computer systems]*. [PhD dissertation; National Aerospace University KHAU]. <https://library.khai.edu/library/fulltexts/2021/complex/BuivalDis.pdf>.
2. Srivastava, J., & Kawakami, H. (2023). Systematic Review of Difference Between Topology Optimization and Generative Design. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 6561–6568. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.307>.
3. Grebenikov, O.G. (2015). *Metodolohiia intehrovanoho proektuvannia zbirnykh litakovykh konstrukttsii rehlamentovanoi dovhovichnosti [Methodology of integrated design of prefabricated aircraft structures of regulated durability]*. KhAI. <http://library.khai.edu/library/fulltexts/metod/>.
4. Buival, L. Iu., Kalambet, A. V., Gostudim, R. V., & Gumennyi, A. M. (2013). Metod trekhmernoho parametriceskogo modelirovaniia poiasa sbornoj nerviury kryla samoleta transportnoi kategorii s pomoshchiu kompiuternoї integrirovanoi sistemy Siemens NX [Method of three-dimensional parametric modeling of the belt of a prefabricated rib of a transport category aircraft wing using a computer integrated system Siemens NX]. *Otkrytye informatsionnye i kompiuternye integrirovannyye tekhnologii – Open information and computer integrated technologies*, 60, 5–13.
5. Grebenikov, O., Humennyi, A., Dveirin, O., Soboliev, O., & Buival, L. (2021). Devising a concept of integrated design and modeling of aircraft. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1(113)), 15–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.240108>.
6. Zhyriakov, D., Grebenikov, O., Humennyi, A., Konyshchikov, D. (2023). Design of High Fatigue Life Joints of Fuselage Structures Considering Fracture Mechanics. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (Eds.), *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2022. ICTM 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, 57. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-36201-9\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36201-9_14).
7. Yeroshenko, A., & Polushko, V. (2020). Provedennia topolohichnoi optymizatsii kronshteina ta pidhotovlennia do 3D-druku [Topological optimization of the bracket and preparation for 3D printing]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences And Technologies*, 3(21), 79–88. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3\(21\)-79-88](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3(21)-79-88).

8. Chen, Y., Wang, Q., Wang, C., Gong, P., Shi, Y., Yu, Y., & Liu, Z. (2021). Topology Optimization Design and Experimental Research of a 3D-Printed Metal Aerospace Bracket Considering Fatigue Performance. *Applied Sciences*, 11(15), 6671. <https://doi.org/10.3390/app11156671>.

9. Grabowik, C., Kalinowski, K., Kempa, W., & Paprocka, I. (2015). A method of computer aided design with self-generative models in NX Siemens environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 95, 012123. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/95/1/012123>.

10. Bidnichenko, O. (2022). Suchasni tendentsii rozvytku system avtomatyzovanoho kompiuternoho modeliuвання [Current trends in the development of automated computer modeling systems]. *Management of Development of Complex Systems – Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, (49), 59–65. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.49.59-65>.

11. Sherbak, O., Suminov, A., & Khachatryan, S. (2023). Doslidzhennia dynamichnykh navantazhen ramy frontalnoho navantazhuvacha z vykorystanniam kompiuternykh 3D modelei u seredovyshchi Siemens NX [Study of Dynamic Loads of the Front Loader Frame Using 3D Computer Models in the Siemens NX Environment]. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 2(7(38)), 104–112. [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.7\(38\).2.104-112](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.7(38).2.104-112).

12. *Cad Design Drawing*. (n. d.). indiamart.com. <https://www.indiamart.com/proddetail/cad-design-drawing-17514724891.html>.

Отримано 23.12.2023

UDC 629.7.01

*Liliia Buival*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Candidate of Engineering Science, Associate Professor of the Airplane and Helicopter Department  
National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute” (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: [l.buival@khai.edu](mailto:l.buival@khai.edu). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3374-7720>

ResearcherID: [W-2266-2018](https://orcid.org/0000-0002-3374-7720). Scopus Author ID: [57214224017](https://orcid.org/0000-0002-3374-7720)

## METHOD OF THREE-DIMENSIONAL PARAMETRIC MODELING OF A TYPICAL BRACKET BASED ON PRIMITIVES USING THE SIEMENS NX COMPUTER INTEGRATED SYSTEM

*Design of an analytical etalons of structural elements using computer technologies allows to reduce the costs creation, production and maintenance during its life cycle, to increase work productivity and ergonomics, which will finally increase the quality and competitiveness of manufactured products.*

*To increase the effectiveness of the three-dimensional modeling of aircraft structural elements at the initial stages of design was the general research problem to reach.*

*The aim of the article was to develop the method of three-dimensional parametric modeling of a typical bracket based on primitives using the CAD\CAM\CAE\PLM SIEMENS NX computer integrated system; its' implementation when creating a typical bracket; forming the method structure.*

*The SIEMENS NX computer integrated system as a three-dimensional modeling system have been selected.*

*Approaches to the analysis and simplification of the typical brackets' structure have been shown. It was proposed to divide all sizes of the bracket into three groups according to the axes of the coordinate system. The development of the method was based on the Form Features typical elements (Block, Cylinder primitives) and Feature Operation typical operations (Edge Blend, Boolean Operations). The developed method includes: structural analysis; brackets' structure simplification; selection/analysis of a typical operations, Feature typical elements form; synthesis of properties of a typical elements and a simplified brackets' structure; formation of the initial data using Expression spreadsheet; modeling based on the results of both analysis and synthesis according to a certain sequence; analysis of the analytical etalons.*

*The method of three-dimensional parametric modeling of a typical structural element, such as a typical bracket, based on primitives have been developed using both the CAD\CAM\CAE\PLM SIEMENS NX computer integrated system and the Expressions spreadsheet and setting parameters during solid bodies creation. Up to 9-11 operations have been obtained for the typical brackets' structure, which corresponds to a reduction in the number of operations on objects when creating a 3D parametric model with little time consumption. Only four commands have been used without losing the quality of the model, which led to the simplification of the modeling of the analytical etalon of the structural element and the possibility of rapid reconstruction.*

**Keywords:** parametric modeling; bracket; SIEMENS NX; spreadsheet; primitives.

Fig.: 13. References: 12.

## РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-4(34)-115-128

UDC 677.017.86

**Olena Ishchenko<sup>1</sup>, Olha Sumska<sup>2</sup>, Kateryna Smykalo<sup>3</sup>,  
Yuliia Feshchuk<sup>4</sup>, Daria Kuchynska<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor of Department of Chemical Technologies and Resource Saving  
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [ishchenko5@gmail.com](mailto:ishchenko5@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9510-6005>

**ResearcherID:** [GYV-0809-2022](https://orcid.org/0000-0002-9510-6005). **Scopus Author ID:** [57200013816](https://orcid.org/0000-0002-9510-6005)

<sup>2</sup>PhD (Eng.), Associate Professor, Associate professor of Department of Food Technologies

Kherson State Agrarian and Economic University (Kropyvnytskyi, Ukraine)

**E-mail:** [sumskaetdt@gmail.com](mailto:sumskaetdt@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1606-6103>

**ResearcherID:** [91.215.68.126](https://orcid.org/0000-0003-1606-6103). **Scopus Author ID:** [57204470556](https://orcid.org/0000-0003-1606-6103)

<sup>3</sup>Student

Kherson National Technical University (Khmelnitskyi, Ukraine),

PhD, fashion studio tutor (Lutsk, Ukraine)

**E-mail:** [smykalo.kateryna@vnu.edu.ua](mailto:smykalo.kateryna@vnu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9670-6563>

**ResearcherID:** [E-7755-2017](https://orcid.org/0000-0002-9670-6563). **Scopus Author ID:** [57809016000](https://orcid.org/0000-0002-9670-6563)

<sup>4</sup>Laboratory Assistant of Department of Food Technologies

Kherson State Agrarian and Economic University (Kropyvnytskyi, Ukraine)

**E-mail:** [yulka131417@gmail.com](mailto:yulka131417@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0510-6325>. **Researcher ID:** [JOK-4531-2023](https://orcid.org/0000-0003-0510-6325)

<sup>5</sup>PhD student of Department of Chemical Technologies and Resource Saving

Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [dkuchynska@gmail.com](mailto:dkuchynska@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-5928-6639>

### ANTIMICROBIAL APPROACHES FOR TEXTILES

*The use of textile materials with antimicrobial treatment is one of the ways to effectively protect a person from exposure to various pathogens. The article is devoted to the topical issue of the development of innovative textile materials with prolonged antimicrobial treatment. To establish the possibility and features of obtaining innovative textile materials with long-term antimicrobial treatment. To prepare this article, many materials were considered, as well as ready-made solutions that were publicly available. Despite the fact that research on this topic was conducted, in order to obtain a prolonged effect, special attention needs to be paid to the problem of fixing the antimicrobial drug. To establish the technological features of applying a prolonged action antimicrobial treatment to textile material. The main tasks are to determine the composition of the composition and the peculiarities of the processing of the textile material; to investigate the influence of the polymer carrier and the fixing agent on the permanence of the final treatment and the stability of the antimicrobial effect. In order to obtain a prolonged antimicrobial effect, the problem of fixing the antimicrobial drug on the textile material was solved by using the developed preparation composition. The proposed finishing compound contains carboxymethylated starch, decamethoxine as a bactericidal drug and an agent for fixing them on the textile material - potassium iodide. The effect of the finishing components on the sorption of modified starch by cotton fabric was studied and a significant increase in its content on the fabric was revealed during simultaneous impregnation. The detected phenomenon is proposed to be explained by the formation of an ionic bond between carboxymethyl groups and decamethoxin. The technological features of applying a long-acting antimicrobial treatment to a textile material, which consists in the use of a one-stage technology, have been clarified. The influence of the polymer carrier and the fixing agent on the permanence of the final treatment and the stability of the antimicrobial effect is shown. The results of antimicrobial tests of prepared samples processed by various technological methods are presented. It was found that the fabric prepared according to the proposed technological regimes has an antimicrobial effect that is resistant to multiple washings. The developed technology is promising and can be implemented on the equipment of finishing factories.*

**Keywords:** antimicrobial protection; decamethoxine; modified polysaccharides; application; quaternary ammonium salt; textiles; antimicrobial.

*Fig.: 5. Table: 8. References: 23.*

**Introduction.** Human body is inhabited by vast number of microorganisms which form a complex ecological community and influence the human physiology, in the aspect of both health and diseases [1]. Healthcare concerns have motivated the interest for the development of multifunctional antimicrobial cotton fabrics. Moreover, cotton textiles are also used in medical applications such as wound dressings [2]. The development of innovative textile materials with prolonged antimicrobial treatment is one of the ways to effectively protect people from exposure to various pathogens.

It should be noted that polysaccharides have recently been actively used in the production of innovative textile materials. Chemically modified polysaccharides can be used in drug delivery, tissue engineering, gene transport, etc [3].

**Target setting.** Antimicrobial textile materials can be produced at textile enterprises with the use of existing equipment, generally accepted processing technologies and with the use of traditional bactericidal drugs such as halogenated phenols and cresols, salicylic acid anilide and halogen-containing carboxylic acids, organophosphorus compounds, melamine derivatives, organometallic compounds, metal salts (copper, zinc, antimony, bismuth, cadmium, silver, zirconium, etc.), fluorine compounds, etc [4].

**Actual scientific researches and issues analysis.** Surface modification of cotton fibres with biopolymers (chitosan, starch) and other synthetic polymers to impart antimicrobial activity and overcome other limitations of this natural textile has been reported [5]. Quaternary ammonium salts, industrial enzymes and several metal salts have also been described as agents for the development of antimicrobial textiles [6] as well as the use of other antimicrobial products (polyhexamethylene biguanide, triclosan, N-halamine, peroxyacids) [7, 8]. Also, carboxymethyl cellulose (CMC) with different degrees of substitution with the addition of silver nanoparticles is used for the properties of treated cotton fabrics that have different degrees of polymerization [9].

In the last 10 years, disinfectants from the group of surface-active substances (surfactants) - detergents - have become widely used. According to their ability to ionize in aqueous solutions, they are divided into cationic, anionic, ampholyte and nonionic surfactants. As independent disinfectants, mainly cationic and ampholyte surfactants are used. Quaternary ammonium compounds (QACs) are widely used for disinfection of water, surfaces and instruments, as well as in the textile, leather and food industries due to their relatively low toxicity, broad antimicrobial spectrum, non-volatility and chemical stability [10; 11].

At the current stage of science, medicine and technology development, cationic surfactants quaternary ammonium salts and quaternary salts of pyridine are increasingly developing in the practice of disinfection. These substances are used, of course, in the form of aqueous solutions for disinfecting the hands of surgeons, washing dishes, and for processing equipment at food industry enterprises. The study of the bactericidal properties of quaternary ammonium and pyridinium compounds is of great interest, because these substances to a greater extent meet the requirements for bactericides that can be used for antimicrobial treatment of textile materials [12; 13].

Quaternary ammonium compounds (QACs) are cationic agents that carry a positive charge in the N atom in the solution, usually attached to the surface of an anionic fibre by ionic interaction [14; 15]. QACs ( $R_4N^+X^-$ ) represent a large group of 191 compounds, and, as a rule, the term QAC refers to a subgroup of linear alkylammonium compounds consisting of a hydrophobic alkyl chain and a hydrophilic analogue. In the textile industry, compounds containing long alkyl chains (12–18 carbon atoms) are most commonly used, mainly for cotton, polyester, nylon, and wool [14, 16, 17]. The antimicrobial effect of these compounds depends on the length of the alkyl chain, the presence of a perfluorinated group and the amount of cationic ammonium group in the molecule [15].

These compounds are active against a wide range of microorganisms, such as gram-positive and gram-negative bacteria, fungi, and certain types of viruses [15; 18]. It is known to obtain poly (D, L-lactide) (PDLLA) fibrous membranes, the surface of which was modified with quaternary ammonium fragments, presenting an antibacterial efficiency of approximately 99.999% against gram-positive (*Staphylococcus aureus*) and gram-negative (*Escherichia coli*) bacteria. The authors explained that the antibacterial effect was based on the interaction of surface positive charges and cell membrane negative charges, which leads to loss of membrane

permeability and cell leakage [19]. In fact, the antimicrobial effect is caused by attractive interactions between the cationic ammonium group and the negatively charged cell membrane of the microbe. After contact with cells, they can exhibit various modes of antimicrobial action, including damage to cell membranes, denaturation of proteins, and inhibition of DNA production, avoiding reproduction [14; 20].

Despite the effectiveness of quality control, they have a drawback, namely leaching from the textile due to the lack of physical connection, which leads to a rapid decrease in the concentration in the textile. In the case of commercial polyester fibers Acrilan® and Orlon®, for example, containing carboxylic or sulfonate groups, QACs can be directly lost under near-boiling conditions during washing [21; 22]. Moreover, there are also commercial products based on QAC as isolated active substances, such as BIOGUARD® (Hamilton, New Zealand), Sanigard KC and Sanitized® (Burgdorf, Switzerland) [15].

**Uninvestigated parts of general issues defining.** Analyzing the scientific and technical literature, it was noted that the issue of providing antimicrobial properties is complex. To preserve textile materials with antimicrobial properties, it is necessary to choose a polymer and a bactericidal reagent in such a way that there are strong chemical bonds between them. This will provide opportunities to preserve the antimicrobial properties of the material after water treatments. Thus, in order to obtain a prolonged effect, special attention needs to be paid to the problem of fixing the antimicrobial drug.

Polymers that have antimicrobial properties represent a valuable alternative to conventional antibiotics and are currently gaining interest in coatings, personal care and active food packaging, and biomedical applications. The interest in starch as an antimicrobial agent carrier is accrued from its film-forming properties and high molecular weight. Also, the poor solubility of starch in cold water limits its potential applications. Thus, starch modification is desirable not only to mitigate these challenges but also to bring about other functional properties.

**The research objective.** The purpose of the work is to establish the technological features of applying a prolonged action antimicrobial treatment to textile material. The main tasks are to determine the composition of the composition and the peculiarities of the processing of the textile material; to investigate the influence of the polymer carrier and the fixing agent on the permanence of the final treatment and the stability of the antimicrobial effect.

**The statement of basic materials.**

*Textile material*

The research was conducted on cotton dyed fabric for medical purposes (Table 1).

*Table 1 – Structural characteristics of textile samples*

| Textile materials              | Vendor code | Width, sm | Surface density, g/m <sup>2</sup> | Number of threads per 10 cm |       |
|--------------------------------|-------------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------|-------|
|                                |             |           |                                   | Warp                        | Weft  |
| Calico<br>TO 17 MD<br>13-26-96 | 2C-3213 ГОТ | 215+2,5   | 133-7                             | 252+5                       | 223+7 |

Preparations for final processing Carboxymethylated starch (CMS) (TU U 6-04872 671.061-96) was used as a polymeric matrix for antimicrobial treatment of textile materials.

Kolosyl M is a microemulsion of a modified silicone softener for the final treatment of all types of textile materials by the methods of adding and selecting.

Potassium iodide (CAS 7681-11-0).

In this work, the drug decamethoxin (Decamethoxinum, DKM®) was used to provide antimicrobial properties to textile materials, which was produced at the Experimental Production of the Institute of Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine (Fig. 1). Registration certificate UA/12128/01/01.

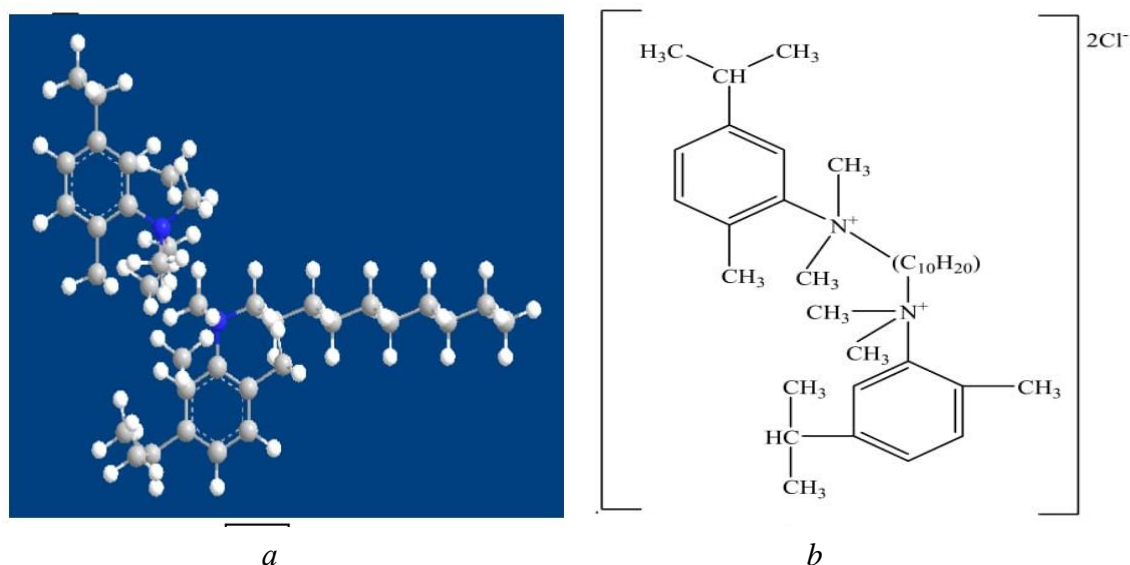


Fig. 1. Decamethoxin spatial model (a); structural formula (b) [23]

### 2.2. Technology of Antimicrobial Approaches for Textiles

According to the selected one-stage continuous method of preparation, the fabric sample is soaked in a solution containing CMS, a softener, an antimicrobial composition of decamethoxin and potassium iodide, then twice spun with a degree of spin of 70-80% and dried at a temperature of 95-105 °C. The composition of the finishing and the concentration of the working solutions are given in the Table 3.

Table 2 – Finishing composition and concentration of working solutions for one-stage continuous finishing method

| Drug name             | Finishing composition number |       |      |      |       |      |      |
|-----------------------|------------------------------|-------|------|------|-------|------|------|
|                       | 1                            | 2     | 3    | 4    | 5     | 6    | 7    |
| CMS, g/l              | 25                           | 25    | 25   | 25   | 25    | 25   | 25   |
| Colosyl M, g/l        | 20                           | 20    | 20   | 20   | 20    | 20   | 20   |
| Decametoxin, g/l      | –                            | 0,005 | 0,01 | 0,02 | 0,005 | 0,01 | 0,02 |
| Potassium iodide, g/l | –                            | –     | –    | –    | 0,01  | 0,02 | 0,04 |

### 2.3. Gravimetric method of determining the main substance presence

The bottles, which will contain the substance to be determined, are weighed, washed well, the washed bottles are heated in a drying oven for 4-6 hours, and weighed again. Then, 10g of the substances under investigation solutions are poured into the bottles, weighed and again put in the drying oven for 4-6 hours, weighed again.

The presence of the main substance is determined according to the formula (1):

$$n = \frac{m_n - m_k}{m_n} \cdot 100\% , \tag{1}$$

where  $m_n$  – initial mass of the bottle with solution, g;

$m_k$  – the mass of bottle with a solution that has been roasted for 4-6 hours, g.

### 2.4. Antimicrobial studies

The effectiveness of antimicrobial treatment was tested by the agar method. To do this, after cooling to 45 °C, the liquid agar nutrient medium is infected with microbes grown in 24 hours, for example, *Staphylococcus aureus*, and then poured into sterile cup of Petri. After solidification, fabric samples measuring 20×20 mm (no more than two samples in one cup) are placed on the agar layer, if necessary, slightly pressing them, and left for 24-48 hours.

The action of the antimicrobial drug is characterized by the fact that there is no population growth under the tissue, and around the tissue there is a zone of complete growth retardation, which passes into a zone of strong retardation and then into a zone of partial retardation of the development of microbes. Zone sizes are expressed in millimeters. The number and size of microorganisms increase as they are removed from the tissue (observed under a microscope).

- The agar layer under the sample is characterized by the same (or almost the same) growth force as the environment (score 1);
- the agar layer under the sample includes few (units) of bacteria compared to the environment (score 2);
- in the agar layer under the tissue, there are no microbes (full retarding effect), but in the following layers, a certain number of microbial colonies matured to the sample (score 3);
- there are no microbes in the agar layer under the sample and at a distance of 2 mm from it in all directions (score 4);
- the total dead zone around the sample is more than 3 mm (score 5).

In this work, a modified agar method is used, it differs in that the cultivation of microorganisms in a liquid agar nutrient medium poured into cups is carried out from air, then it is cooled to 45 °C, and after that, samples of treated tissues with a diameter of 20 mm are cut out and applied to a solidified agar layer. The cup of Petri with samples is placed in a thermostat for 4-5 days at the same temperature – then conclusions are drawn. The score remains the same.

The method of determining the bactericidal properties of samples and resistance to *Esheriehia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis* and *Fusarium oxusporum fungi*.

The bacteria were grown on meat-peptone agar (MPA). Cultures obtained from the collection of the Institute of Microbiology and Virology were transplanted twice onto shoals (for revitalization), bacteria were incubated in a thermostat at a temperature of 30-35°C, fungi at 23-25°C. A suspension with a titre of 10<sup>9</sup> cells in 1 ml (according to the turbidity standard) was prepared from the bacteria that grew during the day. Mushroom suspension was prepared from a five-day culture. The resulting suspension in the amount of 1 ml was placed in a sterile cup of Petri, poured with melted and cooled to 40-45°C appropriate agar, vigorously mixed (for uniform distribution of microbes in the agar) and tissue samples were quickly dipped into the warm, non-solidified agar. Results were processed for bacteria after 2-6 days and for fungi after 5-7 days. The bactericidal and bacteriostatic effects of the substances contained in the fabric were taken into account.

### 2.5. Determination of the final treatment resistance to washing

To obtain data on the resistance of treated samples to washing, the following technique was used: samples of treated fabric are soaked at a temperature of 40 °C in a solution containing 5 g/l of oleic soap (60%) and 3 g/l of sodium bicarbonate for 10 minutes. Then the water-soaked fabric is subjected to friction (fabric against fabric) - 15 movements along the base and 15 movements along the weft. After that, the sample is washed with water at a temperature of 35–40 °C 2 times, and then washed with running cold water for 3–5 minutes until the soap is completely removed and dried in a dryer. The loss of samples mass is considered as a loss of finishing solution.

For greater visibility of the results obtained, showing the total weight loss of the samples, the percentage weight loss of the finishing, calculated according to the formula (2), will be shown:

$$\text{Percentage loss} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

where  $m_1$  is the mass of sample before washing and  $m_2$  is the mass of sample after washing.

2.6. Study of fabric stiffness

A test strip of fabric (100\*30 mm) is placed on a horizontal bearing surface and a lever is installed on it. With the help of a toggle switch the mechanism for lowering the bearing surface sides is turned on. After 5 minutes have passed since the separation of the test strip from the surface of the site, the bending of the test strip ends is measured using the bending indicators.

Stiffness (EI) in  $\mu\text{N}\cdot\text{cm}^2$  by the cantilever method is calculated by the formula (3):

$$EI = 42046 \cdot \frac{m}{A}, \tag{3}$$

where  $m$  – mass of the strip, g;

$A$  – relative bending function ( $f_0$ ).

The relative bending ( $f_0$ ) is calculated according to the formula (4):

$$f_0 = \frac{f}{l} = \frac{f}{7}, \tag{4}$$

where  $f$  – final bending of test strips;

$l$  – the length of the hanging ends of the test strips,  $l = 7\text{cm}$ .

2.7. Study of hygroscopicity of treated fabrics

A test strip of fabric (100\*30 mm) is weighed on analytical scales, kept in a desiccator with 100% relative humidity for 4 hours, weighed again and dried to a constant weight at a temperature of 105-110 °C. Weighing samples and calculating moisture are carried out according to the formula (5):

$$W = \frac{g_o - g_c}{g_c} \cdot 100, \tag{5}$$

where  $W$  – moisture content in the sample in %;

$g_o$  – sample weight before drying, g;

$g_c$  – dry sample weight, g.

2.8. Determination of the treated tissues capillarity

A strip of fabric 30 cm long (along the warp) and 5 cm wide (along the weft) is suspended by one end over a crystallizer with a solution of potassium dichromate of 5 g/l. The other end is dipped into the solution and observed the rise of the coloured liquid. The rise of the liquid is marked with a ruler, the zero point of which coincides with the liquid level. The countdown is carried out after 1, 5, 10, 20, 30 minutes and after 1 hour.

The effect of finishing components on the sorption of modified starch by cotton fabric was studied. The results are presented in Fig. 2.

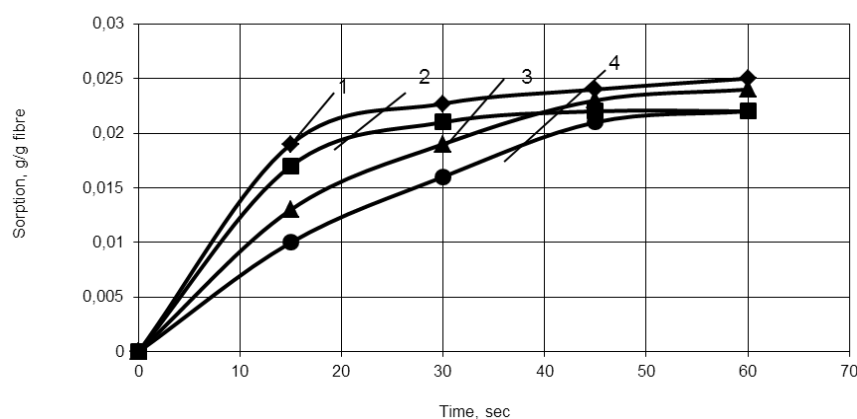
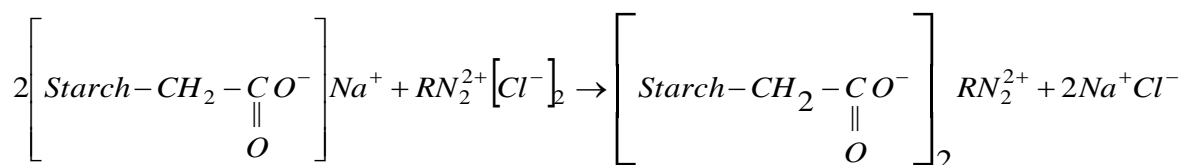


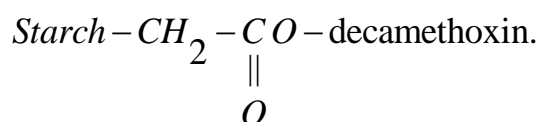
Fig. 2. Sorption of CMS when adding an antimicrobial finish to cotton fabrics from the apret:  
1 – № 4; 2 – № 7, 3 – № 3, 4 – № 1



The results obtained are most likely explained by the formation of an ionic salt between the carboxymethyl groups of Na-KMK and decamethoxine according to the scheme:



Thus, when imparting an antimicrobial finish by sizing with a composition containing Na-CMS and decamethoxin, the compound



The degree of sorption of such a compound is higher than the sorption value of Na-CMS in mass terms. Thus, when imparting an antimicrobial finish by sizing with a composition containing Na-CMS and decamethoxin, the compound is sorbed from the sizing.

For the application of antimicrobial powers, it is a one-stage, uninterrupted method of treatment. After processing the scientific literature [5] for fixing decamethoxin, it was protonated with potassium iodide, so when it interacts with some cationic superficially active species, it is possible to establish stable low-grade diseases in water. Also, potassium iodide by itself exhibits antimicrobial activity, which can increase the overall antimicrobial power of pretreated fabrics.

The results of studies on antimicrobial properties determination of the samples are shown in Table 3.

*Table 3 – Results of antimicrobial tests of prepared samples processed by a single-stage continuous method*

| No. of the sample | Zone of delay, mm | Total zone, mm | Point assessment |
|-------------------|-------------------|----------------|------------------|
| 1                 | 0                 | 25             | 1                |
| 2                 | 0                 | 23             | 2                |
| 3                 | 0                 | 24             | 3                |
| 4                 | 2                 | 24             | 4                |
| 5                 | 2                 | 23             | 4                |
| 6                 | 4                 | 23             | 5                |
| 7                 | 6                 | 26             | 5                |

The results of antimicrobial tests of the obtained samples were as follows. Brown moss growths of irregular shape were observed on the sample treated with composition No. 1 (see Table 2), there were also colonies of bacteria of irregular shape, homogeneous structure of white and yellow colour, as well as small fungi of heterogeneous structure. A small number of small colonies of white and yellow bacteria with a uniform structure of regular and irregular shape were observed around the samples treated with formulations No. 3, 4, 6, and 7.

The obtained results indicate that tissue samples treated with decamethoxine and potassium iodide additives show antimicrobial activity against microorganisms from the air environment, they sufficiently delay the growth of microorganisms on the surface and around the studied material, and antimicrobial activity increases with an increase in the content of the antimicrobial drug in the finishing.

Results of bactericidal properties determination for samples and its resistance to *Staphylococcus aureus*, *Esheriehia coli*, *Bacillus subtilis* and *Candida albicans* fungi are shown in Table 4.

Table 4 – Results of antimicrobial activity determination for tissue samples

| Processing composition | Activity, points |         |             |                  |
|------------------------|------------------|---------|-------------|------------------|
|                        | S. aureus        | E. Coli | B. subtilis | Candida albicans |
| 1                      | 1                | 1       | 1           | 1                |
| 2                      | 2                | 1       | 2           | 1                |
| 3                      | 4                | 2       | 4           | 2                |
| 4                      | 4                | 3       | 4           | 4                |
| 5                      | 4                | 3       | 4           | 3                |
| 6                      | 5                | 4       | 5           | 4                |
| 7                      | 5                | 4       | 5           | 4                |

Washing resistance testing of finished textiles is one of the mandatory requirements for all finished products. In order to determine the resistance of the antimicrobial treatment to household washings, laboratory studies of tissue samples were carried out. The results of the study of the finishing content during washing are presented in Table 5 and Table 6.

Table 5 – The results of tests of finished samples for resistance to washing by the gravimetric method of determination

|                      | Sample number* | Without washing | Number of washing |       |       |       |       |
|----------------------|----------------|-----------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
|                      |                |                 | 1                 | 2     | 3     | 4     | 5     |
| Weight of samples, g | 1              | 0,975           | 0,912             | 0,903 | 0,879 | 0,884 | 0,884 |
|                      | 2              | 0,915           | 0,860             | 0,857 | 0,856 | 0,855 | 0,855 |
|                      | 3              | 0,925           | 0,865             | 0,861 | 0,862 | 0,863 | 0,863 |
|                      | 4              | 0,945           | 0,876             | 0,882 | 0,888 | 0,896 | 0,896 |
|                      | 5              | 0,935           | 0,889             | 0,881 | 0,876 | 0,876 | 0,872 |
|                      | 6              | 0,980           | 0,940             | 0,930 | 0,928 | 0,926 | 0,926 |
|                      | 7              | 0,990           | 0,950             | 0,942 | 0,939 | 0,937 | 0,937 |

\* – numbering of samples processed according to the regimes listed in Table 1.

Table 6 – Results of tests of finished samples for resistance to washing

|                          | Sample number* | Number of washing |       |       |       |       | Σ, %  |
|--------------------------|----------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                          |                | 1                 | 2     | 3     | 4     | 5     |       |
| % of samples weight loss | 1              | 6,153             | 6,289 | 6,458 | 6,689 | 6,689 | 6,706 |
|                          | 2              | 6,010             | 6,340 | 6,557 | 6,557 | 6,557 | 6,404 |
|                          | 3              | 6,490             | 6,920 | 6,811 | 6,703 | 6,920 | 6,669 |
|                          | 4              | 6,524             | 6,867 | 7,391 | 7,402 | 7,412 | 6,894 |
|                          | 5              | 4,920             | 5,775 | 6,310 | 6,310 | 6,738 | 5,354 |
|                          | 6              | 4,082             | 5,104 | 5,306 | 5,510 | 5,510 | 5,024 |
|                          | 7              | 4,040             | 4,850 | 5,150 | 5,354 | 5,253 | 4,638 |

\* – numbering of samples processed according to the regimes listed in Table 2.

According to the analysis of the obtained results, it can be concluded that the addition of potassium iodide to the finishing composition significantly reduces the level of its wash-out during washing, which is positive.

In order to make sure that the proposed addition of potassium iodide significantly delays the antimicrobial drug in the structure of the fibrous polymer, it is necessary to conduct antimicrobial studies of washed samples of treated fabrics. The effectiveness of antimicrobial treatment of tissues prepared by a one-stage continuous method, which after preparation were washed according to the above-mentioned method, was determined by the agar method.

The data used to evaluate the effectiveness of the antimicrobial effect of the treated and then washed samples are presented in the Table 7.

Table 7 – Results of antimicrobial tests of prepared samples after household washing

| No. of the sample | Zone of delay, mm |             | Total zone, mm |             | Point assessment |             |
|-------------------|-------------------|-------------|----------------|-------------|------------------|-------------|
|                   | Washing №5        | Washing №10 | Washing №5     | Washing №10 | Washing №5       | Washing №10 |
| 1                 | 0                 | 0           | 24             | 23          | 1                | 1           |
| 2                 | 0                 | 0           | 23             | 23          | 2                | 2           |
| 3                 | 0                 | 0           | 23             | 22          | 3                | 3           |
| 4                 | 2                 | 0           | 24             | 24          | 4                | 3           |
| 5                 | 2                 | 0           | 23             | 24          | 4                | 3           |
| 6                 | 5                 | 3           | 24             | 24          | 5                | 5           |
| 7                 | 7                 | 4           | 25             | 25          | 5                | 5           |

Table 8 – Results of determination of antimicrobial activity of fabric samples after household washing

| Processing composition | Activity, points |         |             |                  |
|------------------------|------------------|---------|-------------|------------------|
|                        | S. aureus        | E. Coli | B. subtilis | Candida albicans |
| 1                      | 1                | 1       | 1           | 1                |
| 2                      | 2                | 1       | 1           | 1                |
| 3                      | 4                | 2       | 4           | 2                |
| 4                      | 4                | 3       | 3           | 4                |
| 5                      | 4                | 3       | 4           | 3                |
| 6                      | 5                | 4       | 5           | 4                |
| 7                      | 5                | 4       | 5           | 4                |

During the final processing of textile materials with various finishes, the fabrics become denser and harder, which worsens the consumer properties of the fabrics. Therefore, to soften textile materials and give them elasticity, it is necessary to use special preparations – softeners. Therefore, the next stage of the work was to investigate how the addition of antimicrobial drugs affects the stiffness of the investigated tissues. The results are shown in Fig. 3.

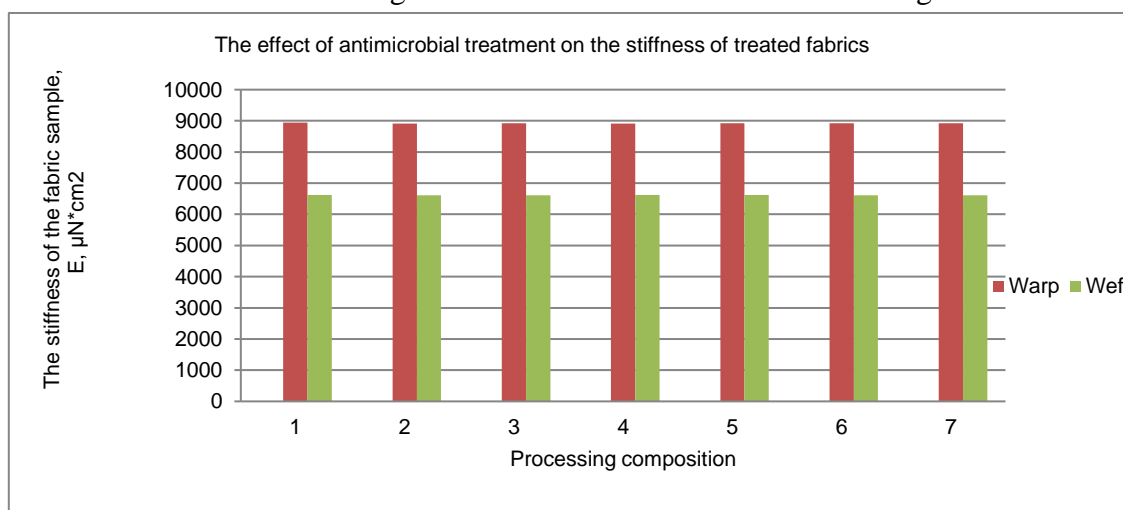


Fig. 3. The effect of antimicrobial treatment on the stiffness of treated fabrics

It was found that the influence of antimicrobial agents on the stiffness of textile materials is extremely insignificant.

It is known that hygroscopicity is the property of fabric to change its moisture depending on the humidity and temperature of the environment. Bed linen fabrics should have this property in the first place: they should easily absorb the moisture released by the human body and evaporate it into the environment, thus maintaining the human body in a hygienic state. The hygroscopicity of fabrics is characterized by the normal moisture content of the fibres that make up the fabric, that is, the moisture content of the fibers under normal conditions.

Moisture binds to materials in different ways. According to the intensity of the bond energy, these methods are divided into 3 groups: chemical, physicochemical, and physicomechanical.

Chemically bound moisture, which is not removed during the drying process, is best retained by the material. Adsorption moisture is a physical and chemical method of moisture connection with the material. Adsorption processes are greatly influenced by the chemical structure of the absorbent material. The sorption properties of high-polymer compounds that make up fibres depend on the presence of hydrophilic groups in the polymer molecule that actively interact with water molecules (hydroxyl –OH, carboxyl –COOH, carboamide –CONH, etc.), as well as on the packing density and molecular fibres weight.

Depending on the number of hydrophilic groups that have the ability to attract and retain water around them, textile fibres have greater or lesser hygroscopicity, therefore, at the same relative humidity and air temperature, different textile materials have different moisture capacities.

When absorbing moisture, the fibres swell, which increases the volume of the fibre more in diameter and less in length. This phenomenon is explained by the fact that the structural elements of the fibre – macromolecules, micro fibrils, fibrils are located along the axis of the fibre or at a small angle to it. Chemically bound moisture plays the main role in the processes of moisture-heat treatment of fabrics, because it is a plasticizer of the substance of fibres, weakens intermolecular bonds and facilitates the transition of fibres to a highly elastic state.

Therefore, it was appropriate to investigate the effect of antimicrobial drugs on the hygroscopicity and capillarity of the investigated tissues. The results of the research are given in Fig. 4-5.

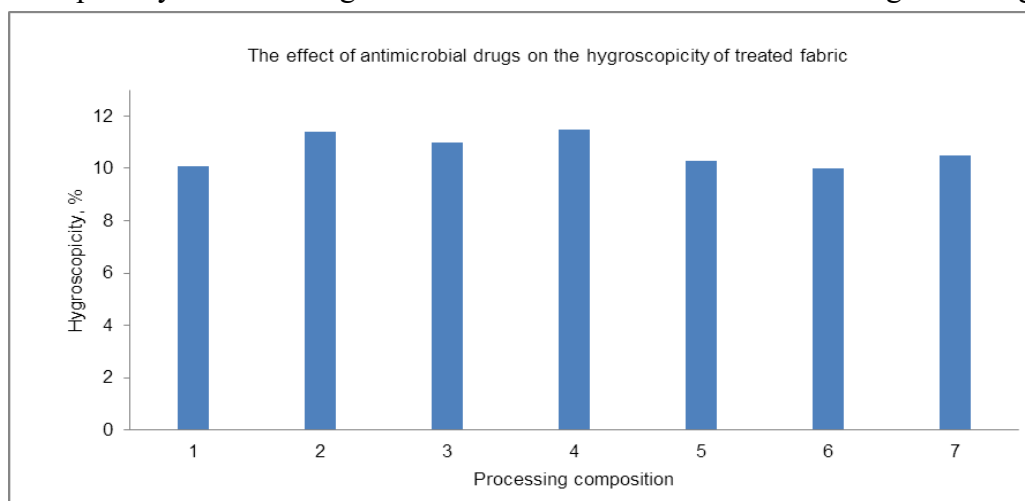


Fig. 4. The effect of antimicrobial drugs on the treated fabric hygroscopicity

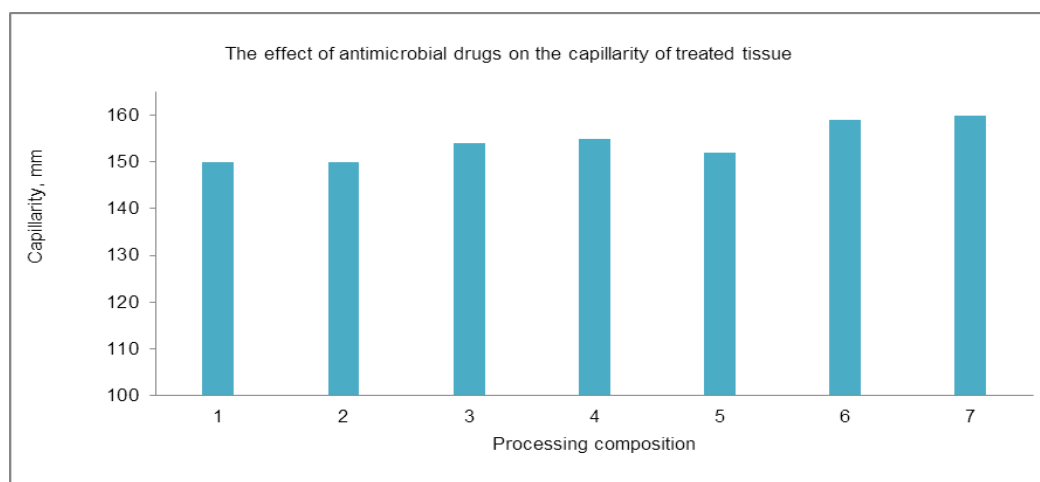


Fig. 5. The influence of antimicrobial drugs on the treated tissue capillarity

It has been established that preparations containing decamethoxine and potassium iodide increase tissue capillarity and practically do not affect hygroscopicity.

After analyzing the obtained results, it can be concluded that adding potassium iodide to the finishing composition actually increases the resistance of the finishing to washing and at the same time maintains a prolonged antimicrobial effect. Also, the main mechanical and physical parameters of the fabrics, which potentially depend on the fabric preparation process, do not change or improve slightly.

### Conclusions.

1. As a result of the work performed, a technology of antimicrobial treatment of prolonged action can be proposed, which consists in the treatment of textile materials with a coating containing an antimicrobial composition of modified starch and a cationic surface-active substance – decamethoxine and potassium iodide, which is used to fix decamethoxine in the composition of the finishing covering.

2. Treated textile materials have an antimicrobial effect that lasts for multiple washings. Addition of decamethoxine and potassium iodide to the finishing practically does not affect the stiffness and hygroscopicity of fabrics and to a small extent increases their capillarity.

3. This technology is easy to use in production, quite promising, and can be implemented on basic equipment for the final processing of fabrics.

### References

1. Dekaboruah, E., Suryavanshi, M.V., Chettri, D., Verma, A.K. (2020). Human microbiome: an academic update on human body site specific surveillance and its possible role. *Arch Microbiol*, 202(8), 2147-2167. doi: 10.1007/s00203-020-01931-x.
2. Granados, A., Pleixats, R., Vallribera, A. (2021). Recent Advances on Antimicrobial and Anti-Inflammatory Cotton Fabrics Containing Nanostructures. *Molecules*, 26(10), 3008. doi: 10.3390/molecules26103008.
3. Joseph, F. P.-J., Arun, K.J., Navas, A.A., Irene, J. (2018). Biomedical Applications of Polymers - An Overview. *Curr Trends Biomedical Eng & Biosci*, 15(2), 55-59. doi: 10.19080/CTBEB.2018.15.555909.
4. Wei, H., Leonas, K.K. (2000). Evaluating a one-bath process for imparting antimicrobial activity and repellency to nonwoven surgical gown fabrics. *Textile Research Journal*, 70.9, 774-782, doi: 10.1177/004051750007000905.
5. Ahrari, M., Araham, M., Hussain, M., Nawab, Y., Khan, A., Shirazi, A.A. (2022). Development of Anti-Bacterial and Anti-Viral Nonwoven Surgical Masks for Medical Applications. *Tekstilec*, 65(2), 135–146. doi: 10.14502/tekstilec.65.2022020.
6. Mahbulbul, B.M., Khan M.A. (2013). An overview on surface modification of cotton fiber for apparel use. *Jurnal of Polymer&Environment*, 21, 181–190. doi: 10.1007/s10924-012-0476-8.
7. Elshafei, A., El-Zanfaly, H.T. (2011). Application of antimicrobials in the development of textiles. *Asian Journal of Applied Sciences*, 4, 585–595. doi: 10.3923/ajaps.2011.585.595.
8. Gao, Y., Cranston, R. (2008). Recent advances in antimicrobial treatments of textiles. *Textile Research Journal*, 78, 60–72. doi: 10.1177/0040517507082332.
9. Simonic, B., Tomsic, B. (2010). Structures of novel antimicrobial agents for textiles. A review. *Textile Research Journal*, 80, 1721–1737. doi: 10.1177/00405175103631.
10. Hebeish, A.A., El-Rafie, M.H., Abdel-Mohdy, F.A., Abdel-Halim, E.S., & Emam, H.E. (2010). Carboxymethyl cellulose for green synthesis and stabilization of silver nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 82(3), 933-941. doi: 10.1016/j.carbpol.2010.06.020.
11. Rajkowska, K. et al. (2016). Quaternary ammonium biocides as antimicrobial agents protecting historical wood and brick. *Acta Biochimica Polonica*, 63(1), 153-159. doi:10.18388/abp.2015\_1134
12. Peter, G., Moore, L.E. (2005). Cationic antiseptics: diversity of action under a common epithet. *Journal of applied microbiology*, 99(4), 703-715. doi: 10.1111/j.1365-2672.2005.02664.x.

13. Marini, M., et al. (2007). Preparation and antibacterial activity of hybrid materials containing quaternary ammonium salts via sol-gel process. *European Polymer Journal*, 43(8), 3621-3628. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2007.06.002.
14. Gao, D., Li, Y., Lyu, B., Jim, D., Ma, J. (2020). Silicone quaternary ammonium salt based nanocomposite: A long-acting antibacterial cotton fabric finishing agent with good softness and air permeability. *Cellulose*, 27, 1055-1069. doi: 10.1007/s10570-019-02832-z.
15. Yuan, G., Cranston, R. (2008). Recent advances in antimicrobial treatments of textiles. *Textile research journal*, 78(1), 60-72. doi: 10.1177/0040517507082332.
16. Zhan, Yanlong, et al. (2022). Recent advances in antibacterial superhydrophobic coatings. *Advanced Engineering Material*, 24(4), 2101053. doi:10.1002/adem.202101053.
17. Windler, L., Murray, H., Bernd, N. (2013). Comparative evaluation of antimicrobials for textile applications. *Environment international*, 53, 62-73. doi: 10.1016/j.envint.2012.12.010.
18. Kegley, S., et al. (2016). *Pesticide action network pesticide database*. Pesticide Action Network, North America, San Francisco.
19. YAO, Chen, et al. (2008). Surface modification and antibacterial activity of electrospun polyurethane fibrous membranes with quaternary ammonium moieties. *Journal of Membrane Science*, 320(1-2), 259-267. doi: 10.1016/j.memsci.2008.04.012.
20. Yao, Chen, et al. (2010). Antibacterial poly (D, L-lactide)(PDLA) fibrous membranes modified with quaternary ammonium moieties. *Chinese Journal of Polymer Science*, 28(4), 581-588. doi: 10.1007/s10118-010-9094-x.
21. Hegstad, K. et al. (2010). Does the wide use of quaternary ammonium compounds enhance the selection and spread of antimicrobial resistance and thus threaten our health? *Microbial drug resistance*, 16(2), 91-104. doi: 10.1089/mdr.2009.0120.
22. Cai, Z., Gang, S. (2004). Antimicrobial finishing of acrilan fabrics with cetylpyridinium chloride. *Journal of applied polymer science*, 94(1), 243-247. doi: 10.1002/app.20876.
23. Cai, Z., Gang, S. (2005). Antimicrobial finishing of acrilan fabrics with cetylpyridinium chloride: Affected properties and structures. *Journal of applied polymer science*, 97(3), 1227-1236. doi: 10.1002/app.21261.

### References (in language original)

1. Human microbiome: an academic update on human body site specific surveillance and its possible role / E. Dekaboruah, M. V. Suryavanshi, D. Chettri, A. K. Verma // Arch Microbiol. – 2020. – № 202(8). – P. 2147-2167. DOI: 10.1007/s00203-020-01931-x.
2. Granados, A. Recent Advances on Antimicrobial and Anti-Inflammatory Cotton Fabrics Containing Nanostructures / A. Granados, R. Pleixats, A. Vallribera // Molecules. – 2021. – № 26(10). – 3008. DOI: 10.3390/molecules26103008.
3. Biomedical Applications of Polymers -An Overview / F. P.-J. Joseph, K. J. Arun, A. A. Navas, J. Irene // Curr Trends Biomedical Eng & Biosci. – 2018. – № 15(2). – C. 55-59. DOI: 10.19080/CTBEB.2018.15.555909.
4. Wei, H. Evaluating a one-bath process for imparting antimicrobial activity and repellency to nonwoven surgical gown fabrics / H. Wei, K. K. Leonas // Textile Research Journal. – 2000. – № 70.9. – P. 774-782. DOI: 10.1177/004051750007000905.
5. Development of Anti-Bacterial and Anti-Viral Nonwoven Surgical Masks for Medical Applications / M. Ahrari, M. Araham, M. Hussain, Y. Nawab, A. Khan, A. A. Shirazi // Tekstilec. – 2022. – № 65(2). – P. 135-146. DOI: 10.14502/tekstilec.65.2022020.
6. Mahbul, B. M. An overview on surface modification of cotton fiber for apparel use / B. M. Mahbul, M. A Khan // Jurnal of Polymer&Environment. – 2013. – № 21. – P. 181-190. DOI: 10.1007/s10924-012-0476-8.
7. Elshafei, A. Application of antimicrobials in the development of textiles / A. Elshafei, H. T. El-Zanfaly // Asian Journal of Applied Sciences. – 2011. – № 4. – C. 585-595. DOI: 10.3923/ajaps.2011.585.595.

8. Gao, Y. Recent advances in antimicrobial treatments of textiles/ Y. Gao, R. Cranston // *Textile Research Journal*. – 2008. – № 78. – P. 60-72. DOI: 10.1177/0040517507082332.
9. Simoncic, B. Structures of novel antimicrobial agents for textiles. A review / B. Simoncic, B. Tomsic // *Textile Research Journal*. – 2010. – № 80. – Pp. 1721-1737. DOI: 10.1177/00405175103631.
10. Carboxymethyl cellulose for green synthesis and stabilization of silver nanoparticles / A. A. Hebeish, M. H. El-Rafie, F. A. Abdel-Mohdy, E. S. Abdel-Halim, H. E. Emam // *Carbohydrate Polymers*. – 2010. – № 82(3). – P. 933-941. DOI: 10.1016/j.carbpol.2010.06.020.
11. Rajkowska, K. Quaternary ammonium biocides as antimicrobial agents protecting historical wood and brick / K. Rajkowska // *Acta Biochimica Polonica*. – 2016. – № 63(1). – Pp. 153-159. DOI:10.18388/abp.2015\_1134.
12. Peter, G. Cationic antiseptics: diversity of action under a common epithet / G. Peter, L. E. Moore // *Journal of applied microbiology*. – 2005. – № 99(4). – P. 703-715. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2005.02664.x.
13. Marini, M. Preparation and antibacterial activity of hybrid materials containing quaternary ammonium salts via sol-gel process / M. Marini // *European Polymer Journal*. – 2007. – № 43(8). – P. 3621-3628. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2007.06.002.
14. Silicone quaternary ammonium salt based nanocomposite: A long-acting antibacterial cotton fabric finishing agent with good softness and air permeability / D. Gao, Y. Li, B. Lyu, D. Jim, J. Ma // *Cellulose*. – 2020. – № 27. – Pp. 1055-1069. DOI: 10.1007/s10570-019-02832-z.
15. Yuan, G. Recent advances in antimicrobial treatments of textiles / G. Yuan, R. Cranston // *Textile research journal*. – 2008. – № 78(1). – Pp. 60-72. DOI: 10.1177/0040517507082332.
16. Yanlong, Z. Recent advances in antibacterial superhydrophobic coatings / Z. Yanlong // *Advanced Engineering Material*. – 2022. – № 24(4). – P. 2101053. DOI:10.1002/adem.202101053.
17. Windler, L. Comparative evaluation of antimicrobials for textile applications / L. Windler, H. Murray, N. Bernd // *Environment international*. – 2013. – № 53. – Pp. 62-73. DOI: 10.1016/j.envint.2012.12.010.
18. Kegley, S. Pesticide action network pesticide database / S. Kegley. – San Francisco : Pesticide Action Network, 2016.
19. Yao, C. Surface modification and antibacterial activity of electrospun polyurethane fibrous membranes with quaternary ammonium moieties / C. Yao // *Journal of Membrane Science*. – 2008. – № 320(1-2). – P. 259-267. DOI: 10.1016/j.memsci.2008.04.012.
20. Yao, C. Antibacterial poly (D, L-lactide)(PDLLA) fibrous membranes modified with quaternary ammonium moieties / C. Yao // *Chinese Journal of Polymer Science*. – 2010. – № 28(4). – P. 581-588. DOI: 10.1007/s10118-010-9094-x.
21. Hegstad, K. Does the wide use of quaternary ammonium compounds enhance the selection and spread of antimicrobial resistance and thus threaten our health? / K. Hegstad // *Microbial drug resistance*. – 2010. – № 16(2). – P. 91-104. DOI: 10.1089/mdr.2009.0120.
22. Cai, Z. Antimicrobial finishing of acrilan fabrics with cetylpyridinium chloride / Z. Cai, S. Gang // *Journal of applied polymer science*. – 2004. – № 94(1). – P. 243-247. DOI: 10.1002/app.20876.
23. Cai, Z. Antimicrobial finishing of acrilan fabrics with cetylpyridinium chloride: Affected properties and structures / Z. Cai, S. Gang // *Journal of applied polymer science*. – 2005. – № 97(3). – Pp. 1227-1236. DOI: 10.1002/app.21261.

Отримано 18.11.2023

**Олена Іщенко<sup>1</sup>, Ольга Сумська<sup>2</sup>, Катерина Смикало<sup>3</sup>,  
Юлія Фещук<sup>4</sup>, Дарія Кучинська<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження  
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)

**E-mail:** [e\\_ishchenko5@gmail.com](mailto:e_ishchenko5@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9510-6005>  
**ResearcherID:** GYV-0809-2022. **Scopus Author ID:** 57200013816

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри харчових технологій  
Херсонський державний аграрно-економічний університет (Кропивницький, Україна)

**E-mail:** [sumskaetdt@gmail.com](mailto:sumskaetdt@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1606-6103>  
**ResearcherID:** 91.215.68.126. **Scopus Author ID:** 57204470556

<sup>3</sup>здобувач вищої освіти

Херсонській національний технічний університет (Хмельницький, Україна),  
доктор філософії, викладач студії моди (Луцьк, Україна)

**E-mail:** [smykalo.kateryna@vnu.edu.ua](mailto:smykalo.kateryna@vnu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9670-6563>  
**ResearcherID:** E-7755-2017. **Scopus Author ID:** 57809016000

<sup>4</sup>лаборант кафедри харчових технологій

Херсонський державний аграрно-економічний університет (Кропивницький, Україна)

**E-mail:** [yulka131417@gmail.com](mailto:yulka131417@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0510-6325>. **Researcher ID:** JOK-4531-2023

<sup>5</sup>аспірант кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження

Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)

**E-mail:** [dkuchinska@gmail.com](mailto:dkuchinska@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-5928-6639>

## АНТИМІКРОБНА ОБРОБКА ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Використання текстильних матеріалів з антимікробною обробкою є одним із способів ефективного захисту людини від впливу різних збудників. Стаття присвячена актуальному питанню розробки інноваційних текстильних матеріалів з пролонгованою антимікробною обробкою. Встановити можливість та особливості одержання інноваційних текстильних матеріалів з пролонгованою антимікробною обробкою. Для підготовки цієї статті було розглянуто публікації стосовно препаратів та технологій одержання антисептичних текстильних матеріалів, які були у відкритому доступі. Незважаючи на те, що дослідження за цією тематикою проводилися, але для отримання пролонгованого ефекту необхідно приділити особливу увагу проблемі фіксації протимікробного препарату.

Визначено склад композиції, особливості обробки текстильного матеріалу; досліджено вплив полімерного носія, фіксатора на стійкість заключної обробки з антимікробним ефектом. Для отримання пролонгованого антимікробного ефекту було вирішено проблему фіксації антимікробного препарату на текстильному матеріалі за допомогою розробленої композиції препарату. Запропоновано опоряджувальна суміш, яка містить – карбоксиметильований крохмаль, декаметоксин як бактерицидний препарат і засіб для їх закріплення на текстильному матеріалі – йодистий калій. Досліджено вплив компонентів на сорбційні властивості бавовняною тканиною та виявлено збільшення цього показнику на оброблених тканинах. Це пояснюється утворенням іонного зв'язку між карбоксиметильними групами та декаметоксином. Встановлено технологічні особливості нанесення пролонгованої антимікробної обробки текстильного матеріалу, одностадійним безперервним способом апретування.

Показано вплив полімерного носія та фіксатора на стійкість заключної антимікробної обробки. Наведено результати антимікробних досліджень підготовлених зразків, оброблених технологічними методами. Встановлено, що тканина, виготовлена за запропонованими технологічними режимами, має антимікробну дію, стійка до багаторазових прань. Розроблена технологія є перспективною і може бути реалізована на обладнанні опоряджувальних фабрик.

**Ключові слова:** антимікробний захист; декаметоксин; модифіковані полісахариди; застосування; четвертинна амонійна сіль; текстиль; антимікробний засіб.

Рис.: 5. Табл.: 8. Бібл.: 23.



**Viktoriia Plavan<sup>1</sup>, Natalia Tarasenko<sup>2</sup>, Iryna Lisovska<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving  
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [plavan.vp@kntud.edu.ua](mailto:plavan.vp@kntud.edu.ua). ORCIDID: <https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>

ResearcherID: I-5852-2015. SCOPUS Author ID: 6603130130

<sup>2</sup>Senior Lecturer, Department of General and Inorganic Chemistry  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [tarasenko.nv@ukr.net](mailto:tarasenko.nv@ukr.net). ORCIDID: <https://orcid.org/0000-0003-1062-5533>

Researcher ID: J-7632-2017

<sup>3</sup>Associate professor, Department of General and Inorganic Chemistry  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [lisovskayai@ukr.net](mailto:lisovskayai@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-5976>

ResearcherID: J-8005-2017

**APPLICATION OF FIBROUS MATERIALS WITH SORPTION PROPERTIES  
IN WATER PURIFICATION TECHNOLOGIES**

*The algorithm for the technological process of obtaining a chemisorption composite material based on waste chemical fibers filled with clay powders for the purification of wastewater from heavy metal ions has been developed. Non-woven materials obtained from polyurethane-polyamide chemical fiber waste were used as a basis in the work. To increase the mechanical strength, they were fastened by the needle punching method with a knitted fabric with a surface density of 240 g/m<sup>2</sup>, which was made by plaited weaving using cotton yarn with a linear density of 25 tex and polyethylene complex threads with a linear density of 16.5 tex on a single-font circular knitting machine of the MS type. To strengthen the sorption capacity, clay powders of the montmorillonite type were introduced into the fibrous base in the form of filled dispersions of starch (2-3 %) or polyvinyl alcohol (3%) in the amount of 5 to 10% of the mass of the dispersion.*

*Sorption-filtering fibrous material filled with clay minerals can be used for wastewater treatment of light and chemical industry enterprises. The use of clay minerals through their introduction into the fibrous base will reduce the hydraulic resistance of the sorbent layer, without using a sorbent of coarse fractions, which will preserve the area of the active absorbing surface. Wastewater treatment can be carried out by passing water through a sorption-filtering element. Cleaning installations can accommodate several sorption-filtering elements at the same time, which increases the efficiency of water purification. It is possible to use chemisorption composite material for cleaning silted drains without the threat of adsorbent clogging, and in return water supply systems, which will reduce the risk of depositing mineral salts on the walls of water purification equipment and ensure high-quality operation of treatment facilities.*

**Keywords:** water purification technologies; chemisorption composite material, sorption-filtering element; non-woven materials; clay minerals; starch; polyvinyl alcohol.

Fig.: 2. Bibl.: 13.

**Introduction.** The post-war reconstruction of Ukraine will inevitably lead to an increase in the use of natural resources and consumer waste, which in turn will increase the anthropogenic load on the environment. Reducing the volume of waste generation and advancing its processing; reuse based on innovative technologies and production is one of the tasks of achieving sustainable development of Ukraine. In addition, the country's water management complex requires improvement, primarily taking into account the need to achieve a balance in the processes of use and reproduction of water resources, in order to provide the population and industrial users with water of appropriate quality.

Currently, there is growing interest among researchers in the use of sorption and filter materials for wastewater treatment. Water purification technologies based on sorption and filter materials are distinguished from other technologies by their high efficiency and versatility. They combine filtration and sorption processes to remove not only mechanical impurities from water, but also heavy metal ions and organic substances that can be harmful to the environment and human health.

Clay minerals are actively used as adsorbents for the removal of dangerous chemical products of organic and inorganic origin in water purification technologies due to their specific layered structure, large surface area of particles, porosity, presence of active centers, high cation exchange capacity [1].

Bentonite clays in their natural or activated form, that is, after chemical treatment with acids, have good adsorption properties and are widely used as a natural adsorbent for cleaning products of the oil refining, by-product coke, and food industries. Thus, with a fraction size of 0.5-1 mm, the absorption capacity of heavy metal cations of natural montmorillonite bentonite is 1821 mg/100g [2]. Bentonite is used in the mining industry for the preparation of drilling fluids, as well as a natural adsorbent, filler.

Some known sorbents [3] often do not have the necessary sorption capacity to bind metals to a sufficient extent, for example, from highly concentrated or low-concentrated solutions or from strongly acidic solutions, in particular, also in the presence of alkali or alkaline earth metal ions. In addition, the previously known sorbents are often not stable in the entire pH range from 0 to 14. Due to the almost always unsatisfactory sorption capacity of known sorbents, a large volume of sorbent is often required, or the process must be repeated many times, for example, to ensure obtaining water that does not contain heavy metals. As a result, metal bonding processes are very time-consuming and expensive.

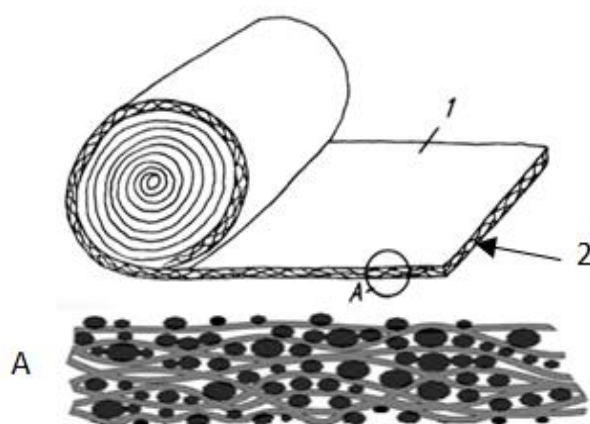
The study [4] considers the use of combined filtration and sorption systems for the manufacture of pleated filters. The researched materials consist of several structural layers — a filter membrane made of polymer nanofibers, an adsorbent containing nanofibers of activated carbon or porous silicon dioxide, a supporting or covering non-woven two-component fabric. The layers are connected only by pressure at high temperature without the use of binders. Centrifugal spinning has been shown to produce flexible, compact and uniform filtration membranes with good separation properties of submicron particles.

The composition of the filter material for drinking water purification, which contains a mixture of cotton and wood cellulose, glass fiber, activated carbon and melamine formaldehyde resin, is known. This mixture is treated with binder and latex. The proposed composition of the filter material allows to reduce the amount of suspended substances, active chlorine and dyes in the water [5]. The main disadvantage of this material is that it shows insufficient water purification efficiency, in particular in relation to iron and manganese compounds.

**Target setting.** The purpose of the work is to develop an algorithm for the technological process of obtaining chemisorption composite material based on waste chemical fibers and introducing it into wastewater treatment systems in order to reduce the pollution of water resources by salts of heavy metals.

**Research methodology.** Based on the results of theses [6], a method of obtaining a composite material with sorption properties on a fibrous base filled with clay powders is proposed (Fig. 1). Non-woven materials obtained from waste polyurethane-polyamide chemical fibers were used as the fibrous base, and to increase mechanical strength, they were fastened by the needle punch method with a knitted fabric with a surface density of 240 g/m<sup>2</sup>, which was made by plaited weaving using cotton yarn with a linear density of 25 tex and of polyethylene complex threads with a linear density of 16.5 tex on a single-thread circular knitting machine of the MS type.

To strengthen the sorption capacity, clay powders of the montmorillonite type were introduced into the fibrous base in the amount of 5 to 10% of the weight of the non-woven material in the form of saturated aqueous dispersions of starch (2-3 %) or polyvinyl alcohol (3 %). Filling with clay powders makes it possible to improve the sorption capacity of the material due to the increase of the specific surface area and the phenomenon of chemoadsorption on the active centers of clay minerals, which will increase the efficiency of wastewater treatment of light and chemical industry enterprises.



*Fig. 1. Scheme of chemisorption composite material filled with dispersions of clay minerals, based on waste polyurethane-polyamide chemical fibers:  
1 – knitted base; 2 – non-woven material from polyurethane-polyamide chemical fibers filled with clay minerals (A)*

Increasing the amount of clay powders in the structure of fibrous material by more than 10 % is not rational, because it does not lead to a significant increase in the sorption capacity of the obtained materials due to a decrease in the surface area and pore volume of the obtained materials.

Reducing the concentration of solutions of polyvinyl alcohol and starch to 0.5 % to obtain filled dispersions does not ensure the fixation of clay powders in the structure of the fibrous material, which leads to the deterioration of its sorption characteristics. An increase in the concentration of solutions of polyvinyl alcohol and starch above 3 % leads to obtaining viscous dispersions, which complicates the uniform application and distribution of clay powders in the structure of the fibrous material and worsens its sorption and filtration properties.

Filled dispersions of starch and PVA can be applied to the surface of the fibrous base by the spreading or rolling method. After application, the resulting composite material must be dried for 60 minutes at  $t=100^{\circ}\text{C}$ . For use in water purification technologies, the obtained material is placed in plastic lattice housings by repeated bending and twisting.

As a result of the research, results were obtained regarding the influence of the mechanical activation process on the dimensional characteristics and shape of particles of clay powders of the montmorillonite and palygorskite types [7]. It was established that the reduction of the average values of the equivalent diameter of particles in the process of mechanical impact ( $\sim$  by 14–15 %) is realized mainly due to the destruction of their largest aggregates. At the same time, the intensity of this process is significantly higher for clay of the montmorillonite type. It is shown that for both studied samples that the process of mechanoactivation leads to an increase in the average values of the particle shape indicator (the shape is approaching spherical, characterized by a higher surface area) and an increase in the homogeneity of their distribution according to this indicator. Acid activation of clays also significantly increases their sorption capacity due to an increase in the specific surface area of the sample, as well as due to the phenomenon of chemoadsorption on the cationic centers of clay minerals [8-9].

The concentration of the polymer binder and the amount of mineral sorbent affect the surface density and mechanical characteristics of fibrous materials impregnated with dispersions of starch and PVA [10]. The application of 3 % water-polymer dispersion of PVA or 2–3 % starch dispersion with the introduction of 5 % clay by mass of the binder ensures the production of sufficiently elastic fibrous materials with good strength indicators. In addition,

taking into account the previously obtained results that the treatment of the fibrous base with 3 % dispersions of PVA and starch filled with clay minerals helps to increase the sorption capacity of the obtained materials, these fibrous composites can be recommended for water purification technologies.

**Results and discussion.** The algorithm of the technological process of obtaining chemisorption composite material based on waste polyurethane-polyamide chemical fibers, developed based on the results of the author's thesis [6], is shown in Fig. 2.

Based on the results of the research, it can be stated that the proposed algorithm describes an effective and efficient method of obtaining a chemisorption material suitable for the purification of wastewater from heavy metal ions. The implementation of this algorithm can have a significant impact on improving the quality of wastewater, reducing environmental pollution and ensuring the sustainability of water resources.

Parameters of the technological stages of obtaining a chemisorption composite material based on waste chemical fibers:

*Waste polyurethane-polyamide chemical fibers.* Non-woven materials obtained from waste polyurethane-polyamide chemical fibers, which are formed during the production of hosiery products, were used as the fibrous basis of chemisorption composites in the work. The combined yarn waste consisted of complex fibers Lycra 162 C, linear density 4.4 tex (PU) and textured complex fibers Nylon 6.6 f 20/1, linear density 3.3 tex (PA-6.6) in a ratio of 70/30 by weight, %.

*Preparation of fibrous raw materials.* Fibrous waste PU/PA-6,6 was pre-shredded on a staple machine with rotary knives. The cutting length was 30 mm. Next, the staple fibers were mixed with additional fibrous components in certain ratios. A ChBV carding machine was used to form the fibrous web. In the course of combing, fibers are distributed across the width of the sample, their mixing and a certain parallelization in the direction of combing occurs. After preliminary combing, the canvas was removed from the receiving drum (diameter 200 mm). Depending on the composition and quality of the obtained material, the combing operation was repeated 2-3 times until the formation of a homogeneous fibrous material in which the fibers are sufficiently evenly distributed.

*Fastening the canvas by needle punching.* The needle punching method is based on binding the fibrous canvas with its own fibers. The fibrous material is passed through the rolls of the needle punching machine. The prepared canvas of fibers is stitched on a needle punching machine with needles with serrations at the ends, which carries out stitching of the canvas.

*Increasing mechanical strength.* Fastening by the needle punch method with a knitted fabric with a surface density of 240 g/m<sup>2</sup>. In this way, mechanical strength is ensured, while the elasticity of the fabric is preserved, which allows producing of sorption-filtering elements of complex geometric shapes.

*Preparation of natural mineral clays.* The initial powdered clay sample was previously sieved through sieve No. 0071 to remove coarse impurities. Next, the clay was washed with distilled water in the ratio of solid and liquid phases of 1:100 with thorough mixing using a mechanical stirrer. After settling the resulting suspension for 24 hours, the highly dispersed fraction was decanted with a siphon into another container. The sample cleaned of impurities was centrifuged for 30 minutes and dried at 80°C in an oven to a constant weight. The obtained samples were ground in a porcelain mortar and sieved to obtain a fraction of  $\leq 0.20$  mm.

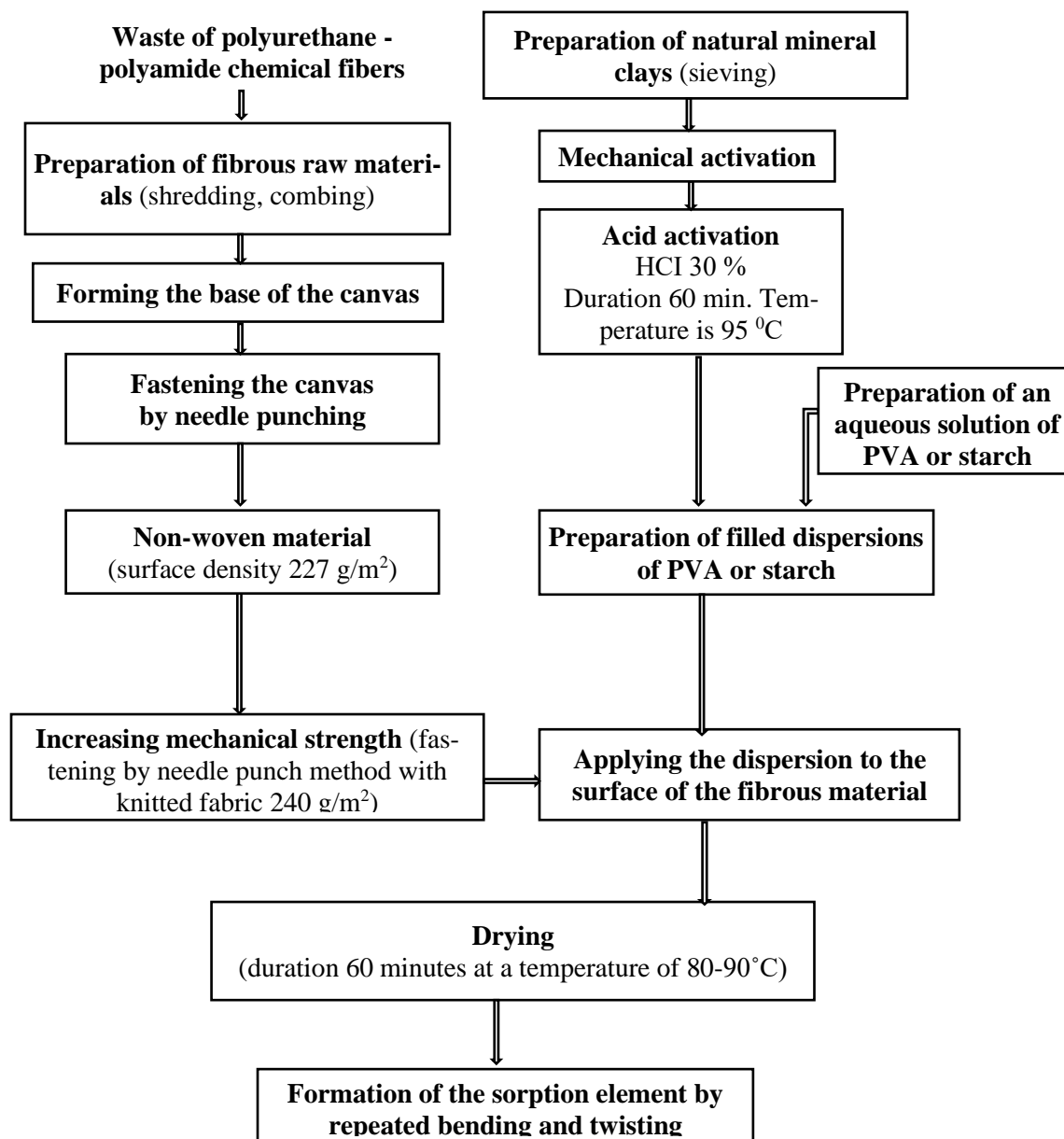


Fig. 2. Algorithm of the technological process of obtaining chemisorption composite material based on waste chemical fibers

**Mechanical activation.** A laboratory cylindrical ball mill was used for dry grinding of clay powders using 20 mm diameter ceramic balls as grinding elements. The rotation frequency of the mill was 60 rpm, the duration of processing was 20 minutes.

**Acid activation.** For acid modification of purified clay minerals, a 30 % HCl solution was used with a ratio of solid to liquid phases of 1:1.5, in a water bath at a temperature of 95–100°C with constant stirring. Processing time was 1 hour. After that, the samples were repeatedly washed with distilled water until there was a negative reaction to Cl<sup>-</sup> ions in the washing water (quality was controlled using AgNO<sub>3</sub> solution). The obtained samples were dried at 80°C in a drying cabinet to a constant mass, ground in a porcelain mortar and sieved through a sieve to obtain a fraction ≤ 0.20 mm.

**Preparation of an aqueous solution of PVA or starch.** Polyvinyl alcohol and starch of different concentrations (from 1 to 3 %) were chosen as water-soluble polymers for impregnating the fibrous base.

*Preparation of filled dispersions of PVA or starch.* To increase the sorption capacity of materials, montmorillonite-type clay powder in the amount of 5-10% of the mass of the binder was added to aqueous solutions of polymer binders of various concentrations.

*Applying a dispersion to the surface of a fibrous material.* The resulting dispersion was applied with a squeegee knife to the surface of fibrous materials until a homogeneous continuous coating layer was obtained.

*Drying.* Duration 60 minutes at 100C.

*Formation of a sorption element.* A kind of "cassettes" were made from filled fibrous cloths on a knitted basis by repeatedly folding and twisting the material and placing it in a plastic lattice case.

Wastewater treatment with natural sorbents can be carried out by two methods - passing water through a sorbent layer, or mixing water with a sorbent followed by separation [10]. Both methods have their advantages and disadvantages. Passing water avoids the stage of separation of spent sorbent. The disadvantage of this method is the significant hydraulic resistance of the finely ground sorbent layer. It is possible to reduce the resistance by using a sorbent of coarse fractions, but then the area of the active absorbing surface is significantly reduced. In the process of grinding natural sorbents, regardless of the size of the obtained fraction, a certain amount of dusty product is formed, which is washed out with water at the initial stage of processing. In this case, it is necessary to provide for the stage of water purification from finely dispersed sorbent.

The use of clay minerals through their introduction into the fibrous base will allow to reduce the hydraulic resistance of the sorbent layer without using a sorbent of coarse fractions, which will not cause a decrease in the area of the active absorbing surface. The use of clay minerals in the form of dispersions of water-soluble polymers will ensure the formation of a dust-like product at the initial stage of processing, accordingly, there will be no need to purify water from finely dispersed sorbent.

As the results of our research showed, a noticeable decrease in the concentration of heavy metal ions (for example,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ) occurs within 24 hours of processing in static conditions, which does not contradict the results of experiments conducted by other authors [11; 12].

The presence of a fibrous base will allow combining sorption and filtering properties, which will increase the efficiency of wastewater treatment. It is possible to use such an adsorbent for muddy drains without the threat of clogging of the adsorbent. Cleaning installations can accommodate several sorption-filtering elements at the same time, which increases the efficiency of water purification. The cost of natural dispersed sorbents is small, it is impractical to regenerate spent sorbents, since the cost of regeneration will be much higher than the cost of a new sorbent.

At enterprises, the main role in water supply is played by return water supply systems [13]. At the same time, the water repeatedly evaporates, heats, cools, aerates, repeatedly contacts the cooling surface and gradually becomes more mineralized. Often, water quality deteriorates, mechanical pollution and corrosion products gradually accumulate, which can lead to the deposition of mineral salts on the walls of pipes and equipment. Therefore, to restore water quality, the circulating water supply system is fed with fresh water. In normal recirculating water supply systems that do not have specific contaminants, it is possible to prevent the increase in mineralization of recirculating water by cleaning with coagulants and flocculants. The water used for cooling systems through the walls of the heat exchange equipment should not contain hydrogen sulfide or iron, an excess of suspended matter. In addition, corrosion resistance of heat exchange equipment and communications is ensured only with an optimal narrow pH range and a low salt content in water. For such systems, it is recommended to adjust the pH of the circulating

water, as well as take measures to reduce the salt content. Depending on the quality of the source water and the requirements for the quality of the consumed water, part of the total consumption of recycled water may undergo additional purification.

Therefore, it is possible to offer created fibrous materials with sorption properties for use in return water supply systems to reduce water pollution by mineral salts, in particular, iron salts, which will reduce the risk of depositing mineral salts on the walls of water purification equipment and ensure the high-quality operation of water purification facilities.

**Conclusions.** An algorithm for the technological process of creating chemisorption composite materials based on waste chemical fibers filled with clay powders has been developed. Filling with clay powders makes it possible to improve the sorption capacity of the material due to the increase of the specific surface area and the phenomenon of chemoadsorption on the active centers of clay minerals, which will increase the efficiency of wastewater treatment of light and chemical industry enterprises.

Applying a 3% dispersion of polyvinyl alcohol or a 2-3 % dispersion of starch on a fibrous base with the introduction of 5% clay of the montmorillonite type helps to obtain materials with increased sorption capacity. The introduction of highly dispersed particles of clay minerals into the fibrous base, as chemosorbents, will allow combining absorption and filtering properties.

Wastewater treatment with natural sorbents can be carried out by passing water through a sorption-filtering element. The use of clay minerals through their introduction into the fibrous base will reduce the hydraulic resistance of the sorbent layer, which will not lead to a decrease in the area of the active absorbing surface. The use of clay minerals in the form of dispersions of water-soluble polymers will ensure the formation of a dust-like product at the initial stage of processing, accordingly, there will be no need to purify water from finely dispersed sorbent.

The fibrous base will allow combining sorption and filtering properties, which will increase the efficiency of wastewater treatment. It is possible to use such an adsorbent for muddy drains without the threat of clogging of the adsorbent. Cleaning installations can accommodate several sorption-filtering elements at the same time, which increases the efficiency of water purification.

### References

1. Milichovský, M., Češek, B., Filipi, M., Gojny, J. (2014). Cellulosic Sorption Filter Materials with Surface Flocculation Activity—A Hopeful Anticipation of Water Purification. *Journal of Water Resource and Protection*, 6(3), 165–176. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2014.63022>.
2. Duong, D.D. (1998). *Adsorption analysis: Equilibria and kinetics*. Imperial College Press.
3. Morrison, F.A. (2001). *Understanding Rheology*. Oxford University Press.
4. Otrisal, P., Obsel, V., Buk, J., Svorc, L. (2018). Preparation of Filtration Sorptive Materials from Nanofibers, Bicofibers, and Textile Adsorbents without Binders Employment. *Nanomaterials*, 8(8), 564–582. <https://doi.org/10.3390/nano8080564>.
5. Ternovtsev, O.V., Zorya, O.V., Ternovtsev, V.O. (2002). *Filtruiuche-sorbtsiyni material dlia ochyshchennia vody (Ukrainskyi deklaratsiyni patent na vynakhid № 48334 A) [Filtration-sorption material for water purification (Ukrainian declaratory patent for the invention No. 48334 A)]*. Ministry of Education and Science of Ukraine, State Department of Intellectual Property.
6. Tarasenko, N.V. (2023). *Stvorennia khemosorbtsiynikh kompozytsiynikh materialiv na osnovi voloknystykh vidkhodiv dlia ochyshchennia vodnykh rozchyniv vid ioniv vazhkykh metaliv [Creation of chemisorption composite materials based on fibrous waste for purification of aqueous solutions from heavy metal ions]*. [PhD thesis]. Kyiv National University of Technologies and Design.
7. Budash, Yu.O., Tarasenko, N.V., Plavan, V.P., Zatulokin, I.M., Shylintseva, T.M. (2021). Vplyv mekhanichnoi aktyvatsii na rozmirni kharakterystyky ta formu chastynok hlynoporoshkiv riznogo typu [The effect of mechanical activation on the dimensional characteristics and shape of clay powder particles of different types]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh – Technology and engineering*, 4, 59–62. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.4.6>.

8. Tarasenko, N.V., Plavan, V.P., Budash, Yu.O., & Tkachenko, I.M. (2021). Doslidzhennia sorbtsiinykh vlastyvostei voloknystykh materialiv, modyfikovanykh hlynystymy mineralamy [Investigation of sorption properties of fibrous materials modified with clay minerals]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh – Technology and engineering*, 140(3), 70-78. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.3.7>.

9. Budash, Y., Plavan, V., Tarasenko, N., Ishchenko, O., Koliada, M. (2023). Effect of Acid Modification on Porous Structure and Adsorption Properties of Different Type Ukrainian Clays for Water Purification Technologies. *Journal of Ecological Engineering*, 24(5), 210–221. <https://doi.org/10.12911/22998993/161691>.

10. Plavan, V.P., Ishchenko, O.V., Tarasenko, N.V., Budash, Yu.O., Kolodii, A.I. (2023). Zastosuvannia napovnenykh dyspersii vodorozchynnykh polimeriv dlia funktsionalizatsii voloknystykh materialiv [Application of filled dispersions of water-soluble polymers for functionalization of fibrous materials]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh – Technology and engineering*, 1(12), 73-85. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.1.7>.

11. Sakalova, H.V., Vasylynych, T.M. (2019). *Doslidzhennia efektyvnosti ochyshchennia stichnykh vod vid ioniv vazhkykh metaliv z vykorystanniam pryrodnykh adsorbentiv [Study of the efficiency of wastewater treatment from heavy metal ions using natural adsorbents]*. VDPU im. Mykhaila Kotsiubynskoho.

12. Malyovany, M.S., Sakalova, H.V., Vasylynych, T.M., Bratushchak, A.O. (2016). Doslidzhennia zdatnosti hlynystykh sorbentiv do adsorbtsii ioniv vazhkykh metaliv [Study of the ability of clay sorbents to adsorb heavy metal ions]. In Khlobistov E.V. (Ed.), *Sustainable development of the 21st century: management, technologies, models – Discussions 2016* (pp. 575–585). Chabanenko Yu.

13. Stepova, O.V., Trokhymenko, H.H. (2022). *Tekhnolohii zakhystu vodnoho seredovyscha [Water environment protection technologies]*. NU «Poltavska politekhnika imeni Yurii Kondratiuka».

### References (in language original)

1. Cellulosic Sorption Filter Materials with Surface Flocculation Activity—A Hopeful Anticipation of Water Purification / Miloslav Milichovský, Břetislav Češek, Michaela Filipi, Jan Gojny // *Journal of Water Resource and Protection*. – 2014. – Vol. 6(3). – Pp. 165–176. – Accessed mode: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2014.63022>.

2. Duong, D. D. Adsorption analysis: Equilibria and kinetics / D. D. Duong. – Imperial College Press, 1998.

3. Faith, A. Morrison. Understanding Rheology / A. Faith. – Oxford University Press, 2001.

4. Preparation of Filtration Sorptive Materials from Nanofibers, Bicofibers, and Textile Adsorbents without Binders Employment / Pavel Otrisal, Vladimir Obsel, Jan Buk, Lubomír Svorc // *Nanomaterials*. – 2018. – Vol. 8(8). – 564–582. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano8080564>.

5. Терновцев, О. В. Фільтруюче-сорбційний матеріал для очищення води (Український деклараційний патент на винахід № 48334 А) [Електронний ресурс] / О. В. Терновцев, О. В. Зоря, В. О. Терновцев // Міністерство освіти і науки України, Державний департамент інтелектуальної власності. – 2002. – Режим доступу: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=74463>.

6. Тарасенко, Н. В. Створення хемосорбційних композиційних матеріалів на основі волокнистих відходів для очищення водних розчинів від іонів важких металів : дис. д-ра філософії / Київський національний університет технологій та дизайну. – Київ, 2023.

7. Вплив механічної активації на розмірні характеристики та форму частинок глинопорошків різного типу / Ю. О. Будащ, Н. В. Тарасенко, В. П. Плаван, І. М. Затолокін, Т. М. Шилінцева // *Технології та інжиніринг*. – 2021. – № 4. – С. 59–62. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.4.6>.

8. Дослідження сорбційних властивостей волокнистих матеріалів, модифікованих глинистими мінералами / Н. В. Тарасенко, В. П. Плаван, Ю. О. Будащ, І. М. Ткаченко // *Технології та інжиніринг*. – 2021. – № 3. – С. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.3.7>.

9. Effect of Acid Modification on Porous Structure and Adsorption Properties of Different Type Ukrainian Clays for Water Purification Technologies / Yurii Budash, Viktoriia Plavan, Nataliia Tarasenko, Olena Ishchenko, Maksym Koliada // *Journal of Ecological Engineering*. – 2023. – Vol. 24(5). – Pp. 210–221. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/161691>.



10. Застосування наповнених дисперсій водорозчинних полімерів для функціоналізації волокнистих матеріалів / В. П. Плаван, О. В. Іщенко, Н. В. Тарасенко, Ю. О. Будащ, А. І. Колодій // Технології та інжиніринг. – 2023. – № 1(12). – С. 73–85. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.1.7>.

11. Сакалова, Г. В. Дослідження ефективності очищення стічних вод від іонів важких металів з використанням природних адсорбентів / Г. В. Сакалова, Т. М. Василінич. – Вінниця : ВДПУ ім. Михайла Коцюбинського, 2019. – 92 с.

12. Дослідження здатності глинистих сорбентів до адсорбції іонів важких металів / М. С. Мальований, Г. В. Сакалова, Т. М. Василінич, А. О. Брагуцук // Сталій розвиток XXI століття: управління, технології, моделі – Дискусії / за ред. Хлобистої Є. В. – Черкаси : Видавець Чабаненко Ю., 2016. – С. 575–585.

13. Степова, О. В. Технології захисту водного середовища : навчально-методичний посібник / О. В. Степова, Г. Г. Трохименко. – Полтава : НУ Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка, 2022. – 306 с.

Отримано 29.11.2023

УДК 677.494

**Вікторія Плаван<sup>1</sup>, Наталія Тарасенко<sup>2</sup>, Ірина Лісовська<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження

Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)

E-mail: [plavan.vp@knutd.edu.ua](mailto:plavan.vp@knutd.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>

ResearcherID: I-5852-2015. SCOPUS Author ID: 6603130130

<sup>2</sup>старший викладач кафедри загальної та неорганічної хімії

Національний технічний університет КПІ ім. І. Сікорського (Київ, Україна)

E-mail: [tarasenko.nv@ukr.net](mailto:tarasenko.nv@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1062-5533>

Researcher ID: J-7632-2017

<sup>3</sup>доцент кафедри загальної та неорганічної хімії

Національний технічний університет КПІ ім. І. Сікорського (Київ, Україна)

E-mail: [lisovskayai@ukr.net](mailto:lisovskayai@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-5976>

Researcher ID: J-8005-2017

## ЗАСТОСУВАННЯ ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ СОРБЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ В ТЕХНОЛОГІЯХ ВОДООЧИЩЕННЯ

Розроблено алгоритм технологічного процесу отримання хемосорбційного композиційного матеріалу на основі відходів хімічних волокон, наповнених глино порошками, для очищення стічних вод від іонів важких металів. За основу в роботі були використані неткані матеріали, отримані з відходів поліуретан-поліамідних хімічних волокон. Для підвищення механічної міцності їх скріплювали голкопробивним методом з трикотажним полотном з поверхневою щільністю 240 г/м<sup>2</sup>, яке було виготовлено платованим переплетенням з використанням бавовняної пряжі з лінійною щільністю 25 Текс та поліетиленових комплексних ниток лінійною щільністю 16,5 Текс на однофонтурній кругов'язальній машині типу МС. Для підвищення сорбційної здатності до волокнистої основи вводились порошки глини монтморілітоного типу у вигляді наповнених дисперсій крохмалю (2-3 %) чи полівінілового спирту (3 %) в кількості від 5 до 10 % від маси дисперсії.

Сорбційно-фільтрувальний волокнистий матеріал, наповнений глинистими мінералами, може бути використаний для очищення стічних вод підприємств легкої і хімічної промисловості. Застосування глинистих мінералів через введення їх у волокнисту основу дозволить знизити гідравлічний опір шару сорбенту, не використовуючи сорбент грубих фракцій, що збереже площу активної поглинаючої поверхні. Обробка стічних вод може здійснюватися пропусканням води через сорбційно-фільтрувальний елемент. Очищувальні установки можуть вміщувати по декілька сорбційно-фільтрувальних елементів одночасно, що підвищує ефективність водоочищення. Можливо застосування хемосорбційного композиційного матеріалу для очищення замулених стоків без загрози забивання адсорбента, та в системах зворотного водопостачання, що зменшить ризик відкладання мінеральних солей на стінках водоочисного обладнання і забезпечить якісну роботу очисних споруд.

**Ключові слова:** технології водоочищення; хемосорбційний композиційний матеріал, сорбційно-фільтрувальний елемент; неткані матеріали; глинисті мінерали; крохмаль; полівініловий спирт.

Рис.: 2. Бібл.: 13.

**Оксана Вітряк<sup>1</sup>, Жанна Замай<sup>2</sup>, Катерина Фабріченко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій і організації ресторанного господарства  
Державний торговельно-економічний університет (Київ, Україна)

E-mail: [vitrox@ukr.net](mailto:vitrox@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6614-1928>. ResearcherID: [GMW-4168-2022](https://orcid.org/GMW-4168-2022)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та екології,  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [zamaizhanna@gmail.com](mailto:zamaizhanna@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2879-4677>. ScopusID: 6506101557; 6506148493

<sup>3</sup>здобувач вищої освіти

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [katykha0612@gmail.com](mailto:katykha0612@gmail.com)

**БЕЗЛАКТОЗНІ ЙОГУРТИ З ДОДАВАННЯМ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ**

У статті теоретично обґрунтовано та доведено спосіб отримання безлактозних молочних продуктів шляхом одночасного внесення ферментного препарату  $\beta$ -галактозидази і заквасочних йогуртових культур. Розроблено модельні харчові композиції та технологію безлактозного йогурту з додаванням рослинних компонентів. Визначено оптимальне співвідношення яблука, гарбуза, кориці, як 12, 4 та 1 % відповідно, що дає змогу отримати безлактозний молочний продукт з покращеними органолептичними властивостями та підвищеною біологічною цінністю. Проаналізовано фізико-хімічні і мікробіологічні показники та розраховано харчову цінність отриманих продуктів. Розроблений безлактозний йогурт з додаванням рослинної сировини має сукупні синбіотичні функції, сприятиме розширенню асортименту продуктів, рекомендованих для осіб з непереносимістю лактози.

**Ключові слова:** безлактозні молочні продукти; йогурт; непереносимість лактози; ферментні препарати;  $\beta$ -галактозидаза; рослинна сировина; харчова цінність.

Табл.: 2. Бібл.: 15.

**Актуальність теми дослідження.** В Україні збільшується попит на молочні продукти, що є стимулом до вдосконалення їхніх технологій. Проте 20-30 % українців не можуть вживати молочні продукти через вміст у них лактози, тому актуальним є розроблення низьколактозної та безлактозної молочної і кисломолочної продукції з новими смаками та покращеним вітамінно-мінеральним складом.

**Постановка проблеми.** На сьогодні більша частина населення України приділяє увагу своєму здоров'ю та вживає молочні і кисломолочні продукти майже щодня. Щоб задовольнити потреби споживачів, виробники молочної галузі намагаються розширити асортимент продукції шляхом додавання рослинної сировини. Так, відоме молоко зі смаком полуниці ТМ Млековіта, молочний напій Какао ТМ Яготинське, або йогурт із малиною та м'ятою по-грецьки ТМ Lekker, йогурт Малина-Конопля ТМ Danone, а також молочні продукти з імбиром і, навіть, огірком.

Проте у світі збільшується кількість людей, хворих на гіполактазію (непереносимість лактози). Згідно з даними ВООЗ, у світі приблизно 75 % населення має гіполактазію різного ступеню вираженості. Здебільшого ця патологія поширена в країнах Азії, Африки (90 % населення), Південної Європи (70 % жителів) і Південної Америки. В Україні, за оцінкою різних дослідників, непереносимість лактози діагностується приблизно у 16 % населення. [1]

Тому доцільним є збільшення виробництва безлактозної харчової продукції. Безлактозну молочну продукцію отримують у результаті переробки коров'ячого молока, вона містить усі його компоненти, за винятком однієї речовини – лактози, що видалена або гідролізована до більш простих компонентів, і тому не вимагає для свого засвоєння ферменту – лактази. Усі інші цінні складові в молоці зберігаються, нічого стороннього, синтетичного не додається. [2]

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відома корисна дія пробіотиків для здоров'я людини: продукти з пробіотиками містять живі мікроорганізми, які при потрапленні в організм у достатній кількості можуть нормалізувати кишкову мікробіоту. Не менш важлива присутність у продукті та пребіотиків: харчових компонентів, що можуть вибірково стимулювати зростання і/або активність штамів кишкових бактерій, здатних їх

ферментувати. Водночас є синбіотики, до складу яких входять як пробіотики, так і пребіотики, що виявляє корисну для здоров'я активність як результат синергетичної дії цих двох компонентів.

До продуктів із пробіотиками належать: йогурти, кефір, маслянка, ацидофільне молоко тощо. Пребіотиками є олігосахариди, основні джерела яких: корінь цикорію, топінамбур, овочі, цільнозернові продукти та інші. Цікавими є дослідження (І. Власенко, Т. Семко, О. Іванішевої, 2022) щодо розробки нового кисломолочного напою з вторинної сировини, а саме маслянки, з використанням природних про- і пребіотиків. До складу продукту готового продукту входить синьо-зелена мікроводорість *Spirulina platensis*, як джерело біологічно цінних компонентів [3].

Дослідження та аналіз тенденцій удосконалення технологій молочної продукції (Р. Jelen, О. Tossavainen, 2013) сприяли розробленню й виготовленню продуктів для людей з непереносимістю лактози з використанням різних екзогенних ферментів лактази (таких як  $\beta$ -галактозидаза та тилактаза) та пробіотичної їжі (що містить штами *Bifidobacterium longum*, *Bifidobacterium animalis*, *Lactobacillus bulgaricus*, *Lactobacillus reuteri*, *Lactobacillus acidophilus* або *Lactobacillus rhamnosus*) [4].

Проаналізовано види молочних бактерій, введення яких до складу кисломолочних продуктів сприяє кращому засвоєнню кальцію в дітей і дорослих [4]:

1. *Bifidobacterium longum*. Добавки йогурту та біфідобактерій у пацієнтів із непереносимістю лактози змінювали метаболічну активність мікробіоти товстої кишки та полегшували симптоми непереносимості.

2. *Bifidobacterium animalis* і *Lactobacillus plantarum* – пробіотичний продукт (комбінація нових пробіотичних штамів *B. animalis subsp. animalis* IM386 і *L. plantarum* MP2026), який має потенціал для полегшення деяких шлунково-кишкових симптомів у пацієнтів із непереносимістю лактози, зокрема сприяє значному зниженню частоти випорожнень.

3. Постійне вживання йогурту, що містить живі *Lactobacillus bulgaricus* і *Streptococcus thermophilus*, полегшувало травлення у людей із порушенням всмоктування лактози.

4. *Lactobacillus reuteri* демонструє позитивний вплив на здоров'я людини, зменшуючи частоту нудоти, метеоризм і діарею. Цей пробіотик підвищує активність бета-галактозидази та покращує секрецію інсуліну, ймовірно, завдяки посиленому вивільненню інкрету.

5. Штам DDS-1 *Lactobacillus acidophilus* покращує абдомінальні симптоми (діарея, спазми, блювання) порівняно з плацебо під час вживання великої кількості лактози.

6. *Lactobacillus rhamnosus*. Зниження запальної реакції після вживання молочних продуктів, збагачених *L. rhamnosus*

До пребіотиків належать овочі та фрукти з високим вмістом клітковини. Так, відомі дослідження (В. Гніцевич, Т. Юдіна, Ю. Гончар, О. Васильєва, Л. Дьячук, 2020, 2021) щодо реологічних та органолептичних характеристик емульсійних систем з використанням ферментованого пюре м'якоти гарбуза та низьколактозної молочної сироватки (згущеної та сухої підсирної) [5; 6]. У роботі (К. Балабай, Р. Павлюк, 2019) розглянуто використання рослинних добавок у молочних продуктах, представлено технології кисломолочних напоїв із різним співвідношенням фруктових-овочевих заморожених добавок, а саме: топінамбура (4,0 %), гарбуза (10,0 %), яблук (4,0-7,0 %), апельсинів (2,0-5,0 %) та лимонів (2,0-5,0 %). Додатковою сировиною були: кориця, коріандр, куркума, буркун, чабрець, цедра лимона та апельсина [7].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Згідно зі статистикою, йогурт посідає одне з перших місць серед кисломолочних продуктів у раціоні людей багатьох країн світу [8]. Річне споживання нині сягає 2,5 кг на людину [9]. Йогурти вживають всі верстви населення, від дітей до людей похилого віку. На сьогодні асортимент безлактозних молочних і кисломолочних продуктів є недостатній для осіб, що страждають на непереносимість лактози. Крім того, практичний інтерес становить використання м'якоті гарбуза та інших пребіотиків для розроблення нових молочних продуктів оздоровчого спрямування.

**Метою статті** є розроблення технології та дослідження якості безлактозного йогурту з використанням рослинної сировини (яблук, гарбуза, кориці).

**Виклад основного матеріалу.** Для приготування безлактозного йогурту використовують лактазу. Коли ферментний препарат додають до молока одночасно з йогуртовою культурою, то більшість лактаз майже повністю інактивуються за високої кислотності ( $\text{pH} < 5,5$ ), що відбувається після 2,5-3 годин вистоювання. Тому кількість внесеної лактази має бути відносно високою для отримання безлактозного продукту. Нині на ринку є кислотостійкі лактази, які повинні бути спеціально промарковані, оскільки не інактивуються через низький рН у кінцевому продукті.

У виробництві йогурту є переваги використання лактаз – це збільшення солодкості продукту за рахунок розщеплення лактози до глюкози і галактози, що дає змогу зменшити загальну кількість доданого цукру на 1,5-2 г на 100 г продукту без зміни смакових якостей. А також, при використанні спеціальної йогуртової культури зменшується окислення продукту протягом терміну придатності. Очевидно, це відбувається через те, що деякі йогуртові бактерії мають низьку активність за відсутності лактози або через уповільнення переходу від одного джерела вуглеводів до іншого [10].

Бактеріальні або грибові ферментні препарати лактази можуть містити супутні ферменти, такі як інвертаза, амілаза, пектиназа, що викликають небажані реакції розщеплення сахарози на глюкозу і фруктозу, на текстуру збагачених пектином або іншими речовинами йогуртів під час виробництва або зберігання. Тому, краще використовувати спеціальні лактази, в яких відсутні такі ферменти. Так, більшість ферментних препаратів  $\beta$ -галактозидази виготовляють за допомогою молочних дріжджів *Kluyveromyces lactis*, які не мають такої активності. При виготовленні десертів на основі крохмалю з використанням такого безлактозного молока суттєвих текстурних відмінностей не виявлено [11].

Йогурт є найбільш уживаним молочним продуктом, присутнім у раціоні всіх верств населення, завдяки своїм смаковим та поживним властивостям. Це гарний засіб для потрапляння пробіотиків до кишківника людини. Систематичне споживання йогурту сприяє нормалізації процесів травлення й випорожнення, є корисним при запальних захворюваннях кишківника, сприяє контролю рівня глюкози у крові [12]. Однак, йогурти, виготовлені за традиційними рецептурами, містять недостатню кількість мінеральних речовин та пробіотиків, щоб задовольнити потребу організму в них. Саме рослинна сировина здатна їх збагатити на каротиноїди, біофлавоноїди, аскорбінову кислоту, фолати тощо. Це використання лікарських трав, фруктів, ягід, овочів та злаків, у вигляді джемів, сиропів, соків, паст, пюре та ін. [13].

Перспективними рослинними компонентами для використання у технології йогуртів є яблука і гарбуз, які надають при вживанні пребіотичний ефект за рахунок високого вмісту клітковини [14].

Яблука містять вітаміни (групи В, а також, С, Е, К, РР), мікро- і макроелементи (Fe, К, Са, Mg, Mb, Na, Ni, P), антиоксиданти, не володіють алергенними властивостями. Яблучна, винна і лимонна кислота зупиняють процеси гниття та бродіння у кишківнику. Пектин, що міститься у плодах, запобігає закрепам, знижує рівень холестерину у крові. Флавоноїли (катехіни) допомагають попередити захворювання серця.

Гарбуз багатий на вітаміни А, С, РР, групи В, містить мінеральні речовини К, Mg, Fe, Zn, а також, значний уміст клітковини. Цей плід рекомендують включати до раціону при хронічних закрепах, запаленнях сечовивідної системи, нирковій недостатності тощо. Наявність у гарбузі значної кількості пектину сприяє виведенню з організму токсичних речовин і шкідливого холестерину. Вітамін Е у поєднанні з каротином, що містяться у гарбузі, уповільнюють старіння клітин організму, а також зміцнюють імунну систему. До складу гарбуза входить Са, який у поєднанні з вітамінами групи В і С виводить з організму надлишки солей, що запобігає підвищенню артеріального тиску.

Користь кориці складно перебільшити. Вона містить, окрім білків, жирів і вуглеводів, ряд вітамінів, амінокислоти, мікро- та макроелементи, жирні насичені, мононенасичені та поліненасичені кислоти (Омега-3, Омега-6). Вітамінний склад кориці на 100 г: ретинол (15 мкг); холін (11 мг); фолати (6 мкг); аскорбінова кислота (3,8 мг); альфа-, гамма та дельта-токофероли (2,32; 10,44; 0,26 мг відповідно); філохінон (31,2 мкг); бетаїн (3,9 мг) тощо. Серед мінеральних речовин, що містяться в кориці, – залізо, калій, кальцій, магній, марганець, мідь, натрій, селен, фосфор та цинк. Велика кількість вітамінів і мінералів, присутніх у кориці, сприяє підвищенню життєвого тону організму. Ця приправа особливо надає ефект за наявності виразок шлунку, оскільки знижує кислотність і сприяє перетравленню їжі.

Найбільший уміст вітаміну С має яблуко (10 мг/100г), найбільший уміст калію та кальцію є в кориці (437 і 1002 мг/100г), а в гарбузі найбільший уміст цинку (0,24 мг/100г) [14]. Отже, збагачення вищеназваними рослинними інгредієнтами безлактозного йогурту підвищує його антиоксидантну активність та харчову і біологічну цінність.

У процесі дослідження використовували: гарбуз, згідно з ДСТУ 3190-95 «Гарбузи продовольчі свіжі. Технічні умови»; яблука, згідно з ДСТУ 8133:2015 «Яблука свіжі середніх та пізніх термінів достигання. Технічні умови»; корицю, згідно з ДСТУ ISO 6539-2016 «Прянощі. Кориця»; закваску, згідно з ДСТУ 7355:2013 «Молоко, молочні продукти та закваски. Метод визначання кількості біфідобактерій»; ферментний препарат, згідно з ДСТУ 4457:2005 «Препарати ферментні. Загальні технічні умови».

За показниками якості (органолептичними, фізико-хімічними, мікробіологічними та показниками безпечності) готовий продукт – йогурт повинен відповідати ДСТУ 4343:2004 «Йогурти. Загальні технічні умови». Оцінювали готовий продукт за такими органолептичними показниками: консистенція, зовнішній вигляд, смак, колір, запах. Кислотність визначали шляхом титрування, уміст жиру бутирометричним методом, кількість молочнокислих бактерій на твердому поживному середовищі МРС методом підрахунку колоній, БГКП у середовищі Кеслер (розведення 10-ти кратне).

Ферментний препарат  $\beta$ -галактозидазу вводили після пастеризації та охолодження молока разом із закваскою (йогуртовою культурою) (Зразок 1) та роздільно у часі: спочатку ферментний препарат, а через 2,5 години – закваску (Зразок 2). За результатами органолептичного та фізико-хімічного аналізів встановлено, що кращим виявився зразок 1 (кислотність 92 °Т, жирність 2,6 %). Отже, доцільним є внесення ферментного препарату із закваскою до молока одночасно, через пригнічення активності деяких йогуртових культур за високої кислотності продукту.

За результатами попередніх досліджень, враховуючи органолептичні показники, визначили оптимальне співвідношення пюре гарбуза та яблука, яке становить 70:30 відповідно. Щоб зберегти в гарбузі та яблуках якомога більше мікроелементів і вітамінів, а також розм'якшити, їх піддали термічній обробці в духовці: запікали за температури 200 °С протягом 20-30 хвилин, а потім подрібнювали блендером. При цьому вміст заліза в яблуках не зменшився.

Подальші дослідження мали за мету встановлення оптимальної концентрації гарбузового і яблучного пюре. Було приготовлено 10 зразків йогурту з наступним співвідношенням йогурту, гарбузового і яблучного пюре та кориці у відсотках відповідно: № 1 – безлактозний білий йогурт без рослинних компонентів; № 2 – 83:8:8:1; № 3 – 90:4,5:4,5:1; № 4 – 83:12:4:1; № 5 – 90:6:3:1; № 6 – 83:4:12:1; № 7 – 90:3:6:1; № 8 – 76:18:5:1; № 9 – 83:16:0:1; № 10 – 83:0:16:1. Розроблені модельні харчові композиції безлактозного йогурту з рослинними добавками наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Модельні харчові композиції безлактозного йогурту

| Сировина                            | Зразок № |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                     | 1        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| Молоко пастеризоване, жирність 2,6% | 100      | 83    | 90    | 83    | 90    | 83    | 90    | 76    | 83    | 83    |
| Гарбуз                              | -        | 8     | 4,5   | 12    | 6     | 4     | 3     | 18    | 16    | -     |
| Яблуко                              | -        | 8     | 4,5   | 4     | 3     | 12    | 6     | 5     | -     | 16    |
| Кориця                              | -        | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| Закваска                            | 0,005    | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 |
| Фермент                             | 0,003    | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| Всього                              | 100      | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   |

Джерело: розроблене авторами.

За розробленою технологією безлактозних йогуртів: пастеризоване молоко (вміст жиру 2,6 %, титрована кислотність 18 °Т) охолодили до температури заквашування 38 °С та додали ферментний препарат β-галактозидазу і заквасочні культури (штами: *Streptococcus thermophiles*, *Lactobacillus delbrueckii ssp. bulgaricus*, *Lactobacillus acidophilus*) одночасно з відповідною частотою перемішування. Готову суміш поставили в термостат, розігрітий до 38 °С, на 8 годин. Після дозрівання згустку йогурт розлили по стаканах по 100 г та додали відповідну концентрацію рослинних інгредієнтів. Усе ретельно перемішували протягом 2-3 хвилин і поставили до холодильника для охолодження на 30-40 хвилин.

Проведено органолептичне оцінювання отриманих зразків йогуртів, при цьому користувалися стандартною методикою оцінювання. Середні значення органолептичних показників зразків наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Органолептичні показники досліджених йогуртів

| № зразка | Колір | Консистенція | Запах | Смак | Зовнішній вигляд |
|----------|-------|--------------|-------|------|------------------|
| 1        | 4,66  | 4,66         | 4,83  | 4,66 | 4,66             |
| 2        | 4,66  | 4,83         | 5,00  | 4,66 | 4,83             |
| 3        | 4,66  | 4,5          | 4,50  | 4,50 | 5,00             |
| 4        | 4,83  | 4,66         | 4,83  | 4,83 | 5,00             |
| 5        | 4,66  | 4,33         | 5,00  | 4,50 | 4,83             |
| 6        | 4,83  | 5,00         | 5,00  | 5,00 | 5,00             |
| 7        | 4,50  | 4,66         | 5,00  | 4,00 | 4,83             |
| 8        | 5,00  | 4,66         | 4,00  | 3,67 | 4,66             |
| 9        | 5,00  | 4,33         | 3,83  | 3,66 | 4,33             |
| 10       | 4,66  | 4,50         | 4,66  | 4,00 | 4,83             |

Джерело: розроблене авторами.

За даними табл. 2 можна зробити висновок, що зразки йогуртів № 8, 9, 10 мали надто насичений смак рослинних компонентів, що перебивало смак йогурту. Зазначимо, що додавання окремо яблучного і окремо гарбузового пюре дозволяє одержати значно менш яскравий смак, ніж при додаванні цих компонентів разом. Йогурти № 3, 5, 7 мали дуже легкий смак, майже не відчувались наповнювачі. Зразки йогуртів № 2, 4, 6 мали майже оптимальні співвідношення рослинних компонентів, у той же час лише у зразку

№6 поєднання яблука у кількості 12 % та гарбуза у кількості 4 % надало готовому продукту ніжний солодкуватий смак, який не потребував додаткового внесення цукру. Таким чином, найкращим співвідношенням йогурту, гарбуза, яблука та кориці є 83:4:12:1.

Аналіз фізико-хімічних показників йогуртів засвідчив, що титрована кислотність отриманих зразків була в межах 84-121 °Т, вміст жиру становив 2,5-2,6, що відповідає ДСТУ4343:2004 «Йогурти. Загальні технічні умови». У йогуртах із рослинними наповнювачами жирність знизилась на 0,1 %, за рахунок додавання саме цих компонентів.

Подальші мікробіологічні дослідження проводили для найбільш оптимального зразку йогурту (зразок № 6) з додаванням 4 % гарбузового пюре, 12 % яблучного пюре, 1 % кориці. Для оцінки кількості КУО використовували тверде поживне середовище МРС, на якому посіяли йогурт з гарбузом, яблуком і корицею, після трьох днів термостатування підраховували кількість молочнокислих бактерій в 1 см<sup>3</sup> йогурту, що становило 1·10<sup>7</sup> і є нормою. Дослідження на наявність бактерій групи кишкової палички проводили в розчині Кеслера при десятикратному розведенні. Через добу термостатування в розчині Кеслера було виявлено, що газоутворення не почалось та поплавок не піднявся на поверхню рідини. Можна зробити висновок, що в йогурті бактерії групи кишкової палички відсутні.

Отже, отриманий безлактозний йогурт з рослинними інгредієнтами є смачним, якісним і безпечним для споживача.

Розрахунок харчової цінності отриманого продукту здійснювали, спираючись на довідкову літературу [15]. Безлактозний йогурт з гарбузом, яблуком та корицею містив білку 3,49 г, жирів 2,5 г, вуглеводів 5,88 г. Енергетична цінність (калорійність) становила 60 ккал (251 кДж).

**Висновки.** Теоретично обґрунтовано спосіб отримання безлактозних молочних продуктів шляхом внесення ферментного препарату β-галактозидази і заквасочних йогуртових культур одночасно. Розглянуто використання рослинних компонентів у технології безлактозного йогурту та розроблено модельні харчові композиції йогуртів з рослинною сировиною. Визначено оптимальне співвідношення рослинних компонентів: яблука, гарбуза, кориці, як 12, 4 та 1% відповідно, що надає готовому продукту високі органолептичні показники та харчову і біологічну цінність. Проаналізовано фізико-хімічні та мікробіологічні показники йогуртів, отримані продукти відповідають нормативній документації та є безпечними для споживача. Отриманий безлактозний йогурт має сукупні синбіотичні функції та рекомендований для осіб з непереносимістю лактози.

### Список використаних джерел

1. Шадрін, О. Г. Проблеми діагностики лактазної недостатності у дітей раннього віку / О. Г. Шадрін, К. О. Хомутовська // Дитячий лікар. – 2014. – № 5(34). – С. 5-9.
2. Молоко безлактозне: популярний тренд або реальна користь [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://fitomarket.com.ua/ua/fitoblog/moloko-bezlaktoznoe-populjarnij-trend-ili-realnaja-polza>.
3. Власенко, І. Г. Технологія кисломолочного напою з вторинної молочної сировини / І. Г. Власенко, Т. В. Семко, О. А. Іваніщева // Науковий вісник ТДАТУ. – 2022. – Вип.12, Т. 2. – С. 215-228.
4. Jelen, P. Low lactose and lactose-free dairy products – Prospects, technologies and applications / P. Jelen, O. Tossavainen // Aust. J. Dairy Technol. – 2013. – № 58. – P. 161-165.
5. Justification emulsify properties of semi-finished product based on low-lactose milk whey / V. Gnitsevych, T. Yudina, Y. Honchar, O. Vasylieva, L. Diachuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 3, Is. 11 (105): Technology and Equipment of Food Production. – Pp. 21-29.
6. Гніщевич, В. А. Технологія та якість напівфабрикату на основі м'якоті гарбуза для оздоровчого харчування / В. А. Гніщевич, В. І. Кущенко // Обладнання та технології харчових виробництв. – Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2021. – № 2 (43). – С. 5-11.

7. Балабай, К. С. Розробка технології комбінованих кисломолочних напоїв із застосуванням заморожених дрібнодисперсних добавок / К. С. Балабай, Р. Ю. Павлюк // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 15 трав. 2019 р.). – Харків : ХДУХТ, 2019. – Ч. 1. – С. 52-53.

8. Мотузка, Ю. Інновації на ринку йогуртів функціонального призначення / Ю. Мотузка // Стан і перспективи харчової науки та промисловості : зб. тез доп. Міжнар. наук.-тех. конф. (м. Тернопіль, 10-11 жовтня 2019 р.). – Тернопіль : ТНТУ, 2019. – С. 166-167.

9. Як йогурт завоював світ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://marketer.ua/ua/yoghurt-brand-history>.

10. Фабриченко, К. Ю. Вивчення впливу рослинної сировини на органолептичні та фізико-хімічні властивості безлактозного йогурту / К. Ю. Фабриченко // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023) : матеріали тез доп. XIII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Чернігів, 25-26 трав. 2023 р.) : у 2 т. – Т. 1. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – С. 317-318.

11. Dekker, P. J. T. Lactose-Free Dairy Products: Market Developments, Production, Nutrition and Health Benefits / P. J. T. Dekker, D. Koenders, M. J. Bruins // *Nutrients*. – 2019. – № 55. – P. 1-14.

12. Yadav, H. Antidiabetic effect of probiotic dahi containing *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus casei* in high fructose fed rats / H. Yadav, S. Jain, S. H. Sinha // *Nutrition*. – 2017. – № 23. – Pp. 62-68.

13. Самілик, М. М. Створення функціональних кисломолочних продуктів [Електронний ресурс] / М. М. Самілик, М. М. Цирулик // International scientific and practical conference Technical sciences : history, the present time, the future, EU experience (Wloclawek, Republic of Poland, September 27-28, 2019). – Wloclawek : Baltija Publishing, 2019. – P. 118-121.

14. Технологія продуктів харчування функціонального призначення : монографія / за ред. М. І. Пересічного. – Київ : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2008. – 718 с.

15. Харчова хімія: аналіз та хімічний склад харчових продуктів / В. О. Василечко, Я. Ф. Ломницька, Я. П. Скоробогатий, М. В. Бужанська. – Львів : Вид-во Львів. торг.-екон. ун-ту, 2020. – 306 с.

### References

1. Shadrin, O.H., & Khomutovska, K.O. (2014). Problemy diahnozyky laktaznoi nedostatnosti u ditei rannoho viku [Problems of diagnosis of lactase deficiency in young children]. *Dytiachyi likar – Children's doctor*, 5(34), 5-9.

2. Moloko bezlaktozne: populiarniy trend abo realna koryst [Lactose-free milk: a popular trend or a real benefit]. (December 1, 2023). <https://fitomarket.com.ua/ua/fitoblog/moloko-bezlaktoznoe-populjarnij-trend-ili-realnaja-polza>.

3. Vlasenko, I.H., Semko, T.V., & Ivanishcheva, O.A. (2022). Tekhnolohiia kyslomolochnoho napoiu z vtorynnoi molochnoi syrovyny [Technology of fermented milk drink from secondary dairy raw materials]. *Naukovyi visnyk TDATU – Naukovyi visnyk TDATU*, 12(2), 215–228. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-2-17.

4. Jelen, P., & Tossavainen, O. (2013). Low lactose and lactose-free dairy products. Prospects, technologies and applications. *Aust. J. Dairy Technol*, 58, 161–165.

5. Gnitsevych, V., Yudina, T., Honchar, Y., Vasylieva, O. & Diachuk, L. (2020). Justification emulsify properties of semi-finished product based on low-lactose milk whey. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3, 11(105): *Technology and Equipment of Food Production*, 21-29. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.204588.

6. Hnitsevych, V.A., & Kushchenko, V.I. (2021). Tekhnolohiia ta yakist napivfabrykatu na osnovi miakoti harbuza dlia ozdorovchoho kharchuvannia [Technology and quality of a semi-finished product based on pumpkin pulp for health food]. *Obkladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv – Equipment and technologies of food production*, 2(43), 5-11. DOI: 10.33274/2079-4827-2021-43-2-5-11.

7. Balabai, K.S., & Pavliuk, R.Yu. (2019). Rozrobka tekhnolohii kombinovanykh kyslomolochnykh napoiu iz zastosuvanniam zamorozhenykh dribnodispersnykh dobavok [Development of the technology of combined fermented milk drinks with the use of frozen finely dispersed additives]. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Development of food*



*production, restaurant and hotel industries and trade: problems, prospects, efficiency – Rozvytok kharchovykh vyrobnytstv, restorannoho ta hotelnoho hospodarstv i torhivli: problemy, perspektyvy, efektyvnist: tezy dop. Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (pp. 52-53, Vol. 1). KhDUHT.*

8. Motuzka, Yu. (2019). Innovatsii na rynku yohurtiv funktsionalnoho pryznachennia [Innovations on the functional yogurt market]. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference Status and prospects of food science and industry – Stan i perspektyvy kharchovoi nauky ta promyslovosti (pp. 166-167). TNTU.*

9. How yogurt conquered the world. (September 25, 2023). <https://marketer.ua/ua/yoghurt&brand&history/>

10. Fabrychenko, K.Yu. (2023). Vyvchennia vplyvu roslynnoi syrovyny na orhanoleptychni ta fizyko-khimichni vlastyvoli bezlaktoznoho yohurtu [Study of the influence of plant raw materials on the organoleptic and physico-chemical properties of lactose-free yogurt]. *Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference Comprehensive quality assurance of technological processes and systems (KZYATPS - 2023) – Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system (KZIATPS – 2023). Chernihiv Polytechnic National University (Vol. 1, pp. 317-318).*

11. Peter, J., Dekker, T., Koenders, D., Maaik, J. & Bruins, T. (2019). Lactose-Free Dairy Products: Market Developments, Production, Nutrition and Health Benefits. *Nutrients, 55, 1-14.*

12. Yadav, H., Jain, S., & Sinha, S. (2017). Antidiabetic effect of probiotic dahi containing *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus casei* in high fructose fed rats. *Nutrition, 23, 62-68.*

13. Samilyk, M.M., & Tsyruyk, R. V. (2019). Stvorennia funktsionalnykh kyslomolochnykh produktiv [Creation of functional fermented milk products]. *Proceedings of International scientific and practical conference Technical sciences History, the present time, the future, EU experience – International scientific and practical conference Technical sciences: history, the present time, the future, EU experience (pp. 118-121). Wloclawek, Republic of Poland, September 27-28, 2019. Wloclawek: Baltija Publishing.*

14. Peresichnyi, M.I. (Ed.). (2008). *Tekhnolohiia produktiv kharchuvannia funktsionalnoho pryznachennia [Technology of functional food products]. Kyiv nats. torh.-ekon. un-t.*

15. Vasylechko, V.O., Lomnytska, Ya.F., Skorobohaty, Ya.P., & Buzhanska, M.V. (2020). *Kharchova khimiia: analiz ta khimichniy sklad kharchovykh produktiv [Food chemistry: analysis and chemical composition of food products]. Vyd-vo Lviv. torh.-ekon. un-tu.*

Отримано 14.12.2023

UDC 637.146.34:663.911.1

**Oksana Vitriak<sup>1</sup>, Zhanna Zamaï<sup>2</sup>, Kateryna Fabrychenko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Technologies and Organization of Restaurant Management  
State University of Trade and Economics (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [vitrox@ukr.net](mailto:vitrox@ukr.net) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6614-1928> **ResearcherID:** [GMW-4168-2022](https://orcid.org/GMW-4168-2022)

<sup>2</sup> PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Technologies and Ecology  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [zamaizhanna@gmail.com](mailto:zamaizhanna@gmail.com) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2879-4677> **ScopusID:** [6506101557](https://orcid.org/6506101557); [6506148493](https://orcid.org/6506148493)

<sup>3</sup> Applicant for higher education, gr. MHT-221  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)  
**E-mail:** [katykha0612@gmail.com](mailto:katykha0612@gmail.com)

## LACTOSE-FREE YOGURTS WITH THE ADDITION OF PLANT RAW MATERIALS

*Today, the demand for low-lactose and lactose-free dairy products is growing in Ukraine and the world due to the increase in the number of people suffering from hypolactasia (lactose intolerance).*

*It is expedient to develop new technologies for lactose-free dairy and fermented milk products, namely yogurts, as the most popular group of dairy products. The use of plant raw materials in the technology of lactose-free yogurts will add prebiotic properties to the finished product.*

*The purpose of the research is to develop a technology and study the quality indicators of lactose-free yogurt with the addition of plant raw materials (apple, pumpkin, cinnamon), which will expand the range of products recommended for people with lactose intolerance.*

*The enzyme preparation  $\beta$ -galactosidase was used to prepare lactose-free yogurt. Pumpkins and apples were subjected to heat treatment at the temperature of 200°C for 20-30 minutes. To determine the organoleptic, physico-chemical and microbiological parameters of the finished product, generally accepted and standardized research methods are used.*

*Based on the results of research, the rational amount and conditions of use of the lactase ( $\beta$ -galactosidase) enzyme preparation, as well as the optimal ratio of pureed apple, pumpkin and cinnamon, were determined, which makes it possible to obtain a lactose-free dairy product with improved organoleptic properties and increased biological value.*

*The article theoretically substantiates and proves the method of obtaining lactose-free dairy products by simultaneous introduction of the  $\beta$ -galactosidase enzyme preparation and sourdough yogurt cultures. Model food compositions and technology of lactose-free yogurt with the addition of plant components have been developed. The optimal ratio of plant components: apple, pumpkin, cinnamon has been determined as 12, 4 and 1%, respectively, which gives the finished product high organoleptic indicators and biological value. Physico-chemical and microbiological indicators have been analyzed and the nutritional value of the obtained products has been calculated. The developed lactose-free yogurt with the addition of plant raw materials has combined symbiotic functions and is recommended for people with lactose intolerance.*

**Keywords:** *lactose-free dairy products; yogurt; lactose intolerance; enzyme preparations;  $\beta$ -galactosidase; vegetable raw materials; nutritional value.*

*Табл.: 2. Бібл.: 15.*

**Сергій Зайцев**

кандидат технічних наук, інженер кафедри атомних електростанцій  
Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)  
E-mail: [sdjavdet@ukr.net](mailto:sdjavdet@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗРЯДІВ НА ДЕГРАДАЦІЮ ТУРБІННИХ ОЛИВ**

Стаття є публікацією науково-методичного характеру. Наведено результати удосконалення методів визначення впливу електричних розрядів на деградацію сучасних мінеральної турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» та синтетичної вогнестійкої турбінної оливи «Furquel®L» в залежності від вмісту в них води. Розроблено принципову схему установки для дослідження впливу імпульсного електричного струму високої напруги на деградацію мінеральних та синтетичних вогнестійких турбінних оли. Досліджено: характер залежності електричної пробивної напруги для цих турбінних оли від вмісту в них води в інтервалі температур  $t = 20-100$  °C; характер залежності показника «тангенс кута діелектричних втрат» для турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» від вмісту в ній мурашиної кислоти при температурі  $t = 20$  °C; вплив імпульсної електричної напруги на деградацію цих турбінних оли в залежності від вмісту в них води і з утворенням в них розчинених газів  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ . Вперше досліджено наявність у відповідних турбінних оливах процесу їх деградації під дією імпульсних електричних розрядів з утворенням газоподібних  $H_2S$ ,  $PH_3$ ,  $SO_2$ . Отримані результати досліджень дозволяють визначення вплив електричних розрядів на деградацію турбінні оливи для подальшого діагностування їх стану та розробляти заходи для недопущення такої деградації або зниження її впливу на якість турбінних оли в процесі їх експлуатації в оливнонаповненому тепломеханічному обладнанні електростанцій.

**Ключові слова:** електротехнічне оливнонаповнене обладнання; мінеральна турбінна олива; синтетична вогнестійка турбінна олива; електричний пробій оливи; розчинені гази; газова хроматографія.

Табл.: 4. Рис.: 5. Бібл.: 27.

**Актуальність теми дослідження.** Стаття є публікацією науково-методичного характеру. В обладнанні атомних електростанцій (АЕС) турбінні оливи застосовують у системах змащування і регулювання парових турбін, системах змащування та ущільнення валів генераторів, системах змащування головних циркуляційних насосів та насосів системи охолодження води, системах змащування конденсатних електронасосів, насосів перекачування технічної води відповідальних та невідповідальних споживачів, систем змащування та регулювання турбоживильних насосних агрегатів і насосів відкачування сепарату [1; 2]. Ці турбінні оливи забезпечують надійну експлуатацію оливнонаповненого енергетичного обладнання і виконують функції змащувального, охолоджувального, електроізоляційного, дугогасного та інформаційного середовища [3]. На даний час в тепломеханічному обладнанні енергоблоків АЕС України знаходяться мінеральні турбінні оливи, наприклад «Тп-22с (марка 1)» і синтетичні вогнестійкі турбінні оливи, наприклад «Furquel®L» [4]. Часто ці турбінні оливи містять у собі розчинену воду та нерозчинену воду у вигляді емульсії (гетерогенна система) [5]. Усе це потребує безперервного удосконалення методів діагностування оливнонаповненого обладнання АЕС, зокрема й за результатами контролю вмісту діагностичних компонентів в них, наприклад, розчинених газів ( $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ) [6; 7]. При цьому турбінні оливи для відповідного оливнонаповненого тепломеханічного обладнання постійно удосконалюються, у тому числі за рахунок застосування нових сумішей із різними фізико-хімічними та електрофізичними властивостями. Таким чином, удосконалення методів визначення впливу електричних розрядів на деградацію сучасних мінеральних або синтетичних вогнестійких турбінних оли, є необхідністю для діагностування стану цих турбінних оли.

**Постановка проблеми.** Доволі часто внутрішні дефекти у підшипниках турбоагрегатів виникають за рахунок дефектів електричного характеру в підшипниках турбоагрегатів. При цьому на розвиток цих дефектів впливають характеристики якості змащувальних турбінних оли, у тому числі від наявності в них емульсійної форми води, вмісту розчинених або не розчинених газів [8]. Таким чином: а) у науковій літературі практично

відсутня інформація про вплив електричних розрядів на деградацію турбінних олив, наприклад, у вузлах підшипників турбінних агрегатів із системами безперервної циркуляції турбінних олив у вузлах підшипників; б) є необхідність у постійному удосконаленні методів визначення впливу електричних розрядів на деградацію турбінних олив для подальшого діагностування стану цих турбінних олив та розробки заходів для недопущення такої деградації або для зниження її впливу на якість турбінних олив у процесі їх експлуатації в оливнонаповненому тепломеханічному обладнанні електростанцій, у тому числі та на надійність турбогенераторів із водневим охолодженням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [9] наведено перелік оливнонаповненого електротехнічного обладнання, технічний стан якого можна виявляти за результатами газохроматографічного (ГХ) аналізу проб ізоляційних олив із цього обладнання, а також показано, що контроль обладнання, яке не ввійшло у вищезазначений перелік, може виконуватися за результатами ГХ аналізу проб ізоляційних олив з цього обладнання за рішенням технічного керівництва підприємства для отримання додаткових результатів про технічний стан обладнання. Відомо, що: підвищена забрудненість робочих рідин в енергетичному обладнанні спричиняє прискорений знос підшипників, знижує надійність системи регулювання та ущільнень вала генератора, призводить до прискорення зносу наполегливих колодок і вкладишів підшипників, погіршує їхні експлуатаційні властивості, скорочує термін служби обладнання [10]; електроерозія підшипників турбоагрегатів проявляється в поступовому руйнуванні деталей підшипника і дотичної з ними поверхні вала паразитними електричними струмами [11]; електроерозія призводить до деградації змащувальної оливи, зокрема з виділенням газів (газоутворення при електроерозійному пошкодженні підшипників), і наявність цих газів, їхні концентрації та швидкість їхнього збільшення можуть бути використані під час діагностування технічного стану поверхонь, що труться, у підшипниках [12].

У роботі [7] за методом ГХ було визначено вміст розчинених газів ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ) у пробах експлуатаційної турбінної оливи «Тп-22с (марка 1)» з головного оливного бака системи циркуляційного оливозабезпечення паротурбінної установки (турбіна К-210-130-3) з турбогенератором ТГВ-200 з водневим охолодженням. Отримані результати дають змогу виконувати статистичне накопичення даних для розроблення діагностичної моделі при визначенні технічного стану турбогенератора з водневим охолодженням за умови визначення виникнення в підшипниках дефектів електричного характеру на підставі відповідних діагностичних моделей, які застосовують для електротехнічного обладнання [9].

Хімічний склад енергетичних олив, в тому числі мінеральних турбінних олив, які отримані із нафти, залежить від хімічного складу цієї нафти, і такі турбінні оливи можуть включати в себе різні гомологічні ряди компонентів похідної нафти: 1) вуглеводні: алкани ( $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ ); моноциклічні циклоалкани ( $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ ); поліциклічні циклоалкани ( $\text{C}_n\text{H}_{2n-p}$  при  $p=2, 4, 6, 8, 10$ ); моноциклічні ацени ( $\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$ ); поліциклічні ацени ( $\text{C}_n\text{H}_{2n-p}$  при  $p=12, 14, 18, 20, 24, 30, 36$ ); цикло-алкано-арени ( $\text{C}_n\text{H}_{2n-p}$  при  $p=8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22$ ); 2) сірковмісні сполуки: насичені ациклічні ( $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}\text{S}$ ); насичені циклічні ( $\text{C}_n\text{H}_{2n-p}\text{S}$  при  $p=0, 2, 4, 6$ ); тіофенові ( $\text{C}_n\text{H}_{2n-4}\text{S}$ ); тіофено-циклоалкано-аренові ( $\text{C}_n\text{H}_{2n-p}\text{S}$  при  $p=6, 8, 10, 14, 16, 18, 22, 24, 26, 28, 30, 32$ ); 3) азотовмісні сполуки: насичені ациклічні ( $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}\text{N}$ ); гетероциклічні (піридини; хіноліни) ( $\text{C}_n\text{H}_{2n-p}\text{N}$  при  $p=5, 11$ ); циклоалкано-аренові ( $\text{C}_n\text{H}_{2n-p}\text{N}$  при  $p=7, 11, 13, 17$ ); 4) карбонові кислоти: ациклічні ( $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{COOH}$ ); циклоалканові ( $\text{C}_n\text{H}_{2n-p}\text{COOH}$  при  $p=1, 3$ ); 5) циклоалкано-аренові ( $\text{C}_n\text{H}_{2n-p}\text{COOH}$  при  $p=7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29$ ) [13; 14].

Вогнестійка турбінна рідина, яка експлуатується в парових турбінах К-1000-60/3000 на АЕС України, як хімічна речовина належить до групи фосфору і його поєднань, а емпірична формула вогнестійких турбінних рідин на основі трикселенілфосфатів має вигляд  $C_{24}H_{27}O_4P$  [4].

Під час деградації мінеральних ізоляційних олиव у присутності кисню, в цих оливах утворюються такі розчинені леткі водорозчинні органічні кислоти, як: мурашина, оцтова, пропіонова, масляна, ізовалеріанова. Аналогічні кислоти можуть утворюватися і під час деградації мінеральних турбінних олив [15].

Нині відомі механізми деградації мінеральних ізоляційних олив під впливом теплових та електричних полів із генеруванням в цих оливах розчинених газів  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  [16; 17]. Результати визначення вмісту цих розчинених газів у турбінних оливах можуть бути застосовані для діагностування технічного стану підшипників турбоагрегатів із системами безперервної циркуляції турбінних олив у вузлах цих підшипників з урахуванням відомих діагностичних моделей [9; 18].

Під час енергетичного впливу на вуглеводні нафтопродуктів можуть утворюватися не тільки моноуглецеві радикали, а й радикали з великою кількістю атомів вуглецю, і утворення як граничних, так і ненасичених вуглеводневих газів може відбуватися не тільки шляхом возз'єднання моноуглецевих радикалів, а й під час послідовного розщеплення вуглеводнів нафтопродукту, і такі самі процеси можуть відбуватися і в мінеральних турбінних маслах [19].

Відомо, що: при гідруванні нафтопродуктів газоподібним воднем ( $H_2$ ), в отриманих рідких продуктах гідрування утворюються такі компоненти, як сірководень ( $H_2S$ ), вода, аміак ( $NH_3$ ) [15]; у мінеральній ізоляційній оливі під час тривалого впливу на неї електричного й теплового полів відбуваються процеси розкладання насичених вуглеводнів, перетворення поліароматичних вуглеводнів у моноароматичні вуглеводні, а вільна вода при цьому в оливі зв'язується з ароматичним кільцем вуглеводню, що призводить до різкого зниження електричної міцності оливи, і, відповідно, до зниження її електричної пробивної напруги [20].

У роботі [15] показано характер впливу: а) електричної напруги – на значення електричної пробивної напруги  $U$  для мінеральних трансформаторних олив залежно від вмісту в них води в діапазоні температур від мінус  $20\text{ }^{\circ}C$  до  $60\text{ }^{\circ}C$ , у тому числі при наявності розчиненої або емульсійної форми води в цих оливах; б) електричної напруги – на деградацію ізоляційних олив із генеруванням в них розчинених газів  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ; в) концентрації оцтової кислоти – на показник «тангенс кута діелектричних втрат ( $tg\delta$ )» при температурі  $t = 20\text{ }^{\circ}C$ ; г) концентрації води в мінеральних трансформаторних оливах – на показники « $tg\delta$ » залежно від температури цих олив.

Відомо, що електрична міцність ізоляційної оливи характеризується її електричною пробивною напругою, і змінюється при зволоженні та забрудненні оливи, і тому може слугувати діагностичною ознакою, і інформацію про наявність зволоження оливи може дати її показник « $tg\delta$ », проте за наявності в оливі води в розчиненому стані, цей показник не є інформативним: різке зростання « $tg\delta$ » відбувається тільки за умови виникнення в оливі водної емульсії [3].

Електричні генератори є складними електричними машинами, надійна робота яких залежить від успішної роботи всіх допоміжних пристроїв, до яких, належать системи циркуляції оливи [21]. У турбогенераторах з водневим охолодженням запобігання витоку водню в місці виходу валу ротора з корпусу генератора здійснюється за допомогою спеціальних оливних ущільнень валу. Робочі поверхні вкладишів ущільнень в підшипниках залиті бабітом і мають спеціальне оброблення. Велика частина оливи, що пройшла через ущільнення і зняла теплові втрати тертя, зливається на бік повітря в картер підшипника,

менша частина оливи зливається на сторону водню, а потім по трубопроводу в гідравлічний затвор системи оливопостачання ущільнень. Досвід експлуатації показує, що аварійні режими подачі оливи часто супроводжуються проривом водню через ущільнення і виплавлянням бабіту вкладиша відповідного підшипника. При експлуатації на валу синхронних електричних машин наводиться електрорушійна сила, тому в контурі «вал – підшипник – фундамент – інший підшипник або інший бік валу (стосовно генератора)» може проходити електричний струм: за щільністю струму, який проходить через ковзну поверхню вкладишів підшипників і шийки валу,  $0,2 \text{ A/cm}^2$  і більше можуть виникати uszkodження, що призводять до деградації оливи, електроерозії з утворенням газів [8; 21]. Електрична напруга на валу у разі дуже малого електричного опору контуру (в тому числі при зменшенні кількості оливи в зоні терті в підшипнику), може призвести до проходження електричних струмів, обчислювальних сотнями й навіть тисячами ампер, унаслідок чого можливо uszkodження валу і вкладишів, намагнічування елементів турбіни й надмірне нагрівання її елементів. Аналогічні процеси протікають і під час електричного замикання «на землю». Контроль за вмістом утворених газів, що розчиняються в оливі, дозволяє визначати початок таких uszkodжень [21]. Відомо, що електроерозійні uszkodження металу підшипників мають активно-ємнісний характер [21]. У вигляді конденсатора виступає конструкція: «вкладиш підшипника – олива – вал». Електричний пробій оливної плівки може статися за досить високої напруги, або в разі перекошу самого підшипника (наприклад внаслідок вібрації), коли з'являються зони з надмірно тонким (відносно норми) шаром оливи. На рис. 1 показано розповсюдження можливих паразитних контурних електричних токів.

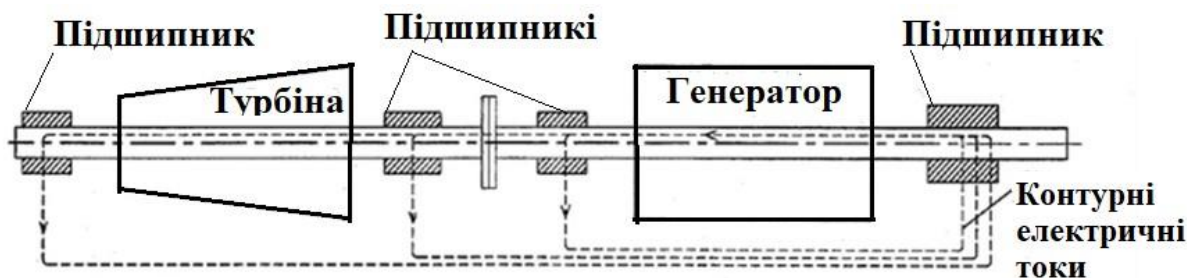


Рис. 1. Паразитні контурні електричні токи

Джерело: адаптовано з роботи [21].

Наведена інформація в літературних джерелах [1–21] вказує на неповноту відомостей про вплив імпульсного електричного струму високої напруги на деградацію мінеральних або синтетичних вогнестійких турбінних олив. Усе це вимагає проведення відповідних досліджень із залученням сучасних мінеральних або синтетичних вогнестійких турбінних олив, що знаходяться в експлуатації в оливонаповненому тепломеханічному обладнанні електростанцій в Україні.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Попри наявність великої кількості досліджень впливу електричних розрядів на деградацію мінеральних електроізоляційних олив, удосконалення методів визначення впливу електричних розрядів на деградацію сучасних мінеральних або синтетичних вогнестійких турбінних олив, є необхідністю для діагностування стану цих турбінних олив та розробки заходів для недопущення такої деградації або зниження її впливу на якість турбінних олив у процесі їх експлуатації в оливонаповненому тепломеханічному обладнанні електростанцій.

**Мета статті.** Головною метою статті є підвищення надійності результатів діагностування стану турбінних олив за рахунок удосконалення методів визначення впливу електричних розрядів на деградацію сучасних мінеральних або синтетичних вогнестійких турбінних олив.

Завдання дослідження: 1) розроблення принципової схеми установки для дослідження впливу імпульсного електричного струму високої напруги на деградацію мінеральних та синтетичних вогнестійких турбінних олив; 2) дослідження характеру залежності електричної пробивної напруги турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» від вмісту в ній води; 3) дослідження характеру залежності електричної пробивної напруги для турбінних олив «Тп-22 (марка 1)» і «Furquel®L» від вмісту в них води  $W$  в інтервалі температур  $t = 20 - 100$  °C; 4) дослідження залежності показника «тангенс кута діелектричних втрат ( $tg\delta$ )» для турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» від вмісту в ній мурашиної кислоти при температурі  $t = 20$  °C; 5) дослідження впливу імпульсної електричної напруги на деградацію осушених турбінних олив «Тп-22 (марка 1)» і «Furquel®L» з утворенням в них розчинених газів в залежності від вмісту води в цих оливах при температурі  $t = 20$  °C; 6) дослідження наявності сірководню ( $H_2S$ ) у водні над поверхнею осушеної турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» у вимірювальній комірці, що заповнена газоподібним воднем; 7) дослідження наявності діоксиду сірки ( $SO_2$ ) у повітрі над поверхнею осушеної турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» у вимірювальній комірці, що заповнена газоподібним повітрям; 8) дослідження наявності фосфіну ( $PH_3$ ) у водні над поверхнею осушеної турбінної оливи «Furquel®L» у вимірювальній комірці, що заповнена газоподібним воднем.

**Виклад основного матеріалу.** Об'єкти досліджень: методи визначення впливу електричних розрядів на деградацію турбінних олив. Предмети досліджень: а) мінеральна турбінна олива «Тп-22 (марка 1)» та вогнестійка синтетична турбінна олива «Furquel®L» (на основі трикселенілфосфатів), що містять у собі розчинені гази  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ; воду в інтервалі 0,0005–0,11 % маси; б) потоки водню або повітря, що знаходяться над поверхнею відповідної турбінної оливи, та містять у собі гази  $H_2S$ ,  $PH_3$ ,  $SO_2$ .

При виконанні досліджень було використано:

1. Засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) та випробувальне обладнання: а) газовий хроматограф «Кристалл-2000М» для визначення вмісту розчинених газів  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  в турбінних оливах за методами ГХ [16; 17]; б) установка «УИМ-90» – для визначення електричної пробивної напруги  $U$  для турбінних олив за методом [22]; в) установка «Тангенс-3М» – для визначення показника « $tg\delta$ » для турбінних олив за методом [22]; г) індикаторні трубки типу SPH-1L (діапазон вимірювань 0,05–2,5 ppm для  $PH_3$ ) [23] для визначення вмісту  $PH_3$  в газових потоках; індикаторні трубки типу Dräger-Tube (діапазон вимірювань: 0,2–5 ppm для  $H_2S$  та 0,1–3 ppm для  $SO_2$ ) для визначення вмісту  $H_2S$  та  $SO_2$  в газових потоках [24]. До виконання електричних пробів гази  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $PH_3$  у газових фазах над поверхнею осушених турбінних олив відсутні; д) пристрій для прискорення досягнення рівноваги з обертовим барабаном для розміщення в ньому шприців об'ємами до  $50$  см<sup>3</sup> з аналізованими пробами турбінних олив і газоподібними екстрагентами для встановлення фазових рівноваг у системах «турбінна олива – екстрагент (газоподібний аргон (Ar))»; градуйовані газоподібні суміші  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  в аргоні; суміші турбінних олив із дистильованою водою. Вимірювання вмісту газів у турбінних оливах виконано при температурі  $t_i = (20 \pm 0,5)$  °C. Тривалість газової екстракції компонентів із турбінних олив – не менше, ніж 1 година.

2. Методи: а) визначення вмісту води в турбінних олив кулонометричним титруванням [2]; б) ГХ визначення концентрацій розчинених газів у турбінних оливах; колориметричного визначення вмісту  $PH_3$ ,  $H_2S$ ,  $SO_2$  в газових потоках із застосуванням індикаторних трубок [23; 24]. При визначенні вмісту розчинених газів в турбінних оливах використано: статичний варіант методу ГХ вимірювань із застосуванням газоподібного екстрагента і відповідних варіантів методик аналізів рівноважної газової фази в системах

«турбінна олива – розчинений компонент – газоподібний екстракт»; метод абсолютного градування при визначенні вмісту компонентів в газоподібних екстрактах з використанням відповідних газоподібних градувальних сумішей [16; 17]. Умови виконання ГХ досліджень під час визначення вмісту розчинених газів у турбінних оливах відповідають вимогам [16; 17]. При дослідженні вмісту  $\text{PH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$  в газових потоках після впливу імпульсної електричної напруги на відповідні турбінні оливи, застосовано пристрій для приготування ізоляційної оливи, що насичена розчиненим газом за методикою [7].

1. На рис. 2 показано розроблену схему установки для дослідження (УД) впливу імпульсного електричного струму високої напруги на деградацію мінеральних та синтетичних вогнестійких турбінних олив.

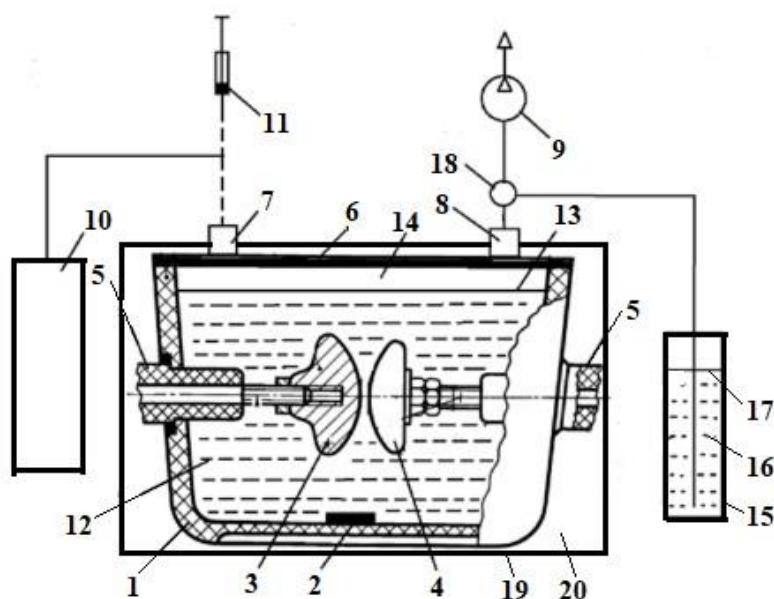


Рис. 2. Схема установки для дослідження впливу імпульсного електричного струму високої напруги на деградацію турбінної оливи:

- 1 – корпус вимірювальної комірки; 2 – магнітна мішалка; 3, 4 – електроди;  
 5 – електричні вводи; 6 – герметизуюча кришка; 7 – вузол для підведення потоку повітря (або  $\text{H}_2$ ) або для відбирання проби турбінної оливи; 8 – вузол для під'єднання вакуумного насоса або відведення потоку повітря (або  $\text{H}_2$ ); 9 – вакуумний насос;  
 10 – генератор потоку повітря (або  $\text{H}_2$ ); 11 – шприц для відбирання проби турбінної оливи; 12 – досліджувана турбінна олива; 13 – рівень досліджуваної турбінної оливи;  
 14 – повітря (або  $\text{H}_2$ ); 15 – рідинний затвор; 16 – турбінна олива;  
 17 – рівень турбінної оливи; 18 – перемикач газових потоків;  
 19 – термостат; 20 – теплоносії у термостаті

Джерело: розроблено автором.

Установка УД працює таким чином: 1) розміщують ДІ у витяжній шафі; 2) встановлюють вимірювальну комірку 1 у спеціальне гніздо автоматичної вимірювальної установки для визначення електричної пробивної напруги ізоляційних олив, наприклад, типу УИМ-90 з магнітною мішалкою (на рис. 1 – УИМ-90 умовно не показано); 3) готують турбінну оливу із заданою концентрацією в ній води за методикою [16]; 4) при заданій температурі наливають цю турбінну оливу у вимірювальну комірку 1; 5) підключають вакуумний насос 9 до перемикача газових потоків 18 і вакуумують простір над досліджуваною турбінною оливою до залишкового тиску приблизно 100 Па. Відключають вакуумний насос 9 від перемикача газових потоків 18; 6) тимчасово підключають генератор



поток воздуха (или H<sub>2</sub>) 10 до узла 7 для подведения потока воздуха (или H<sub>2</sub>) и продувают им пространство над исследуемой турбинной оливой протягом 5 минут со скоростью приблизительно 5 см<sup>3</sup>/с. Поток воздуха (или H<sub>2</sub>) с этого пространства скидают в атмосферу через ридинный затвор 15, заполненный турбинной оливой; 7) выключают генератор потока воздуха (или H<sub>2</sub>) 10 от узла 7 для подведения потока воздуха (или H<sub>2</sub>); 8) выполняют заданное количество электрических пробоев, например, n = 48, при работающей магнитной мешалке 2 в измерительной камере 1; 9) после выполнения необходимой количества электрических пробоев, через узел 7 выбирают пробу турбинной оливы с помощью шприца 11 для определения в ней концентраций исследуемых компонентов, в том числе с помощью ГХ.

2. В табл. 1 приведены результаты исследования характера зависимости электрической пробивной напряжки U турбинных олив «Тп-22 (марка 1)» (плотность  $\rho_{мо} = 0,90 \text{ г/см}^3$  [25]) и «Furquel®L» (плотность  $\rho_{во} = 1,13 \text{ г/см}^3$  [2]) от содержания в них воды W. Перед выполнением исследований эти турбинные оливы были насыщены воздухом при температуре  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  с помощью [16].

Таблиця 1 – Залежність електричної пробивної напруги турбінних олив «Тп-22 (марка 1)» і «Furquel®L» від вмісту в них води при  $t = 2020 \text{ }^\circ\text{C}$

| Вміст води, W, % маси                                                                     |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| 0,0005                                                                                    | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,006 | 0,008 | 0,01 | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,09 | 0,11 |
| Пробивна напруга U для турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)», кВ                              |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| 45                                                                                        | 30    | 27    | 19    | 15    | 12    | 11   | 10   | 9    | 9    | 9    | 9    |
| Пробивна напруга U для турбінної оливи «Furquel®L», кВ                                    |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
| 50                                                                                        | 32    | 29    | 20    | 16    | 13    | 12   | 11   | 10   | 10   | 10   | 10   |
| Примітки: W – вміст води, % маси; U – електрична пробивна напруга для турбінної оливи, кВ |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |

Джерело: розроблено автором.

На рис. 3 для турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» в графічному вигляді показано характер залежності електричної пробивної напруги від вмісту води  $U = f(W)$  при температурі  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

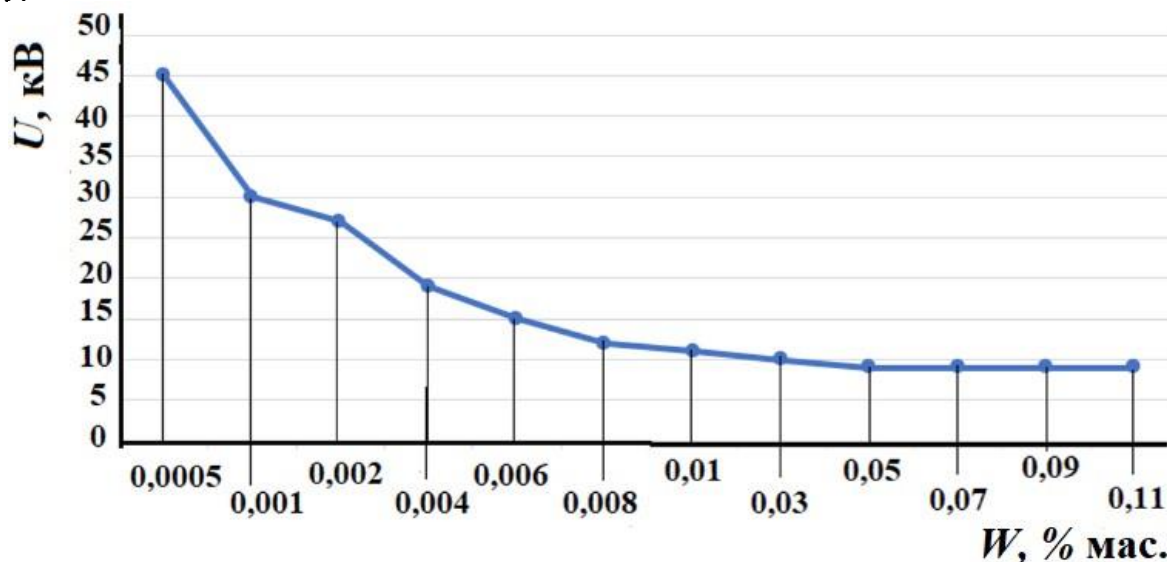


Рис. 3. Залежність електричної пробивної напруги для турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» від вмісту води при температурі  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ :

U – електрична пробивна напруга для турбінної оливи, кВ; W – вміст води, % маси

Джерело: розроблено автором.

Аналогічний характер залежності  $U = f(W)$  виявлено для турбінної оливи «Furquel®L».

З табл. 1 та рис. 3 випливає, що: 1) підвищення концентрації води в досліджених турбінних оливах призводить до зниження електричної пробивної напруги  $U$ ; 2) для турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» за концентрацій води від 0,03 % маси й вище, електрична пробивна напруга практично не змінює свого значення. Це можна пояснити тим, що: рівноважний вміст розчиненої форми води в цій турбінній оливі не змінюється; надмірний вміст вільної форми води не буде більше розчинятися в цій турбінній оливі, й опускається на дно вимірювальної комірки (густина вільної форми води ( $\rho_v = 1,0$  г/см<sup>3</sup>) більша від густини цієї турбінної оливи ( $\rho_{mo} = 0,90$  г/см<sup>3</sup>); 3) для турбінної оливи «Furquel®L»: аналогічно вище наведеному п. 1 при концентраціях води від 0,03 % маси і вище, електрична пробивна напруга практично не змінює свого значення, і це так само можна пояснити тим, що: рівноважний вміст розчиненої форми води в цій турбінній оливі не змінюється; надмірний вміст вільної форми води не буде більше розчинятися в цій турбінній оливі і підійматися над поверхнею цієї турбінної оливи у вимірювальній комірці (густина вільної форми води ( $\rho_v = 1,0$  г/см<sup>3</sup>) менша за густину цієї турбінної оливи ( $\rho_{eo} = 1,13$  г/см<sup>3</sup>); 4) близькість значень електричних пробивних напруг  $U$  для турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» і турбінної оливи «Furquel®L» за однакових концентрацій у них води вказує на можливу близькість інших електрофізичних властивостей (електричний опір; тангенс кута діелектричних втрат  $tg\delta$ ) для цих турбінних олиив.

3. У табл. 2 наведено результати дослідження характеру залежності електричної пробивної напруги  $U$  для турбінних олиив «Тп-22 (марка 1)» і «Furquel®L» від вмісту в них води  $W$  в інтервалі температур  $t = 20-100$  °С. Електричну пробивну напругу виміряно за появою першої електричної іскри, що перебиває весь проміжок між електродами у вимірювальній комірці [15].

Таблиця 2 – Залежність електричної пробивної напруги  $U$  для турбінних олиив «Тп-22 (марка 1)» і «Furquel®L» від вмісту в них води  $W$  в інтервалі температур  $t = 20-100$  °С

| П                                     | Температура, $t$ , °С |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
|---------------------------------------|-----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
|                                       | 30                    | 40 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 | 95 | 100 |
| Електрична пробивна напруга, $U$ , кВ |                       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| № 1                                   | 48                    | 50 | 52 | 53 | 53 | 52 | 52 | 50 | 48 | 47 | 44 | 42 | 41  |
| № 2                                   | 38                    | 43 | 48 | 50 | 53 | 52 | 52 | 50 | 46 | 45 | 43 | 41 | 40  |
| № 3                                   | 28                    | 33 | 42 | 46 | 48 | 48 | 46 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45  |
| № 4                                   | 17                    | 20 | 29 | 38 | 43 | 48 | 49 | 49 | 47 | 45 | 44 | 43 | 42  |
| № 5                                   | 15                    | 18 | 27 | 35 | 40 | 45 | 48 | 48 | 45 | 43 | 41 | 40 | 39  |

Примітки: П – проба турбінної олиив;  $t$  – температура турбінної олиив, °С;  $W$  – вміст вологи, % маси; № 1 – турбінна олиив «Тп-22 (марка 1)» при  $W_1 = 0,002$  % маси; № 2 – турбінна олиив «Тп-22 (марка 1)» при  $W_2 = 0,006$  % маси; № 3 – турбінна олиив «Тп-22 (марка 1)» при  $W_3 = 0,01$  % маси; № 4 – турбінна олиив «Тп-22 (марка 1)» при  $W_4 = 0,03$  % маси; № 5 – турбінна олиив «Furquel®L» при  $W_5 = 0,03$  % маси;  $U$  – електрична пробивна напруга, кВ

Джерело: розроблено автором.

На рис. 4 на підставі даних з табл. 2, як приклад, у графічному вигляді показано характер залежності показника  $U$  від температури в інтервалі температур  $t = 20-100$  °С для турбінних олиив «Тп-22 (марка 1)» (проба № 4,  $W_4 = 0,03$  % маси) і «Furquel®L» (проба № 5,  $W_5 = 0,03$  % маси) (гетерогенні рідини).

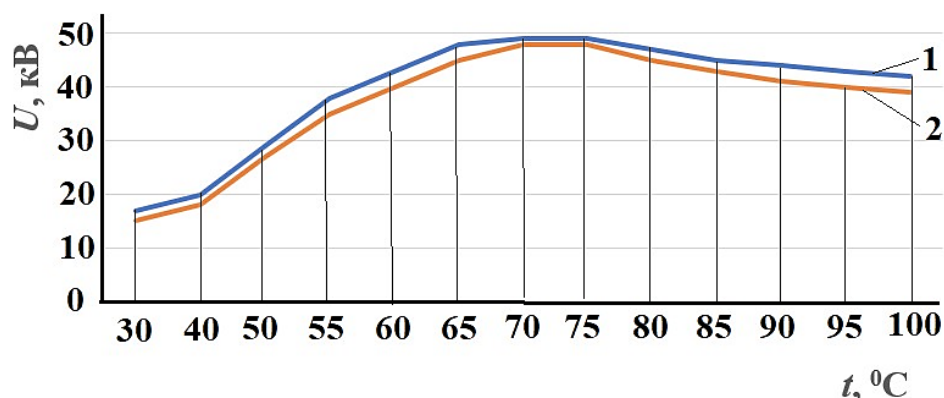


Рис. 4. Залежність показника  $U$  від температури в інтервалі температур  $t = 20-100$  °С для турбінних оливо:

$U$  – електрична пробивна напруга, кВ;  $t$  – температура турбінної оливи, °С;  
 $W$  – вміст вологи, % маси; 1 – проба № 4 (турбінна олива «Тп-22 (марка 1)»;  
 $W_4 = 0,03$  % маси); 2 – проба № 5 (турбінна олива «Furquel®L»,  $W_5 = 0,03$  % маси)  
 Джерело: розроблено автором.

Аналогічний характер залежності показника  $U$  від температури в інтервалі температур  $t = 20-100$  °С виявлено і для проб № 1–3 для турбінних оливо «Тп-22 (марка 1)».

З табл. 2 та рис. 4 випливає, що процеси електричного пробою в досліджених турбінних оливах «Тп-22 (марка 1)» і «Furquel®L» аналогічні процесам, що відбуваються в мінеральних трансформаторних оливах за різних концентрацій у них води [15]. При цьому значення  $U$  для турбінної оливи «Furquel®L» менше, ніж для турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)», і це можна пояснити тим, що турбінна олива «Furquel®L» має меншу гідролітичну стабільність, ніж турбінна олива «Тп-22 (марка 1)» [26].

Аналогічно [15] можна припустити, що: підвищення значення  $U$  в інтервалі температур  $t = 30-75$  °С може бути пов'язане з розчиненням води, що міститься в цих турбінних оливах, з утворенням істинних розчинів; максимум значення  $U$  при температурі 75 °С і наступне зниження значення  $U$  в інтервалі температур  $t = 30-75$  °С може бути пов'язане з початком утворення пароподібної води, оскільки електрична пробивна напруга пароподібної води нижча, ніж електрична пробивна напруга  $U$  турбінних оливо [27].

4). В таблиці 3 наведено результати дослідження залежності показника « $tg\delta$ » для турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» від вмісту в ній  $C_{mk}$  мурашиної кислоти при температурі  $t = 20$  °С (концентрація  $C_{mk} = 99,8$  % маси (ГОСТ 5848 «Реактиви. Кислота мурашина. Технічні умови»). Мурашина кислота попередньо осушена при  $t = 20$  °С за допомогою гранул  $Na_2SO_4$  до остаточного вмісту вологи  $W$  не більше, ніж 0,002 % маси (вимірювання  $W$  – за методикою кулонометричного титрування із реактивом К. Фішера [2]). Перед виконанням досліджень ці турбінна олива були насичені повітрям при температурі  $t = 20$  °С за методикою [16].

Таблиця 3 – Залежність показника « $tg\delta$ » для турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» від вмісту в ній  $C_{mk}$  мурашиної кислоти

|                                                                                                                          |     |     |      |      |     |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|------|------|-----|-----|
| $C_{mk}$ , % мас.                                                                                                        | 0,2 | 1,0 | 1,4  | 2,2  | 2,6 | 2,8 |
| $tg\delta$ , %                                                                                                           | 0,2 | 0,2 | 0,22 | 0,24 | 1,1 | 2,4 |
| Примітки: $C_{mk}$ – вміст мурашиної кислоти в турбінній оливі, % маси; $tg\delta$ – тангенс кута діелектричних втрат, % |     |     |      |      |     |     |

Джерело: розроблено автором.

На рис. 5 для турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» у графічному вигляді показано залежність показника « $tg\delta$ » від вмісту  $C_{mk}$  в цій оливі мурашиної кислоти у вигляді  $tg\delta = f(C_{mk})$  та при вмісті вологи  $W = 0,002$  % маси в цій турбінній оливі.

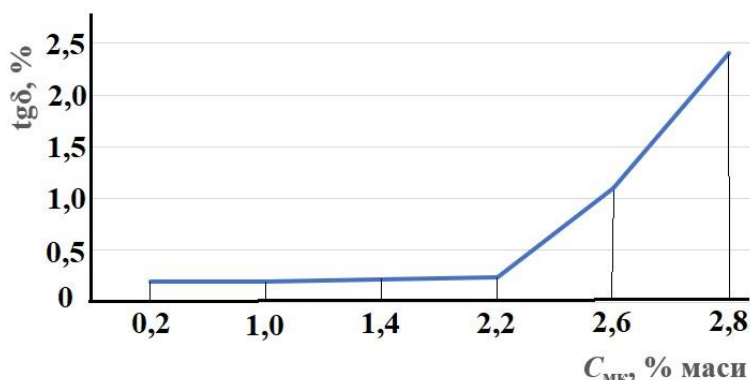


Рис. 5. Залежність показника « $tg\delta$ » від вмісту в турбінній оливі «Тп-22 (марка 1)» мурашиної кислоти:

$tg\delta$  – тангенс кута діелектричних втрат, %;

$C_{mk}$  – вміст мурашиної кислоти в турбінній оливі, % маси

Джерело: розроблено автором.

З табл. 3 та рис. 5 випливає, що: а) мурашина кислота, розчиняючись у дослідженій турбінній оливі й утворюючи в ній істинний розчин, не впливає на показник « $tg\delta$ » до концентрації  $C_{mk} \approx 2,2$  % маси; б) при досягненні концентрації мурашиної кислоти, вищої за межу її розчинності (утворення другої фази у вигляді емульсії в об'ємі турбінної оливи за концентрації мурашиної кислоти  $C_{mk} \approx 2,2$  % маси), значення показника « $tg\delta$ » різко зростає, аналогічно відомим процесам, що відбуваються в мінеральній трансформаторній оливі під час розчинення в ній оцтової кислоти [15].

5). В Таблиці 4 наведено результати дослідження впливу імпульсної електричної напруги на деградацію турбінних олив «Тп-22 (марка 1)» і «Furquel®L» з утворюванням в них розчинених газів в залежності від вмісту води в цих оливах при температурі  $t = 20$  °С. Перед виконанням досліджень ці турбінні оливи були насичені повітрям або воднем при температурі  $t = 20$  °С за методикою [16].

Таблиця 4 – Результати дослідження впливу імпульсної електричної напруги на деградацію турбінних олив «Тп-22 (марка 1)» і «Furquel®L» з утворюванням у них розчинених газів залежно від вмісту води в цих оливах

| Концентрація розчинених газів, $C_i$ , % об.                                             |          |          |        |       |      |                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|--------|-------|------|-----------------|
| $C_2H_6$                                                                                 | $C_2H_4$ | $C_2H_2$ | $CH_4$ | $H_2$ | CO   | CO <sub>2</sub> |
| «Тп-22 (марка 1)», насичена повітрям, $U = 27$ кВ, $W = 0,002$ % маси, гомогенна рідина  |          |          |        |       |      |                 |
| 0,1                                                                                      | 0,2      | 0,38     | 0,13   | 0,5   | 0,2  | 0,2             |
| «Тп-22 (марка 1)», насичена повітрям, $U = 10$ кВ, $W = 0,03$ % маси, гетерогенна рідина |          |          |        |       |      |                 |
| 0,4                                                                                      | 0,1      | 0,2      | 0,09   | 0,6   | 0,2  | 0,2             |
| «Furquel®L», насичена повітрям, $U = 29$ кВ, $W = 0,002$ % маси, гомогенна рідина        |          |          |        |       |      |                 |
| 0,1                                                                                      | 0,1      | 0,2      | 0,1    | 0,4   | 0,18 | 0,15            |
| «Furquel®L», насичена повітрям, $U = 11$ кВ, $W = 0,03$ % маси, гетерогенна рідина       |          |          |        |       |      |                 |
| 0,2                                                                                      | 0,08     | 0,1      | 0,07   | 0,45  | 0,3  | 0,2             |
| «Тп-22 (марка 1)», насичена воднем, $U = 27$ кВ, $W = 0,002$ % маси, гомогенна рідина    |          |          |        |       |      |                 |
| 0,3                                                                                      | 0,1      | 0,2      | 0,12   | 6,5   | 0,12 | 0,2             |
| «Тп-22 (марка 1)», насичена воднем, $U = 10$ кВ, $W = 0,03$ % маси, гетерогенна рідина   |          |          |        |       |      |                 |
| 0,4                                                                                      | 0,09     | 0,15     | 0,12   | 6,5   | 0,11 | 0,18            |
| «Furquel®L», насичена воднем, $U = 29$ кВ, $W = 0,002$ % маси, гомогенна рідина          |          |          |        |       |      |                 |
| 0,11                                                                                     | 0,07     | 0,07     | 0,07   | 7     | 0,25 | 0,15            |
| «Furquel®L», насичена воднем, $U = 11$ кВ, $W = 0,03$ % маси, гетерогенна рідина         |          |          |        |       |      |                 |
| 0,2                                                                                      | 0,07     | 0,05     | 0,09   | 7     | 0,3  | 0,17            |

Примітки:  $C_i$  – концентрація розчинених газів, % об.;  $W$  – вміст води, % маси;  $U$  – електрична пробивна напруга для турбінної оливи, кВ

Джерело: розроблено автором.

З табл. 4 випливає, що: 1) під дією імпульсної електричної напруги на турбінні оливи «Тп-22 (марка 1)» і «Furquel®L» в них утворюються розчинені гази  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ; 2) для турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)», що насичена повітрям: а) при концентрації води  $W = 0,002$  % маси (гомогенна рідина) концентрація водню має найбільше значення серед розчинених газів; б) при концентрації води  $W = 0,03$  % маси (гетерогенна рідина) концентрація водню підвищена із порівняння для  $W = 0,002$  % маси, і також має найбільше значення серед розчинених газів. При цьому концентрації розчинених газів  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$  мають знижені значення із порівняння для  $W = 0,002$  % маси, а концентрації  $C_2H_6$ ,  $H_2$  мають підвищені значення. Це може бути пов'язано із процесом конверсії водяною парою газів  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ ; 3) для турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)», що насичена воднем, характер отриманих результатів аналогічний вищевказаному п. 1; 4) для турбінної оливи «Furquel®L», що насичена повітрям або воднем, характер отриманих результатів аналогічний вище наведених п. 1 і п. 2. При цьому концентрації розчинених газів  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  мають знижені значення із порівняння для турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)». Це може бути пов'язано із різним хімічним складом цих турбінних олив.

6. При дослідженні наявності  $H_2S$  у водні над поверхнею осушеної мінеральної турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» у вимірювальній комірці, що заповнена газоподібним воднем, під час дослідження показників електричної пробивної напруги: температура у вимірювальній комірці  $t = 20$  °C; вміст вологи  $W = 0,002$  % маси в турбінній оливі; кількість послідовних електричних пробів  $n = 48$  з автоматичним перемішуванням цієї турбінної оливи у вимірювальній комірці. Для визначення наявності  $H_2S$  у водні над поверхнею турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» у вимірювальній комірці застосовано індикаторну трубку типу Dräger-Tube. Після виконання електричних пробів результати вимірювань показали наявність  $H_2S$  у водні над поверхнею турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» в кількості 0,5 ppm. Таким чином, при виконанні електричних пробів в об'ємі осушеної турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» у вимірювальній комірці, в атмосфері газоподібного водню накопичується  $H_2S$ , що утворюється із цієї турбінної оливи.

7. При дослідженні наявності  $SO_2$  у повітрі над поверхнею осушеної турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» у вимірювальній комірці, що заповнена газоподібним повітрям, під час дослідження показників електричної пробивної напруги: температура у вимірювальній комірці  $t=20$  0C; вміст вологи  $W = 0,002$  % маси в турбінній оливі; кількість послідовних електричних пробів  $n=48$  з автоматичним перемішуванням цієї турбінної оливи у вимірювальній комірці. Для визначення наявності  $SO_2$  у повітрі над поверхнею турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» у вимірювальній комірці застосовано індикаторну трубку типу Dräger-Tube. Після виконання електричних пробів результати вимірювань показали наявність  $SO_2$  у повітрі над поверхнею турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» в кількості 0,3 ppm. Таким чином, при виконанні електричних пробів в об'ємі турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» у вимірювальній комірці, в атмосфері газоподібного повітря накопичується  $SO_2$ , що утворюється із цієї турбінної оливи.

8. При дослідженні наявності  $PH_3$  у водні над поверхнею турбінної оливи «Furquel®L» у вимірювальній комірці, що заповнена газоподібним воднем, під час дослідження показників електричної пробивної напруги: температура у вимірювальній комірці  $t = 20$  °C; вміст вологи  $W = 0,002$  % маси в турбінній оливі; кількість послідовних електричних пробів  $n = 48$  з автоматичним перемішуванням цієї турбінної оливи у вимірювальній комірці. Для визначення наявності  $PH_3$  у водні над поверхнею турбінної оливи «Furquel®L» у вимірювальній комірці застосовано індикаторну трубку типу SPH-1L. Після виконання електричних пробів результати вимірювань показали наявність  $PH_3$  у водні над поверхнею турбінної оливи «Furquel®L» в кількості 0,07 ppm. Таким чином,

при виконанні електричних пробоїв в об'ємі турбінної оливи «Furquel®L» у вимірювальній комірці, в атмосфері газоподібного водню накопичується  $\text{PH}_3$ , який утворюється з цієї турбінної оливи.

**Висновки.** 1. Розроблено схему установки для дослідження впливу імпульсного електричного струму високої напруги на деградацію мінеральних та синтетичних вогнестійких турбінних олив, що дозволяє виконувати дослідження: а) характеру: залежності електричної пробивної напруги для турбінних олив від вмісту в них води в інтервалі температур  $t = 20\text{--}100\text{ }^\circ\text{C}$ ; залежності показника «тангенс кута діелектричних втрат ( $\text{tg}\delta$ )» для мінеральних турбінних олив від вмісту в них летких водорозчинних органічних кислот, наприклад мурашиної кислоти, при температурі  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ; впливу імпульсної електричної напруги на деградацію турбінних олив з утворенням в них розчинених газів в залежності від вмісту води в цих оливах при температурі  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ; б) наявності сірководню (в мінеральних турбінних оливах) або фосфіну (у вогнестійких синтетичних (на основі трикселенілфосфатів) турбінних оливах) у водні над поверхнею цих турбінних олив у вимірювальній комірці, що заповнена газоподібним воднем; наявності  $\text{SO}_2$  в мінеральних турбінних оливах у повітрі над поверхнею цих турбінних олив у вимірювальній комірці, що заповнена газоподібним повітрям.

2. Для досліджених турбінних олив «Тп-22 (марка 1)» і «Furquel®L» встановлено, що: а) підвищення концентрації води в досліджених турбінних оливах призводить до зниження електричної пробивної напруги; б) за концентрації води від 0,03 % маси й вище, електрична пробивна напруга практично не змінює свого значення.

3. Припущено, що процеси електричного пробою в досліджених турбінних оливах «Тп-22 (марка 1)» і «Furquel®L» аналогічні процесам, що відбуваються в мінеральних трансформаторних оливах за різних концентрацій у них води. При цьому значення електричного пробою для турбінної оливи «Furquel®L» менше, ніж для турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)».

4. Встановлено, що: а) мурашина кислота, розчиняючись у дослідженій турбінній оливі «Тп-22 (марка 1)» й утворюючи в ній істинний розчин, не впливає на показник « $\text{tg}\delta$ » до концентрації приблизно 2,2 % маси; б) при досягненні концентрації мурашиної кислоти, вищої за межу її розчинності (утворення другої фази у вигляді емульсії в об'ємі турбінної оливи за концентрації мурашиної кислоти приблизно 2,2 % маси), значення показника « $\text{tg}\delta$ » різко зростає.

5. Під дією імпульсної електричної напруги в (присутності газоподібного водню) на: а) осушену турбінну оливу «Тп-22 (марка 1)» – в ній утворюються розчинені гази  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ; б) осушену турбінну оливу «Furquel®L» – в ній утворюються розчинені гази  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{PH}_3$ .

6. При виконанні електричних пробоїв в об'ємі осушеної турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» у вимірювальній комірці, в атмосфері газоподібного водню накопичується  $\text{H}_2\text{S}$ , що утворюється із цієї турбінної оливи.

7. При виконанні електричних пробоїв в об'ємі осушеної турбінної оливи «Тп-22 (марка 1)» у вимірювальній комірці, в атмосфері газоподібного повітря накопичується  $\text{SO}_2$ , що утворюється із цієї турбінної оливи.

8. При виконанні електричних пробоїв в об'ємі осушеної турбінної оливи «Furquel®L» у вимірювальній комірці, в атмосфері газоподібного водню накопичується  $\text{PH}_3$ , який утворюється із цієї турбінної оливи.

9. Отримані результати дають змогу для подальшого визначення характеру деградації деемульгуючих, деактивуючих, протизношувальних, протипінних, комбінованих присадок та інгібіторів окиснення і корозії в турбінних оливах під впливом на них постійного

змінного електричного струму та акустичної кавітації у вузлах підшипників турбогенераторів потужністю до 1200 МВт із водневим охолодженням, що оснащені системами циркуляції турбінних олив, для діагностування стану цих турбінних олив та розробки заходів для недопущення такої деградації або зниження її впливу на якість турбінних олив у процесі їх експлуатації та на надійність турбогенераторів.

### Список використаних джерел

1. ГКД 34.20.507-2003. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2003. – 598 с.
2. СОУ НАЕК 085:2020. Турбінні оливи для енергетичного обладнання АЕС. Правила експлуатації. – Київ : НАЕК «Енергоатом», 2020. – 53 с.
3. Сви, П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
4. Гуназа, С. О. Аналіз досвіду експлуатації турбінних олив у ВП АЕС [Електронний ресурс] / С. О. Гунза. – Режим доступу: <https://www.ntseu.net.ua/docs/gunaza>.
5. Коновалов, В. М. Очистка рабочих жидкостей в гидроприводах станков / В. М. Коновалов, В. Я. Скрицкий, В. А. Рокшевский. – Москва : Машиностроение, 1976. – 261 с.
6. Improvement of methods for controlling power oil of cooling tower recycling water supply units at Rivne nuclear power plant / P. Kuznietsov, A. Tykhomyrov, O. Biedunkova, S. Zaitsev // Scientific Horizon. – 2022. – Vol. 25, № 12. – P. 69-79. DOI :10.48077/scihor.25(12).2022.69-79.
7. Современные методы контроля энергетических масел и продуктов их деградации для обеспечения надежности эксплуатации маслonaполненного электрооборудования электрических станций и сетей / С. В. Зайцев, В. А. Кишнеvский, Г. А. Оборский, И. В. Прокопович. – Одесса : Экология, 2019. – 304 с.
8. Жаров, А. П. Предупреждение аварий подшипников паровых турбин / А. П. Жаров. – Москва : Энергия, 1974. – 112 с.
9. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. Діагностика маслonaповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 99 с.
10. Гладышев, Г. П. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС / Г. П. Гладышев, Р. З. Аминов, В. З. Гуревич. – Москва : Высшая школа, 1991. – 303 с.
11. Электроэрозия турбоагрегатов / Л. П. Сафонов, А. А. Вол, В. В. Малеев, А. А. Алфеев // Теплоэнергетика. – 1986. – № 6. – С. 20-23.
12. Казанский, В. Н. Системы смазки паровых турбин / В. Н. Казанский. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
13. Батуева И. Ю. Химия нефти / И. Ю. Батуева, А. А. Гайле, Ю. В. Поконова. – Ленинград : Химия, 1984. – 360 с.
14. Технологія ремонту і експлуатації високовольтних уводів та їх конструктивні особливості / О. І. Гуменюк, О. Є. Рубаненко, О. М. Остапчук, В. Л. Таловер`я, Ю. О. Шаповалов. – Київ : НТУКЦ, 2012. – 552 с.
15. Липштейн, Р. А. Трансформаторное масло / Р. А. Липштейн, М. И. Шахнович. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
16. СОУ-Н ЕЕ 46.302:2006. Підготовка та проведення хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі маслonaповненого електрообладнання : метод. вказівки. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 70 с.
17. IEC 60567:1992-07. Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and the analysis of free and dissolved gases. – Geneva : Switzerland, 2005. – 80 p.
18. IEEE Std C57.104™-2019 (Revision of IEEE Std C57.104 -2008). IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. – Transformers Committee of the IEEE Power and Energy Society / The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue. – New York, NY 10016-5997. USA, 2019. – 98 p.

19. Боярчуков, Г. М. Практические проблемы оценки состояния высоковольтного оборудования по содержанию газов в трансформаторном масле / Г. М. Боярчуков // *Новини енергетики*. – 2010. – № 7. – С. 23-33.
20. Славинский, А. З. Контроль электротехнического оборудования в эксплуатации и при ремонтах / А. З. Славинский. – Москва : Научтехлитиздат, 1999. – 110 с.
21. Посібник з вивчення Правил технічної експлуатації електричних станцій і мереж. Електротехнічне устаткування електричних станцій та мереж, оперативно-диспетчерське керування / О. Г. Баженов, В. О. Бойко, В. М. Браєрський, О. П. Васьковський. – Київ : ДП НТУКЦ «Аселенерго», 2004. – 800 с.
22. СОУ-Н ЕЕ 43.101:2009. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Норми оцінювання якості. – Київ : КВЦ: Міністерство палива та енергетики України, 2009. – 170 с.
23. Трубки індикаторні SPH-1L (для фосфіну) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://greencold.com.ua/index.php/tovary/trubki-indikatornye-sph-1l>.
24. Справочник по индикаторным трубкам и CMS чипам компании Dräger. Анализ почвы, воды и воздуха, а также технических газов [Електронний ресурс]. – Lübeck : Dräger Safety AG & Co. KGaA, 2015. – 458 р. – Режим доступу: [https://www.kpo-elektro.ru/files/Air-flow\\_tester](https://www.kpo-elektro.ru/files/Air-flow_tester).
25. СОУ ВЕА. 100.1/01:2015. Енергетичні оливи та оливні господарства підприємств енергетичної галузі України, та підприємств, де застосовується аналогічне обладнання. Організація експлуатації та технічного обслуговування. Норми та вимоги. – Київ : Стандарт «ВЕА», 2015. – 216 с.
26. СОУ НАЕК 006:2018. Турбінні оливи для енергетичного обладнання АЕС. Технічні вимоги до якості, умов приймання та зберігання. – Київ : НАЕК «Енергоатом». 2018. – 57 с.
27. Костенко, М. А. Техника высоких напряжений / М. А. Костенко. – Москва : Высшая школа, 1973. – 528 с.

### References

1. "GRIFRE". (2003). HKD 34.20.507-2003. Tekhnichna ekspluatatsiia elektrychnykh stantsii i merezh. Pravyla [Technical operation of power plants and networks. Rules]. (GCD 34.20.507-2003). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine.
2. НАЕК "Energoatom". (2020). Turbynni olyvy dlia enerhetychnoho obladdnannia AES. Pravyla ekspluatatsii [Turbine oils for NPP power equipment. Operating rules]. (SOU НАЕК 085:2020).
3. Svi, P.M. (1992). *Metody i sredstva diahnostiki oborudovaniia vysokogo napriazheniia [Methods and means of diagnostics of high voltage equipment]*. Energoatomizdat.
4. Gunaza, S.O. (n.d.). *Analiz dosvidu ekspluatatsii turbinnykh olyv u VP AES [Analysis of the experience of turbine oils operation in NPPs]*. <https://www.ntseu.net.ua/docs/gunaza>
5. Konovalov, V.M., Skritskiy, V.Ya., Rokshevskiy, V.A. (1976). *Ochistka rabochikh zhidkостей v gidroprivodakh stankov [Cleaning of working fluids in hydraulic drives of machine tools]*. Mashinostroenie.
6. Kuznietsov, P., Tykhomyrov, A., Biedunkova, O, Zaitsev, S. (2022). Improvement of methods for controlling power oil of cooling tower recycling water supply units at Rivne nuclear power plant. *Scientific Horizon*, 25, 12, 69–79. DOI:10.48077/scihor.25(12).2022.69-79.
7. Zaitsev, S.V., Kishnevsky, V.A., Oborsky, G.A., & Prokopovich, I.V. (2019). *Sovremennye metody kontrolya energeticheskikh masel i produktov ikh degradatsii dlia obespecheniia nadezhnosti ekspluatatsii maslonapolnennogo elektrooborudovaniia elektricheskikh stantsii i setei [Modern methods for monitoring energy oils and their degradation products to ensure the reliability of operation of oil-filled electrical equipment of power plants and networks]*. Ecology.
8. Zharov, A.P. (1974). *Preduprezhdenie avarii podshipnikov parovykh turbin [Prevention of accidents of steam turbine bearings]*. Energia.
9. "GRIFRE". (2007). *Diahnostyka maslonapovnenoho transformatornogo obladdnannia za rezultatamy khromatohrafichnogo analizu vilnykh haziv, vidibranykh iz hazovoho rele, i haziv, rozchynenykh u izoliatsiinomu masli [Diagnosis of oil-filled transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of free gases selected from the gas relay and gases dissolved in insulating oil. Methodical instructions]* (SOU-N ЕЕ 46.501:2006).



10. Gladyshev, G.P., Aminov, R.Z., Gurevich, V.Z. (1991). *Nadezhnost teploenergeticheskogo oborudovaniia TES i AES [Reliability of thermal power equipment of TPPs and NPPs]*. Higher School.
11. Safonov, L.P., Vol, A.A., Maleev, V.V., Alfeev, A.A. (1986). Elektroeroziia turboagreghatov [Electrical erosion of turbine units]. *Teploenergetika*, 6, 20–23.
12. Kazansky, V.N. (1986). *Systemy smazki parovykh turbin [Lubrication systems of steam turbines]*. Energoatomizdat.
13. Batueva, I.Y., Gayle, A.A., Pokonova, Y.V. (1984). *Khimiia nefi [Chemistry of oil]*. Khimiya.
14. Humenyuk, O.I., Rubanenko, O.E., Ostapchuk, O.M., Taloverya, V.L., Shapovalov, Yu.O. (2012). *Tekhnolohiia remontu i ekspluatatsii vysokovoltnykh uvodiv ta yikh konstruktivni osoblyvosti [Technology of repair and operation of high-voltage inputs and their design features]*. Scientific-Technical Educational and Consultative Center».
15. Lipstein, R.A., & Shakhnovich, M.I (1983). *Transformatornoe maslo [Transformer oil]*. Energoatomizdat.
16. "GRIFRE". (2007). Pidhotovka ta provedennia khromatohrafichnoho analizu vilnykh haziv, vidibranykh iz hazovoho rele, i haziv, rozchynenykh u izoliatsiinomu masli maslonapovnenoho elektroobladnannia : metod. Vkazivky [Preparation and chromatographic analysis of free gases selected from the gas relay and gases dissolved in the insulating oil of oil-filled electrical equipment. Methodical instructions] (SOU-N EE 46.302:2006).
17. International Standard. (1992). Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and the analysis of free and dissolved gases (IEC publication 60567:1992-07).
18. IEEE. (2019). IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. Transformers Committee of the IEEE Power and Energy Society: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA (IEEE Std C57.104™-2019 (Revision of IEEE Std C57.104 - 2008)).
19. Boyarchukov, G.M. (2010). Prakticheskie problemy otsenki sostoianiia vysokovoltного oborudovaniia po sodержaniu hazov v transformatornom masle [Practical problems of the high-voltage equipment state estimation by the gas content in transformer oil]. *Novyny enerhetyky – News of Power Engineering*, 7, 23–33.
20. Slavinsky, A.Z. (1999). *Kontrol elektrotekhnicheskogo oborudovaniia v ekspluatatsii i pri remontakh [Control of electrical equipment in operation and during repairs]*. Nauchtehlitizdat.
21. Bazhenov, O.G., Boyko, V.O., Briersky, V.M., Vaskovskiy, O.P. (2004). *Posibnyk z vyvchennia Pravyl tekhnichnoi ekspluatatsii elektrychnykh stantsii i merezh. Elektrotekhnichne ustatkuvannia elektrychnykh stantsii ta merezh, operativno-dyspetcherske keruvannia [Study guide for the Rules of Technical Operation of Power Plants and Networks. Electrical equipment of power plants and networks, operational and dispatch control]*. SE NTUCC "Aselenergo".
22. KVITS. (2009). Pryimannia, zastosuvannia ta ekspluatatsiia transformatornykh masel. Normy otsiniuvannia yakosti [Acceptance, application and operation of transformer oils. Norms of quality assessment] (SOU-N EE 43.101:2009).
23. Trubky indykatorni SPH-1L (dlia fosfinu) [Indicator tubes SPH-1L (for phosphine)]. (n.d.). <https://greencoltd.com.ua/index.php/tovary/trubki-indikatornye-sph-1l>.
24. Dräger Safety AG & Co. (2015). *Spravochnyk po indykatornym trubkam i CMS chipam kompanii Dräger. Analiz pochvy, vody i vozdukha, a takzhe tekhnicheskikh gazov [A guide to Dräger indicator tubes and CMS chips. Analysis of soil, water and air as well as technical gases]* (17th edition). KGaA. Lübeck. [https://www.kpo-elektro.ru/files/Air-flow\\_tester](https://www.kpo-elektro.ru/files/Air-flow_tester).
25. Standart "VEA". (2015). Enerhetychni olyvy ta olyvni hospodarstva pidprijemstv enerhetychnoi haluzi Ukrainy, ta pidprijemstv, de zastosovuietsia analogichne obladnannia. Orhanizatsiia ekspluatatsii ta tekhnichnoho obsluhovuvannia. Normy ta vymohy [Energy oils and olive farms of enterprises of the energy sector of Ukraine, and enterprises where similar equipment is used. Organization of operation and maintenance. Norms and requirements] (SOU VEA. 100.1/01:2015).
26. NAEK "Energoatom". (2018). Turbinni olyvy dlia enerhetychnoho obladnannia AES. Tekhnichni vymohy do yakosti, umov pryimannia ta zberihanni [Turbine oils for NPP power equipment. Technical requirements for quality, acceptance and storage conditions] (SOU NAEK 006:2018).
27. Kostenko, M.A. (1973). *Tekhnika vysokikh napriazhenii [High voltage technique]*. Vysshaya Shkola.

Отримано 13.12.2023

**Serhi Zaitsev**

PhD in Technical Sciences, engineer of the Department of Nuclear Power Plants  
Odesa Polytechnic National University, (Odesa, Ukraine)

E-mail: [sdjavdet@ukr.net](mailto:sdjavdet@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>

**IMPROVEMENT OF METHODS FOR DETERMINING THE EFFECT OF ELECTRICAL DISCHARGES ON THE DEGRADATION OF TURBINE OILS**

*The article is a publication of scientific and methodical character. Continuous improvement of methods for determining the impact of electric discharges on the degradation of turbine oils to further diagnose the condition of these turbine oils and develop measures to prevent such degradation or reduce its impact on the quality of turbine oils during their operation in oil-filled thermal and mechanical equipment of power plants; ensure, for example, the reliability of hydrogen-cooled turbine generators.*

*Improving methods for determining the effect of electric discharges on the degradation of modern mineral or synthetic fire-resistant turbine oils is necessary to diagnose the condition of these turbine oils, for example, in the bearing units of turbine units with continuous circulation systems of turbine oils in the bearing units.*

*An analysis of research and publications has shown that, despite the availability of a large number of studies on the effect of electric discharges on the degradation of mineral electrical insulating oils, improving methods for determining the effect of electric discharges on the degradation of modern mineral or synthetic fire-resistant turbine oils is necessary to diagnose the condition of these turbine oils and develop measures to prevent such degradation or reduce its impact on the quality of turbine oils during their operation.*

*The aim of the study is to improve the reliability of the results of diagnosing the condition of turbine oils by improving methods for determining the effect of electric discharges on the degradation of modern mineral or synthetic fire-resistant turbine oils.*

*The methods used in the work were: a) determining the water content of turbine oils by coulometric titration; b) gas chromatographic determination of the concentrations of dissolved gases C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> in turbine oils; colourimetric determination of the content of PH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> in gas streams using indicator tubes; determination of the electric test voltage and the "dielectric loss tangent" for turbine oils. The results of improving the methods for determining the effect of electric discharges on the degradation of modern mineral turbine oil "Tp-22 (grade 1)" and synthetic fire-resistant turbine oil "Fyrquel®L" depending on their water content are presented. A schematic diagram of the installation for studying the effect of high-voltage pulsed electric current on the degradation of mineral and synthetic fire-resistant turbine oils was developed.*

*Investigated: the nature of the dependence of the breakdown voltage for these turbine oils on their moisture content in the temperature range  $t = 20-100$  0C; the nature of the dependence of the dielectric loss tangent for turbine oil "Tp-22 (grade 1)" on the content of formic acid at a temperature of  $t = 20$  0C; the effect of pulsed electric voltage on the degradation of these turbine oils depending on their water content and with the formation of dissolved gases C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>. For the first time, the presence in the corresponding turbine oils of the process of their degradation under the action of pulsed electric discharges with the formation of gaseous H<sub>2</sub>S, PH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> was investigated. The presented materials can be used for the informed selection or design of measuring equipment for further determining the nature of degradation of demulsifying, deactivating, antiwear, and anti-foam additives, combined additives and oxidation and corrosion inhibitors in turbine oils under the influence of a continuously acting alternating electric current and acoustic cavitation in the bearing units of hydrogen-cooled turbine generators equipped with turbine oil circulation systems, to diagnose the condition of these turbine oils and develop measures to prevent such degradation or reduce its impact on the quality of turbine oils during their operation.*

**Keywords:** electrical oil-filled equipment; mineral turbine oil; synthetic flame-retardant turbine oil; electrical oil breakdown; dissolved gases; gas chromatography.

Fig.: 5. Table: 4. References: 27.

**Любов Паляниця<sup>1</sup>, Наталія Березовська<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>кандидат хімічних наук, доцент кафедри технології органічних продуктів  
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

**E-mail:** [liubov.y.palianytsia@lpnu.ua](mailto:liubov.y.palianytsia@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7891-9434>

**ResearcherID:** R-1871-2017. **Scopus Author ID:** 57194166710

<sup>2</sup>кандидат хімічних наук, доцент кафедри технології органічних продуктів  
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

**E-mail:** [nataliia.i.berezovska@lpnu.ua](mailto:nataliia.i.berezovska@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orsid.org/0000-0002-5658-1452>

**ResearcherID:** R-1845-2017. **Scopus Author ID:** 6507247187

**ВПЛИВ СОРТІВ СПЕЛЬТИ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ  
СПИРТОВОЇ БРАЖКИ**

У роботі визначено технологічні показники спиртової бражки, одержаної біоконверсією спельти озимої (*Triticum spelta* L.) сортів «Зоря України» та «Європа» з використанням комплексів ферментних препаратів різної дії та сухих спиртових дріжджів *Saccharomyces cerevisiae*. Показано, що у бражці, одержаній зі спельти сорту «Європа», нагромаджується на 11 % більше етанолу, зменшується на третину вміст спирторозчинних вуглеводів, декстринів і нерозчиненого крохмалю. У бражці, отриманій зі спельти сорту «Зоря України», спостерігається інтенсивніше піноутворення та збільшення концентрації дріжджів на 17 %. Запропоновано використовувати спельту сорту «Європа» як сировину у технології етанолу. Отримані результати спрямовані на розширення сировинної бази за рахунок сортів спельти з високою крохмалистістю.

**Ключові слова:** спельта; спиртова бражка; ферментні препарати; сусло; дріжджі; етанол.

Рис.: 1. Табл.: 3. Бібл.: 32.

**Актуальність теми дослідження.** Основним видом зернової сировини, що переробляється на підприємствах спиртової галузі в етиловий спирт – вихідний продукт для виготовлення лікєро-горілчаних напоїв високої якості, є пшениця. На сьогодні дедалі більшого поширення набувають реліктові сорти пшениці, такі як спельта, полба, що придатні до екологічного та органічного виробництва [1-3]. Вони добре адаптовані до несприятливих погодних умов, посухи, стійкіші до ураження шкідниками та контамінантною мікрофлорою.

Сорти гексаплоїдної пшениці спельти (*Triticum spelta*) культивують у багатьох країнах Європи, у США, Канаді, Австралії та Азії [4-7]. В Україні її здебільшого вирощують у північних регіонах, менше – в центральних і південних, у тих господарствах, що практикують низькозатратне органічне землеробство [8-9].

Зі спельти одержують органічні продукти, зокрема хліб, макаронні вироби та сухі сніданки [10], а також збалансовані за основними нутрієнтами корми для відгодівлі тварин [11]. Ця культура має хороший потенціал для різноманітного використання.

Враховуючи тенденції розвитку харчової промисловості та органічного землеробства, актуальним є комплексне перероблення спельти як для одержання продуктів функціонального призначення, так і для виробництва етанолу.

**Постановка проблеми.** Якість спирту, що використовується для одержання лікєро-горілчаних виробів, безпосередньо залежить від якості сировини, тому до зерна висуваються все більші вимоги. Перероблення сортів пшениці з високою крохмалистістю за низькотемпературними режимами не викликає суттєвих труднощів у технології спирту. Проте війна в Україні внесла корективи у структуру посівних площ для цього зерна, оскільки певна їх частина знаходиться під окупацією в південних регіонах країни. Крім цього, через несприятливі екологічні чинники та економію мінеральних добрив спостерігається зниження виробництва зерна пшениці та втрати його якості. Так, за останні роки в Україні осінь стала посушливою, зима малосніжною та відносно теплою, а погода весною та влітку – спекотною і сухою [12]. Вищеперелічені чинники зумовлюють

переведення фокусу на інші сорти пшениці, що відрізняються кращою адаптивною здатністю до збіднених ґрунтів і витривалістю до природно-кліматичних умов середовища. При цьому значну увагу приділяють спельті.

На противагу м'якій пшениці, вона невибаглива до умов культивування, оскільки росте на малородючих ґрунтах, стресостійка до холоду та зволоження, а також не потребує надмірного застосування засобів захисту рослин [13]. Спельта відрізняється від пшениці тим, що має вищий вміст білків і ліпідів, нижчий вміст вуглеводів і клітковини. Ці відмінності можуть впливати на її технологічні та функціональні властивості. Завдяки своїм дієтичним властивостям та відмінним смаковим якостям вона має значний попит серед споживачів. Зважаючи на розширення посівних площ для спельти та недостатнє вивчення потенціалу її сучасних сортів у біотехнології етанолу, тема дослідження є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням всебічного вивчення спельти щодо походження, селекції, вирощування в умовах органічного землеробства, харчових властивостей продукції на її основі та можливостей використання в інших галузях присвячено достатню кількість наукових праць [14-16]. Увага до цієї культури як в Україні, так і в країнах Європи зумовлена її придатністю до маловитратного органічного культивування, харчовою та технологічною якістю, що дозволяє частково замінити традиційно вживані сорти пшениці спельтою [17-18]. Хоча вона генетично близька до пшениці, було зазначено [19], що існує чітка розбіжність між спельтою та звичайною пшеницею. Здебільшого вона може містити вищий рівень розчинного білка, харчових волокон і мінеральних речовин (цинку, селену, літію, фосфору, магнію), ніж пшениця залежно від генотипу [20]. Проте згідно з дослідженням [21] встановлено, що в суцільно змеленому спельтовому борошні вміст моно- та дисахаридів є меншим, автолітична активність та активність  $\beta$ -амілази є нижчими порівняно із суцільно змеленим борошном із пшениці.

Результати досліджень показали, що зі спельти можна виробляти лущений солод, який забезпечуватиме виробництво спеціальних харчових продуктів, напоїв і пива. Так, підвищений вміст білків у спельті впливає на появу помутніння в пиві, тому слід цю особливість використовувати для виробництва непрозорого пива зі стабільною каламутністю [22]. У статті [23] запропоновано використовувати спельтове сусло як компонент живильного середовища для вирощування дріжджів, що розширює ринок альтернативних зернових культур. Показана можливість ефективного культивування засівних дріжджів у суслі зі спельти з метою їх використання в технології продуктів бродіння.

На сьогодні здійснюється пошук альтернативних видів сировини для одержання етанолу, який би забезпечував оригінальні органолептичні властивості лікєро-горілчанних напоїв [24]. Одним і таких видів може бути спельта, перероблення якої до спирту є актуальним завданням.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Здійснений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що проблема використання вітчизняних сортів спельти в біотехнології етанолу залишається невирішеною. Найбільш уживаним комерційним сортом в Україні є «Зоря України», проте в його зерні міститься більше білків і менше вуглеводів у порівнянні зі звичайною пшеницею. Вміст етилового спирту у бражці, одержаній зі спельтового сусла з масовою частотою сухих речовин 16,7-16,8 %, знаходився в межах 6,7-7,1 % об. що не забезпечує нормативних виходів цільового продукту [25]. Концентрація дріжджів після бродіння досягла 170-180 млн клітин/см<sup>3</sup>. Під час зброджування сусла також спостерігалось значне піноутворення.

Придатність сировини, що використовується в технології етанолу, насамперед визначається вмістом крохмалю. Зі збільшенням його масової частки у зерні зменшується масова

частка речовин некрохмальної природи. Відомо, що вміст білка в зерні залежить від генотипних особливостей, екологічних чинників та забезпеченості рослин азотом. За умови посухи й загального зниження врожайності масова часта білкових сполук у зерні може збільшуватися. Проте за низьких температур у період наливу зерна та за високої забезпеченості рослин азотом у зерні зменшується вміст білка [26-27]. Для ефективного розщеплення всіх компонентів зернової сировини необхідно підбирати комплекси ферментних препаратів, забезпечувати збереження їх активності [28] та умови гідроферментативного розщеплення з подальшим зброджуванням одержаного сусла до цільових продуктів.

Враховуючи той факт, що продовжуються дослідження зі селекції сортів спельти, можна очікувати такі, що відповідатимуть вимогам виробництва. З огляду на вищезазначене необхідно провести дослідження щодо впливу сортів спельти на показники бражки у технології етанолу.

**Метою роботи** є вивчення впливу двох сортів спельти на технологічні показники спиртової бражки за умов низькотемпературного гідроферментативного оброблення вихідної зернової сировини.

**Виклад основного матеріалу.** Об'єктами досліджень були два вітчизняні сорти зерна спельти озимої *Triticum spelta* L. - «Зоря України» та «Європа», селекціоновані та зареєстровані у Всеукраїнському науковому інституті селекції. Крохмалистість спельти «Зоря України» становила 49,5 %, вологість 9,6 %, зараженість шкідниками – не заражене, засміченість зерновими домішками 0,8 %, а сміттєвими – 1,0 %. Крохмалистість сорту «Європа» становила 54,7 %, вологість 10,5 %, зараженість шкідниками – не заражене, засміченість зерновими домішками 0,6 % та сміттєвими – 0,8 %. Показники визначали згідно з [29]. Зерно вказаних сортів спельти подрібнювали до помелу зі ступенем подрібнення 85,0 % прохідності крізь сито з отворами діаметром 1 мм.

Для досліджень використовували ферментні препарати фірми «Даніско»: Amylex 5T – як джерело  $\alpha$ -амілази, Diazyme SSF – як джерело глюкоамілази, Laminex BG2 – як джерело целюлази і Alphalase AFP – як джерело протеази та сухі спиртові дріжджі *Saccharomyces cerevisiae* - «Deltaferm AL-18» (Німеччина).

Замість із сортів спельти готували змішуванням помелів та води для досягнення масової частки сухих речовин ( $17 \pm 1$ ) % за температури ( $49 \pm 1$ ) °C. Далі вносили розріджувачий ферментний препарат Amylex 4T (0,8 од на 1 грам крохмалю) і витримували за температури ( $76 \pm 1$ ) °C протягом 2,5 год. Після охолодження розрідженої маси до ( $59 \pm 1$ ) °C вносили ферментний апарат Diazyme SSF (5,8 од на 1 грам крохмалю) та здійснювали оцукрювання протягом 45 хв. Як додаткові використовували протеолітичний препарат Alphalase AFP і целюлолітичний Laminex BG2 із розрахунку 0,05 од. ПрЗ/г зерна і 0,3 од.  $\beta$ -ГА/1 г зерна відповідно. Зброджування одержаного сусла здійснювали методом «бродильної проби». Сухі спиртові дріжджі попередньо реактивували. Бродіння тривало 72 год за температури ( $33 \pm 1$ ) °C. Показники спиртової бражки визначали таким чином: величину рН – потенціометрично, видимий вміст сухих речовин – рефрактометрично, концентрацію незброджених вуглеводів – фотоколориметрично з антроновим реактивом [30], концентрацію етилового спирту – ареометричним методом [31] і концентрацію дріжджових клітин визначали методом прямого підрахунку клітин у камері Горяєва.

Для обох сортів спельти «Зоря України» та «Європа» здійснювали низькотемпературне гідроферментативне оброблення зернової сировини за однакових умов. Особливості будови зерна спельти та її хімічного складу порівняно з пшеницею зумовили вирішення насамперед задачі щодо підбору композицій ферментних препаратів для ефективного гідролізу крохмалю та інших компонентів некрохмальної природи. Оскільки його вміст у

досліджуваній зерновій сировині є меншим, ніж в кукурудзі, пшениці, житі, то збільшується частка некрохмальних полісахаридів і білкових сполук. Тому для розщеплення цих компонентів крім розріджуючого та оцукрюючого ферментних препаратів використовували целюлолітичний і протеолітичний. Відповідно дослідження біоконверсії сортів спельти до сусла проводили за такими варіантами: 1 – використовували комплекс ферментних препаратів Amylex 4T і Diazyme SSF; 2 – комплекс ферментних препаратів Amylex 4T, Diazyme SSF і Laminex BG2; 3 – комплекс ферментних препаратів Amylex 4T, Diazyme SSF і Alphasase AFP.

Ефективність дії комплексів ферментних препаратів визначали за реологічними показниками сусла, зокрема за величиною його динамічної в'язкості. Результати досліджень представлено в табл. 1.

*Таблиця 1 – Динамічна в'язкість сусла, одержаного з двох сортів спельти з використанням комплексів ферментних препаратів*

| Сорт спельти | Комплекси ферментних препаратів / динамічна в'язкість сусла, Па·с |                                         |                                            |
|--------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|
|              | Amylex 4T<br>Diazyme SSF                                          | Amylex 4T<br>Diazyme SSF<br>Laminex BG2 | Amylex 4T,<br>Diazyme SSF<br>Alphasase AFP |
| Зоря України | 0,035                                                             | 0,029                                   | 0,033                                      |
| Європа       | 0,026                                                             | 0,021                                   | 0,023                                      |

Із даних табл. 1 видно, що динамічна в'язкість сусла, одержаного з сорту «Європа», є нижчою на 35 % порівняно із суслom, одержаним і спельти «Зоря України» за умови використання комплексу, до складу якого ввійшли лише розріджуючий та оцукрюючий ферментні препарати. Внесення додаткового препарату Laminex BG2 на стадії розріджування крохмалю зменшує динамічну в'язкість сусла на 21-24 % для сортів «Європа» та «Зоря України» відповідно, що пов'язано з розщепленням некрохмальних полісахаридів ( $\beta$ -глюкану, арабіноксилану), які знаходяться у плівчастій частині зерна спельти. Саме з високомолекулярними арабіноксиланами, що містяться в пшениці, тритикале, ячмені та житі пов'язують збільшення в'язкості сусла, хоча для спельти це потребує подальших досліджень [22].

Оскільки спельта у своєму складі має підвищений вміст білків порівняно з іншими зерновими культурами, зокрема пшеницею, то протеаза може забезпечувати додаткове джерело живлення для дріжджів шляхом гідролізу білкових сполук. Використання протеолітичного ферментного препарату Alphasase AFP у комплексі з Amylex 4T і Diazyme SSF незначно зменшує в'язкість сусла, одержаного з сорту «Зоря України». Можливо, під час гідролізу білків, вміст яких у цьому сорті спельти є вищим, утворюються проміжні сполуки, що не сприяють зменшенню величини в'язкості сусла. Для сусла, приготованого із сорту «Європа», цей показник зменшувався на 13 %. Результати досліджень свідчать, що реологічні показники сусла, одержаного зі спельти сорту «Європа», були кращими для усіх трьох варіантів у порівнянні із сортом «Зоря України».

Одержане з двох сортів спельти сусло надалі зброджували за температури  $(33 \pm 1) ^\circ\text{C}$  протягом 72 год та визначали технологічні показники бражки. Варто зазначити, що бродіння відбувалося активніше в суслі (сорт «Європа») за динамікою виділення  $\text{CO}_2$  і повільніше в суслі (сорт «Зоря України»). Крім цього, спостерігалось більше піноутворення в бражці, де сусло готували зі спельти «Зоря України», що пов'язано з підвищеним вмістом білкових речовин.

За результатами досліджень зброджування спельтового сусла, одержаного з сорту «Зоря України», визначали технологічні показники дозрілої бражки (табл. 2). Показано, що найбільший вміст спирту 8,93 % об. був у варіанті 2, де сусло готували з використанням комплексу ферментних препаратів Amylex 4T, Diazyme SSF і Laminex BG2, що

пов'язано з дією целюлази. Натомість у першому варіанті без додаткових ферментних препаратів вміст спирту у бражці був на 2,5 % меншим. Внесення на стадії приготування суслу протеолітичного ферментного препарату збільшує вміст спирту на 1,4 %, що може бути зумовлено розщепленням білкових речовин до засвоюваних дріжджами сполук і збільшенням біомаси, що бере участь у спиртовому бродінні. Динаміка виділення CO<sub>2</sub> показала, що його маса у варіанті 3 є на 1,8 % більшою, ніж у варіанті 1, що відрізняється від нагромадженого спирту. Ймовірно, це зумовлено збільшенням біомаси дріжджів. Щодо варіанта 2, то маса виділеного CO<sub>2</sub> під час бродіння спельтового суслу сорту «Зоря України» збільшилася на 2,4 % відносно варіанта 1.

*Таблиця 2 – Залежність технологічних показників зрілої бражки від комплексу ферментів, що використовувалися для приготування суслу зі спельти сорту «Зоря України»*

| Показники зрілої бражки                          | Комплекс ферментів/варіанти досліджень |                                          |                                            |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|
|                                                  | Amylex 4T,<br>Diazyme SSF              | Amylex 4T,<br>Diazyme SSF<br>Laminex BG2 | Amylex 4T,<br>Diazyme SSF<br>Alphalase AFP |
|                                                  | 1 варіант                              | 2 варіант                                | 3 варіант                                  |
| pH, од.                                          | 4,54                                   | 4,47                                     | 4,58                                       |
| Титрована кислотність, град                      | 0,57                                   | 0,61                                     | 0,55                                       |
| Маса виділеного CO <sub>2</sub> , г/200 г бражки | 15,83                                  | 16,21                                    | 16,11                                      |
| Вміст спирту, % об.                              | 8,71                                   | 8,93                                     | 8,83                                       |
| Вміст вуглеводів, г/100 см <sup>3</sup> :        |                                        |                                          |                                            |
| загальні                                         | 0,66                                   | 0,54                                     | 0,59                                       |
| водорозчинні                                     | 0,59                                   | 0,50                                     | 0,53                                       |
| спирторозчинні                                   | 0,31                                   | 0,25                                     | 0,28                                       |
| декстрини                                        | 0,25                                   | 0,23                                     | 0,23                                       |
| нерозчинений крохмаль                            | 0,06                                   | 0,04                                     | 0,05                                       |

Важливим показником бражки є вміст залишкових вуглеводів, який свідчить про ефективність гідролізу компонентів спельти та процесу бродіння. Вміст загальних вуглеводів збільшувався з 0,54 г/100 см<sup>3</sup> (варіант 2) до 0,66 г/100 см<sup>3</sup> (варіант 1), вміст декстринів був максимальним 0,26 г/100 см<sup>3</sup> у варіанті 1 (табл. 2), вміст нерозчиненого крохмалю знаходився в межах 0,04-0,06 г/100 см<sup>3</sup> з мінімальним значенням у варіанті 2.

Таким чином, за технологічними показниками найкращим варіантом бражки, одержаної зі спельти сорту «Зоря України», був 2, де під час розварювання та оцукрювання використовували комплекс ферментних препаратів Amylex 4T, Diazyme SSF і Laminex.

У результаті дослідження технологічних показників бражки (табл. 3), одержаної зі спельти сорту «Європа», встановлено, що збільшення вмісту спирту на 1,8 % і 2,8 % спостерігали для варіантів 3 і 2 відповідно. Варто зазначити, що ці результати є кращими, ніж для спельти сорту «Зоря України». Маса виділеного CO<sub>2</sub> під час бродіння суслу, приготованого зі спельти сорту «Європа», також була більшою для усіх варіантів порівняно з результатами, одержаними для сорту «Зоря України».

Вміст водорозчинних, спирторозчинних вуглеводів і декстринів у дослідних варіантах змінювався в межах 0,37-0,43 г/100 см<sup>3</sup>, 0,22-0,26 г/100 см<sup>3</sup> та 0,14-0,15 г/100 см<sup>3</sup> бражки відповідно (табл. 3). У порівнянні з бражкою, одержаною зі спельти сорту «Зоря України», вміст загальних (залишкових) вуглеводів для трьох варіантів є меншим на 35-40 %. Щодо вмісту нерозчиненого крохмалю, спостерігали аналогічну до попереднього сорту спельти закономірність за варіантами досліджень, проте його величина була на третину меншою у бражці, приготованій із сорту спельти «Європа».

Таблиця 3 – Залежність хіміко-технологічних показників зрілої бражки від комплексу ферментів, що використовувалися для приготування сусла зі спельти сорту «Європа»

| Показники зрілої бражки                          | Комплекс ферментів/варіанти досліджень |                                          |                                            |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|
|                                                  | Amylex 4T,<br>Diazyme SSF              | Amylex 4T,<br>Diazyme SSF<br>Laminex BG2 | Amylex 4T,<br>Diazyme SSF<br>Alphalase AFP |
|                                                  | 1 варіант                              | 2 варіант                                | 3 варіант                                  |
| pH, од.                                          | 4,34                                   | 4,32                                     | 4,49                                       |
| Титрована кислотність, град                      | 0,65                                   | 0,68                                     | 0,61                                       |
| Маса виділеного CO <sub>2</sub> , г/200 г бражки | 17,51                                  | 18,1                                     | 17,82                                      |
| Вміст спирту, % об.                              | 9,65                                   | 9,92                                     | 9,82                                       |
| Вміст вуглеводів, г/100 см <sup>3</sup> :        |                                        |                                          |                                            |
| загальні                                         | 0,48                                   | 0,40                                     | 0,42                                       |
| водорозчинні                                     | 0,43                                   | 0,37                                     | 0,38                                       |
| спирторозчинні                                   | 0,26                                   | 0,22                                     | 0,24                                       |
| декстрини                                        | 0,15                                   | 0,14                                     | 0,13                                       |
| нерозчинений крохмаль                            | 0,05                                   | 0,03                                     | 0,04                                       |

Важливим технологічним показником бражки є також концентрація дріжджів після завершення бродіння. Результати досліджень, свідчать, що концентрація дріжджових клітин збільшувалася на 11,5-26,2 % у всіх досліджуваних зразках (сорти «Зоря України» та «Європа»), де використовували додаткові ферментні препарати (рис. 1). Внесення протеолітичного препарату Alphalase AFP на стадії гідроферментативного оброблення обох сортів спельти, зумовлювало інтенсивніше розмноження дріжджів у приготованому суслі. Проте вміст етанолу не підвищувався у бражках, одержаних із використанням цього ферментного препарату. Таким чином можна стверджувати, що продукти ферментативного гідролізу білків за участі Alphalase AFP, які містяться у спельті, забезпечують нітрогенвмісне живлення дріжджів та стимулюють їх розмноження під час зброджування сусла.

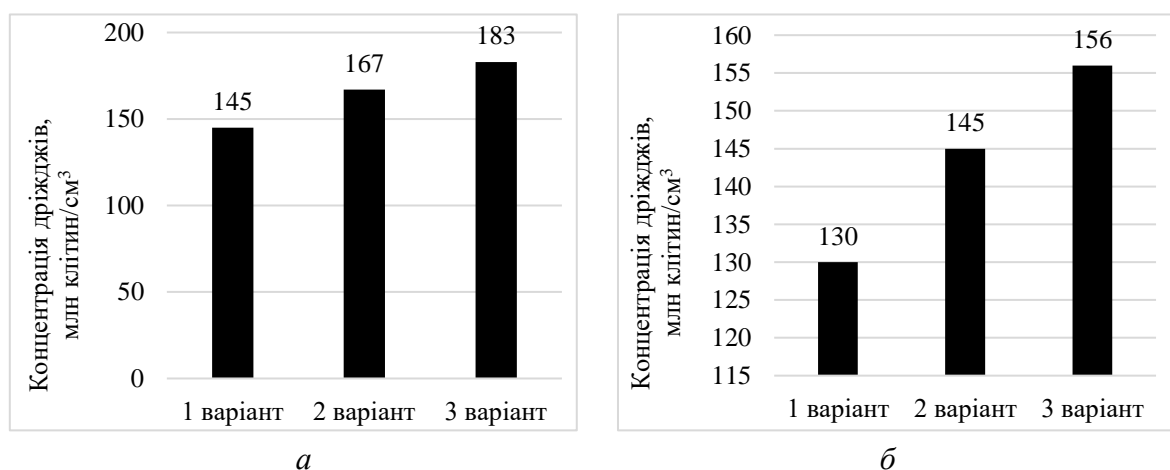


Рис. 1. Концентрація дріжджів у бражці:

а – спельта сорту «Зоря України»; б – спельта сорту «Європа»

Варто зауважити, що у дозрілій бражці, для приготування якої використовували сорт спельти «Зоря України» та протеолітичний ферментний препарат, концентрація клітин збільшувалася на 17,3 % порівняно з бражкою, вихідною сировиною для якої був сорт «Європа» (рис. 1). Це пояснюється значно вищим вмістом білків у зерні сорту «Зоря України», а також вмістом сполук калію, фосфору і вітаміну РР, що містяться не тільки в ендоспермі зерна спельти, але й у його оболонці [32].



На основі вищевикладеного матеріалу можна стверджувати, що у технології етанолу доцільно використовувати спельту сорту «Європа», що характеризується більшим вмістом крохмалю, меншим вмістом білків, кращими технологічними показниками спиртової бражки щодо вмісту у ній спирту, незброджених вуглеводів, маси виділеного CO<sub>2</sub> та нагромаджених дріжджів.

**Висновки.** Визначено технологічні показники спиртової бражки, одержаної біоконверсією спельти озимої (*Triticum spelta* L.) сортів «Зоря України» та «Європа» з використанням комплексів ферментних препаратів розріджуючої, оцукрюючої, целюлолітичної, протеолітичної дії та сухих спиртових дріжджів *Saccharomyces cerevisiae*. Проведені дослідження показали, що у бражці, одержаній зі спельти сорту «Європа», нагромаджується 9,92 % об. етанолу, що на 11 % більше, ніж для сорту «Зоря України», також зменшується на 35-40 % вміст спирторозчинних вуглеводів, декстринів і нерозчиненого крохмалю. У бражці, отриманій зі спельти сорту «Зоря України», спостерігається інтенсивніше піноутворення та збільшення на 17 % концентрації дріжджових клітин. Запропоновано використовувати спельту сорту «Європа» як альтернативну сировину у технології спиртової бражки.

### Список використаних джерел

1. Petrenko, V. Evaluation of three wheat species commonly used in organic cropping systems, considering selected technological parameters for ethanol production. / T. Sheiko, L. Khudolii, V. Bondar // 17th International Scientific Conference Engineering for rural development Proceedings. – Czech University of Life Sciences Prague, 2018. – С. 451-456. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N030.
2. Спельта і полба в органічному землеробстві / О. В. Твердохліб, О. В. Голі, А. К. Нінієва, Р. Л. Богуславський // Посібник українського хлібороба : наук.-практ. зб. – 2013. – С. 154-155.
3. Sedláček, T. Impact of environmental factors to wheat ethanol production in the conditions of Central Europe / T. Sedláček // Cereal Research Communications. – 2010. – № 39. – С. 120-129.
4. Liubych, V.V. Quality features of spelt wheat grain / V. V. Liubych, H. M. Hospodarenko, S. P. Poltoretskyi. – Lambert, 2017. – 110 p.
5. *Triticum aestivum* ssp. *vulgare* and ssp. *spelta* cultivars. 1. Functional evaluation / M. Rodriguez-Quijano, M. E. Vargas-Kostiuk, M. Ribeiro, M. J. Callejo // European food research and technology. 2019. – № 245. – P. 1561-1570. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03263-7>.
6. Lacko-Bartosova, M. *Triticum spelta* — a specialty grain for ecological farming systems / M. Lacko-Bartosova, J. Korczyk-Szabo, T. Razny // Research Journal of Agricultural Science. – 2010. – № 42 (1). – P. 143-147.
7. Gałkowska, D. Characterization of some spelt wheat starches as a renewable biopolymeric material. / D. Gałkowska, T. Witczak, Ja. Korus, L. Juszcak // ISRN Polymer Science (February 5, 2014). – 2014. – P. 1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/361069>.
8. Suvorova, K.Yu. Characteristics of winter spelt wheat (*Triticum spelta* L.) breeding lines in the eastern forest-steppe of Ukraine / K. Yu. Suvorova, O.Yu. Leonov, Z. V. Usova, M. M. Khukhryanska, N. A. Kryshota, R. L. Bohuslavskyi // Selection and Seed Industry. – 2023. – № 123. – P. 48-56. DOI: 10.30835/2413-7510.2023.283648.
9. Корхова, М. М. Продуктивність сортів пшениці спельти озимої в Південному Степу України / М. М. Корхова // Вісник аграрної науки Причорномор'я. – 2019. – № 4. – С. 30-37. DOI: 10.31521/2313-092X/2019-4(104).
10. Ключевич, М. М. Спельта – цінна харчова та лікувальна культура / М. М. Ключевич // Сучасні аспекти збереження здоров'я людини : зб. праць XV Міжнар. міждисц. наук.-практ. конф. – Ужгород : ДВНЗ «УНУ», 2022. – С. 100-104.
11. Подпрятів, Г. І. Придатність зерна пшениці спельти озимої для хлібопекарських та кормових цілей / Г. І. Подпрятів, Н. О. Ящук // Новітні агротехнології. – 2013. – № 1(1). – С. 71-79.
12. Україна: погодні умови та стан озимих культур у лютому 2023 року [Електронний ресурс] / НААН України. – Режим доступу: <https://www.apk-inform.com/uk/exclusive/topic/1532522>.

13. Quality parameters and rheological dough properties of 15 spelt (*Triticum spelta* L.) varieties cultivated today. / M. Wiwart, A. Szafranska, U. Wachowska, E. Suchowilska // Cereal chemistry. – 2018. – № 94 (6). – P. 1037-1044. DOI: <https://doi.org/10.1094/CCHEM-05-17-0097-R/>.
14. Дослідження технологічних властивостей пшениці та спельти як сировини для виробництва борошна і крупи / Д. О. Жигунов, М. Р. Мардар, С. М. Соц, Ю. С. Барковська, Г. Д. Жигунова // Наукові праці НУХТ. – 2018. – № 24 (5). – С. 208-217.
15. Паляниця, Л. Я. Спельта як сировина у біотехнологічних процесах / Л. Я. Паляниця, Н. І. Березовська, З. Г. Піх // Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2020. – № 3 (2). – С. 73-78. DOI: <https://doi.org/10.23939/ctas2020.02.073>.
16. Shewry, P. R. Do «ancient» wheat species differ from modern bread wheat in their contents of bioactive components? / P. R. Shewry, S. Hey // J. Cereal Sci. Elsevier Ltd. – 2015. – № 65. – P. 236-243.
17. *Triticum spelta*: Origin, biological characteristics and perspectives for use in breeding and agriculture / L. M. Babenko, H. M. Hospodarenko, R. V. Rozhkov, Y. F. Pariy, M. F. Pariy, A. V. Babenko, I. V. Kosakivska // Regulatory Mechanisms in Biosystems. – 2018. – № 9 (2). – С. 250-257. DOI: <https://doi.org/10.15421/021837>.
18. Quality of spelt wheat grain cereal products / G. M. Hospodarenko, S. P. Poltoretskyi, V. V. Liubych, V. V. Zheliezna // Bulletin of Uman National University of Horticulture. – 2018. – № 2. – P. 29-34. DOI: 10.31395/2310-0478-2018-21-26-34.
19. Abdel-Aal, E.-S.M. Spelt: a speciality wheat for emerging food uses / E.-S.M. Abdel-Aal, P. Hucl // Speciality grains for food and feed / Eds. E.-S. M. Abdel-Aal, P. J. Wood. – Amer Assn of Cereal Chemists, 2005. – P. 109-141.
20. Comparative study of the content and profiles of macronutrients in spelt and wheat, a review / E. Escarnot, J.-M. Jacquemin, R. Agneessens, M. Paquot // Biotechnol. Agron. Soc. Environ. – 2012. – № 16(2). – P. 243-256.
21. Семенова, А. Б. Удосконалення технології хлібобулочних виробів з використанням продуктів переробки круп'яних культур : автореф. дис.... канд. техн. наук : 05.18.01 «Технологія хлібопекарських продуктів, кондитерських виробів та харчових концентратів» / А. Б. Семенова; Національний університет харчових технологій. – Київ, 2014. – 24 с.
22. Malting process optimization of spelt (*Triticum spelta* L.) for the brewing process / A. Muñoz-Insa, H. Selciano, M. Zarnkow, T. Becker, M. Gastl // LWT - Food Science and Technology. – 2013. – № 50. – P. 99-109.
23. Palianytsia, L. Y. Spelta wheat as a component of the medium for yeast growing / L. Y. Palianytsia, N. I. Berezovska, R. B. Kosiv // Chemistry, technology and application of substances. – 2019. – № 2 (1). – P. 64-68.
24. Ługowoj, S. Traditional and new raw materials for spirit beverage production / S. Ługowoj, M. Balcerek // Folia Biologica et Oecologica. – 2021. – № 17. – P. 70-78. DOI: 10.18778/1730-2366.16.17.
25. Зуб, Н. О. Удосконалення технології спиртової бражки з використанням електрохімічно активованої води : автореф. дис.... канд. техн. наук / Н. О. Зуб; Інститут продовольчих ресурсів Національної академії аграрних наук України. – Київ, 2020.
26. Господаренко, Г. Якість пшениці спельти залежно від особливостей удобрення азотними добривами / Г. Господаренко, І. Ткаченко // Вісник Львівського національного аграрного університету. Серія: Агрономія. – 2014. – № 18. – С. 68-74.
27. The influence of selected agronomic factors on the chemical composition of spelt wheat (*Triticum aestivum* ssp. *spelta* L.) grain / W. Biel, S. Stankowski, A. Jaroszewska, S. Pużyński, P. Boško // Journal of Integrative Agriculture. – 2016. – № 15(8). – P. 1763-1769.
28. Процан, Н. Активація ферментів під час розварювання житніх замісів підвищеної концентрації / Н. Процан, Л. Ткаченко // Технічні науки та технології. – 2020. – № 1 (19). – С. 241-249.
29. Галузевий стандарт України Зерно. Методи визначення умовної крохмалистості (ГСТУ 46.045-2003) [Електронний ресурс] / Міністерство аграрної політики України. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0250555-03#Text>.
30. ДСТУ 7898:2015 Сировина крохмалевмісна для спиртового виробництва. Метод визначення загальної мікробної забрудненості [Електронний ресурс] / Міністерство аграрної політики України. – Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=80832](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80832).

31. СОУ–15.9-37-243:2005 Сировина крохмалевмісна зброджена для виробництва етилового спирту. Методи визначення незброджених вуглеводів. – Київ : Міністерство аграрної політики України, 2006. – 20 с. – (Стандарт організацій Мінагрополітики України).

32. Алавердян, Л. Н. Борошно зі спельти: визначення та обґрунтування тенденцій розвитку ринку, оцінка якості / Л. Н. Алавердян, О. П. Юдичнева, О. В. Романенко // Товарознавчий вісник. – 2019. – № 12. – С. 6-17.

### References

1. Petrenko, V. (2018). Evaluation of three wheat species commonly used in organic cropping systems, considering selected technological parameters for ethanol production. T. Sheiko, L. Khudolii, V. Bondar. *17th International Scientific Conference Engineering for rural development Proceedings* (pp. 451-456). Czech University of Life Sciences Prague. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N030.

2. Tverdokhib, O.V., Holik, O.V., Niniieva, A.K., Bohuslavskiy, R.L. (2013). Spelta i polba v orhanichnomu zemlerobstvi [Spelt in organic farming]. *Posibnyk ukrainskoho khliboroba – Manual of the Ukrainian farmer. Scientific and practical collection, 1*, 154-155.

3. Sedláček, T. (2010) Impact of environmental factors to wheat ethanol production in the conditions of Central Europe. *Cereal Research Communications*, 39, 120-129.

4. Liubych, V.V., Hospodarenko, H.M., Poltoretskyi, S.P. (2017). *Quality features of spelt wheat grain*. Saarbrücken, Germany.

5. Rodriguez-Quijano, M., Vargas-Kostiuk, M.E., Ribeiro, M., Callejo, M.J. (2019). Triticum aestivum ssp. vulgare and ssp. spelta cultivars. 1. Functional evaluation. *European food research and technology*, 245, 1561-1570. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03263-7>.

6. Lacko-Bartosova, M., Korczyk-Szabo, J., Razny, T. (2010). Triticum spelta – a specialty grain for ecological farming systems. *Research Journal of Agricultural Science*, 42(1), 143-147.

7. Gałkowska, D., Witczak, T., Korus Ja., Juszczak L. (2014). Characterization of Some Spelt Wheat Starches as a Renewable Biopolymeric Material. *ISRN Polymer Science*, (February 5, 2014), 1-9. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/361069>.

8. Suvorova, K.Yu., Leonov, O.Yu., Usova, Z.V., Khukhryanska, M.M., Kryshchtopa, N.A., Bohuslavskiy, R.L. (2023). Characteristics of winter spelt wheat (Triticum spelta L.) breeding lines in the eastern forest-steppe of Ukraine. *Selection and Seed Industry*, 123, 48-56. DOI: 10.30835/2413-7510.2023.283648.

9. Korkhova, M.M. (2019). Produktivnist sortiv pshenytsi spely ozymoi v Pivdennomu Stepu Ukrainy [Productivity of winter spelt wheat varieties in the Southern Steppe of Ukraine]. *Visnyk ahrarnoi nauky Prychornomia – Ukrainian Black Sea region agrarian science*, 4, 30–37.

10. Kliuchevych, M.M. (2022). Spelta – tsinna kharchova ta likuvalna kultura [Spelled - the price of a food and medicinal crop]. *Suchasni aspekty zberezhennia zdorovia liudyny : zb. prats KhV Mizhnar. mizhdysts. nauk.-prakt. konf. – Modern aspects of preserving human health: Proceedings of the 15th International Interdisciplinary Scientific and Practical Conference* (pp. 100–104). Uzhhorod: State higher educational institution "Uzhhorod National University".

11. Podpriatov, H.I., Yashchuk, N.O. (2013). Suitability grain of winter wheat spelt for baking and feeding purposes [Prydatnist zerna pshenytsi spely ozymoi dlia khlibopekarskykh ta kormovykh tsilei]. *Novitni ahrotekhnolohii – Advanced Agritechnologies*, 1(1), 71–79.

12. NAAN Ukrainy. (2023). Ukraina: pohodni umovy ta stan ozymykh kultur u liutomu 2023 roku [Ukraine: weather conditions and condition of winter crops in February 2023]. <https://www.apk-inform.com/uk/exclusive/topic/1532522>.

13. Wiwart, M., Szafranska, A., Wachowska, U., Suchowilska, E. (2018). Quality parameters and rheological dough properties of 15 spelt (Triticum spelta L.) varieties cultivated today. *Cereal chemistry*, 94(6), 1037-1044. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-05-17-0097-R/>.

14. Zhyhunov, D.O., Mardar, M.R., Sots, S.M., Barkovska, Yu.S., Zhyhunova H.D. (2018). Doslidzhennia tekhnolohichnykh vlastyvostei pshenytsi ta spely yak syrovyny dlia vyrobnytstva boro-shna i krupy [Research of technological properties of wheat and spelt grain as raw materials for flour and groats manufacturing]. *Naukovi pratsi NUKhT – Scientific Works of NUFT*, 24(5), 208-217.

15. Palianytsia, L.Ia., Berezovska, N.I., Pikh, Z.H. (2020). Spelta yak syrovyna u biotekhnolohichnykh protsesakh [Spelta as a raw material in biotechnological processes]. *Khimiia, tekhnolohiia rehovyn ta yikh zastosuvannia – Chemistry, Technology and Application of Substances*, 3(2), 73-78. <https://doi.org/10.23939/ctas2020.02.073>.
16. Shewry, P.R., Hey, S. (2015). Do «ancient» wheat species differ from modern bread wheat in their contents of bioactive components? *J. Cereal Sci. Elsevier Ltd*, 65, 236-243.
17. Babenko, L. M., Hospodarenko, H. M., Rozhkov, R. V., Pariy, Y. F., Pariy, M. F., Babenko, A. V., Kosakivska, I. V. (2018). Triticum spelta: Origin, biological characteristics and perspectives for use in breeding and agriculture. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 9(2), 250-257. <https://doi.org/10.15421/021837>.
18. Hospodarenko, G.M., Poltoretskyi, S.P., Liubych, V.V., Zheliezna, V.V. (2018). Quality of spelt wheat grain cereal products. *Bulletin of Uman National University of Horticulture*, 2, 29-34. DOI: 10.31395/2310-0478-2018-21-26-34.
19. Abdel-Aal, E.-S.M., & Hucl, P. (2005). Spelt: a speciality wheat for emerging food uses. In E.-S. M. Abdel-Aal, & P. J. Wood (Eds.). *Speciality grains for food and feed*. p. 109-141.
20. Escarnot, E., Jacquemin, J.-M., Agneessens, R., Paquot, M. (2012). Comparative study of the content and profiles of macronutrients in spelt and wheat, a review. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 16(2), 243-256.
21. Semenova, A.B. (2014). *Udoskonalennia tekhnolohii khlibobulochnykh vyrobiv z vykorystanniam produktiv pererobky krupianykh kultur [Improvement of the technology of bakery products using the products of processing of cereal crops]* (Abstract of candidate's thesis, National University of Food Technologies).
22. Muñoz-Insa, A., Selciano, H., Zarnkow, M., Becker, T., Gastl, M. (2013). Malting process optimization of spelt (*Triticum spelta* L.) for the brewing process. *LWT - Food Science and Technology*, 50, 99-109.
23. Palianytsia, L.Y., Berezovska, N.I., Kosiv, R.B. (2019). Spelta wheat as a component of the medium for yeast growing. *Chemistry, technology and application of substances*, 2(1), 64-68.
24. Ługowoj, S., Balcerek, M. (2021). Traditional and new raw materials for spirit beverage production. *Folia Biologica et Oecologica*, 17, 70-78. DOI: 10.18778/1730-2366.16.17.
25. Zub, N.O. (2020). *Udoskonalennia tekhnolohii spyrtovoi brazhky z vykorystanniam elektrokhimichno aktyvovanoi vody [Udoskonalennia tekhnolohii spyrtovoi brazhky z vykorystanniam elektrokhimichno aktyvovanoi vody]* (Abstract of candidate's thesis. Instytut prodovolchyykh resursiv Natsionalnoi akademii ahrarykh nauk Ukrainy).
26. Hospodarenko, H., Tkachenko, I. (2014). Yakist pshenytsi spelty zalezho vid osoblyvosti udobrennia azotnymy dobryvamy [The quality of spelt wheat depending on the peculiarities of fertilization with nitrogen fertilizers]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahraryho universytetu. Seriya: Ahronomiia – Bulletin of Lviv National Environmental University: agronomy*, 18, 68-74.
27. Biel, W., Stankowski, S., Jaroszevska, A., Pużyński, S., Boško, P. (2016). The influence of selected agronomic factors on the chemical composition of spelt wheat (*Triticum aestivum* ssp. *spelta* L.) grain. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(8), 1763-1769.
28. Protsan, N., Tkachenko, L. (2020). Aktyvatsiia fermentiv pid chas rozvariuvannia zhytnykh zamisiv pidvyshchenoi kontsentratsii [Activating of Enzymes While Tenderizing of Rye Batches of High Concentration]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 1(19), 241-249.
29. Ministry of Agrarian Policy of Ukraine. (2004). Haluzevyi standart Ukrainy Zerno. Metody vyznachennia umovnoi krokhmalystosti (HSTU 46.045-2003) [Industry standard of Ukraine. Grain. Methods of determining conditional starchiness] (GSTU 46.045.2003).
30. Ministry of Agrarian Policy of Ukraine. (2006). DSTU 7898:2015 Syrovyna krokhmalevmisna dlia spyrtovoho vyrobnytstva. Metod vyznachennia zahalnoi mikrobnoi zabrudnenosti [Organization standard of the Ministry of Agrarian Policy of Ukraine. Starch-containing raw materials are fermented for the production of ethyl alcohol. Methods of determination of unfermented carbohydrates] (SOU-15.9-37-243:2005).

31. Ministry of Agrarian Policy of Ukraine. (2006). OU–15.9-37-243:2005 Syrovyna krokhmal'evmisna zbrodzhenia dlia vyrobnytstva etylovoho spyrtu. Metody vyznachannia nezbrodzhenykh vuhlevodiv [Organization standard of the Ministry of Agrarian Policy of Ukraine. Starch-containing raw materials are fermented for the production of ethyl alcohol. Methods of determining the volume fraction of ethyl alcohol] (SOU-15.9-37-242:2005).

32. Alaverdian, L.N., Yudychneva, O.P., Romanenko, O.V. (2019). Boroshno zi spely: vyznachennia ta obruntuvannia tendentsii rozvytku rynku, otsinka yakosti [Flour of spelt: determination and justification of trends in market development, quality assessment]. *Tovarovnavchyi visnyk – Commercial Bulletin Lutsk National Technical University*, 12, 6-17.

Отримано 16.11.2023

UDC 663.53

**Liubov Palianytsia<sup>1</sup>, Nataliia Berezovska<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Organic Products Technology  
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: [liubov.y.palianytsia@lpnu.ua](mailto:liubov.y.palianytsia@lpnu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7891-9434>

ResearcherID: R-1871-2017. Scopus Author ID: 57194166710

<sup>2</sup>PhD in Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Organic Products Technology  
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: [nataliia.i.berezovska@lpnu.ua](mailto:nataliia.i.berezovska@lpnu.ua). ORCID <https://orsid.org/0000-0002-5658-1452>

ResearcherID: R-1845-2017. Scopus Author ID: 6507247187

## THE INFLUENCE OF SPELT VARIETIES ON ALCOHOL MASH TECHNOLOGICAL INDICATORS

*Winter spelt (Triticum spelta) has good potential for organic farming and complex processing to obtain functional products and ethanol.*

*Unlike common wheat, spelt is undemanding to growing conditions, as it grows on infertile soils and is stress-resistant to cold and moisture. Due to its dietary properties and good taste, it is of great demand among food consumers.*

*The analysis of the latest research and publications showed that the issues of a comprehensive study of spelt regarding its origin, selection, cultivation in organic farming conditions, nutritional properties of products based on it and possibilities of use in other industries require detailed study.*

*The problem of using domestic varieties of spelt in ethanol biotechnology remains unsolved since the starch content is lower than in other grain crops and does not provide the standard yield of the target product.*

*The work aims to study the effect of two types of spelt on the technological parameters of alcohol mash under the low-temperature hydroenzymatic processing of raw grain material.*

*We proposed to carry out low-temperature hydrofermentative processing of the grinding of two types of spelt «Zoria Ukrainy» and «Yevropa», with the participation of complexes of enzyme preparations of amylolytic, glucoamylase, cellulolytic and proteolytic action. The effectiveness of their action is determined by the rheological indicators of spelt wort and the technological indicators of alcohol mash.*

*The research results showed that the indicators of alcoholic mash obtained from spelt of the «Yevropa» variety are better than from the «Zoria Ukrainy» variety since 11 % more ethanol is accumulated, the content of alcohol-soluble carbohydrates, dextrins, and undissolved starch decreases by 35-40 %, and yeast biomass decreases by 17 %.*

**Keywords:** spelt; alcohol mash; enzyme preparations; wort; yeast; ethanol.

Fig.: 1. Table: 3. References: 28.

**Тетяна Маренкова<sup>1</sup>, Ольга Серета<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>старший викладач кафедри технології харчування  
Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)  
E-mail: [tanya\\_201@ukr.net](mailto:tanya_201@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7481-0848>

<sup>2</sup>старший викладач кафедри технології харчування  
Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)  
E-mail: [seaol@ukr.net](mailto:seaol@ukr.net). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2614-725X>

## ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ ТІСТА ДЛЯ ВАРЕНИКІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІМЕРЕТИНСЬКОГО ШАФРАНУ

У роботі розглянуто актуальні питання з вирішення проблем розширення асортименту борошняних страв із використанням натуральних джерел біологічно активних речовин. Актуальним питанням сучасності є дослідження стародавніх етнічних традицій національних страв різних народних етносів. Тому внесення в рецептуру тіста для вареників істівних квітів надає нової ідеї в пошуку поєднання традиційної рецептури та інноваційного підходу до створення нової продукції. Проведено дослідження технологічних аспектів використання вітчизняної рослинної сировини – сушених квітів чорнобривців (імеретинського шафрану) в технології тіста для вареників. Для визначення показників якості продукції використовували стандартні методи. У статті описано особливості технології приготування прісного тіста для вареників. Розроблений варіант прісного тіста для вареників може бути рекомендовано до складу виробничої програми закладу ресторанного господарства.

**Ключові слова:** борошняні страви; прісне тісто; вареники; імеретинський шафран; квіти чорнобривців; етнічна їжа.  
Табл.: 2. Рис.: 2. Бібл.: 14.

**Актуальність теми дослідження.** В останні десятиліття різноманітні етнічні кухні набувають дедалі більшої присутності на світових ринках. Етнічна їжа розвивається з людської культури, а людські біологічні явища мають значні соціокультурні цінності та є невід'ємною концепцією людських цінностей. Етнічна їжа забезпечує кулінарну різноманітність і відчуття пригоди. Споживачі піклуються про свій вибір їжі настільки, наскільки на їхню власну користь впливають атрибути етнічної їжі.

Перевагами етнічної їжі як основного варіанта харчування або навіть включення її до нових кулінарних технік та інноваційних інгредієнтів у традиційних стравах, ймовірно, сильно залежить від мотивації певних споживачів. У кожного народу є свої історично складені особливості культури у харчуванні. Вони можуть характеризуватися асортиментом продуктів, що входять до складу рецептури, способами їх обробки, вживанням властивих даній кухні спецій та приправ, специфікою в обслуговуванні та режимом харчування.

Українська кухня була створена протягом багатьох століть, тому вона певною мірою відбиває не тільки історичний розвиток українського народу, його звичаї та смаки, а й соціальні умови, природні та кліматичні особливості, у яких перебував український народ в процесі історичного розвитку.

Україна забезпечує населення різноманітними зерновими культурами, і передусім пшеницею. Тому борошняні страви й вироби мають одне із пріоритетних місць в українській кухні. З поширених страв із борошна, які їдять як другу страву в обід або як головну страву на сніданок чи вечерю, слід зазначити вареники. Вареники сміливо можна визначити як національну спадщину українського народу. Господарки готують вареники зі стародавніх часів. Вони можуть слугувати й ритуальною стравною, а іноді й бенкетною – у разі проведення урочистих національних свят.

Проаналізувавши заклади ресторанного господарства м. Суми, які позиціонують себе як заклади української кухні, зазначимо, що в меню залучають вареники з різними удосконаленими начинками. Проте технологія приготування та інгредієнти, що входять до складу тіста, є майже незмінними.

Зазвичай, вареники готують із прісного тіста, у складі якого є борошно пшеничне (вищого ґатунку), яке має низьку біологічну цінність. Відповідно вироби, виготовлені на його основі, характеризуються недостатнім вмістом мінеральних речовин та вітамінів [1].

Для покращення харчової та біологічної цінності вареників перспективним є долучення в їх рецептуру різних видів традиційних та нетрадиційних добавок, які дозволять провести розширення асортименту виробів з підвищеною харчовою цінністю за рахунок збагачення їх незамінними біологічно активними речовинами, макро-, мікронутрієнтами та вітамінами.

**Постановка проблеми.** На сьогодні в умовах конкуренції актуальним стало питання визначення шляхів розширення асортименту й поєднання стародавніх етнічних рецептур у сучасних впровадженнях нової кулінарної продукції.

Аналізуючи побут мешканців стародавніх східних країн, їх дивовижні на той час відкриття, доходимо висновку, що вони володіли секретами особливостей деяких квітів. Вони експериментували, додаючи їстівні квіти до різноманітних страв як повноцінну складову рецептурних компонентів. Ця на перший погляд не традиційна сировина стала популярною серед творців кулінарних шедеврів у багатьох європейських кухнях нашого часу. Дуже пристойно виглядають їстівні квіти, що використовуються у свіжому вигляді для декорування та оздоблення салатів, холодних закусок, десертів. Привабливо та незвичайно виглядають бутони квітів, що використовуються як оболонку при фаршируванні. Додають квіткові композиції при готуванні м'ясних та рибних страв, виробів із тіста як освіжаючий компонент у деяких солодких десертах. Крім естетичної насолоди, їстівні квіти надають стравам пікантного смаку, особливої привабливості. Вони слугують допоміжним джерелом вітамінів, мінеральних речовин, фітонутрієнтів, антоціантів та інших корисних речовин, серед яких найбільш важливими є каротиноїди та флавоноїди [2; 3].

Зростаючий споживчий попит на нові якості та поживні властивості продуктів, викликають інтерес до вживання їстівних квітів. Їстівні квіти володіють властивостями протизапального, противірусного, протипухлинного, антибактеріального, антиоксидантного спектра дій.

Поширеними на території України є чорнобривці, які мають назву *Tagetes*. Квіти чорнобривців привертають на себе увагу з першого погляду. Вони незабутньо сонячні, оксамитові, барвисті, яскраві й позитивні від світло-жовтого до золотаво-коричневого кольору, а іноді з темно-червоним відтінком. Дивлячись на квітку чорнобривців, згадується чудова українська пісня про рідну матусю, що висадила ці квіти біля охайного будиночка дитинства.

Квіти *Tagetes* походять з Мексики. У латино-американській кухні ця рослина є традиційною і використовується як приправа. Можливо зустріти рецепти, де квітки чорнобривців використовуються до м'ясних і овочевих страв або для приготування стародавнього етнічного напою балче [4; 5].

Лікувальні особливості *Tagetes* знайшли застосування в медицині та косметології. Рослина славиться своїми лікувальними ефірними оліями, компонентами якого є оцимен (50 %), цитраль, ліналоол, апінен, сабінен, D-пінен, мірцен, лімонен, n-цимол, D-терпінен. До складу квітів чорнобривців входять калій, кальцій, фосфорні сполуки, мідь, магній, марганець, селен, залізо, цинк, незначний відсоток золота, вітаміни С, А, Е, Р, фолієва кислота.

Квіти чорнобривців додають у супи, бульйони, м'ясні, рибні та овочеві страви, плов, випічку, солодоці. Із суцвіттями чорнобривців розлогих готують борщі, використовують для надання оригінальних властивостей вину, настоянкам. Є досвід додавання квітів чорнобривців при маринуванні або консервуванні овочів. Є пропозиції щодо маринування чи соління окремо бутонів чорнобривців, які взимку додають до перших страв. На зиму можна приготувати суцвіття чорнобривців розлогих у вигляді сухого порошку та вживати за потреби [6; 14].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останнім часом у зв'язку з нестабільністю якості борошна, урізноманітненням функціональних властивостей сировини, пропозиціями щодо розширення асортименту та покращення технологічних властивостей у харчовій промисловості набули широкого застосування харчові добавки з різними принципами дії та хімічним складом. Поліпшення хімічного складу продукту для підвищення його харчової цінності є одним зі шляхів створення продуктів нового покоління. Це досягається шляхом введення до рецептурного складу складних борошняних сумішей різноманітних культур та використання традиційних і нетрадиційних добавок [7].

Напрацювання таких учених, як Л. І. Пучкова, Р. Д. Поландова, В. І. Дробот, А. М. Дорохович, Л. Ю. Арсенєва, В. Ф. Доценко, В. О. Моргун, Т. Б. Циганової, Г. М. Лисюк та багатьох інших, присвячені виготовленню борошняних кулінарних виробів підвищеної харчової цінності.

Л. О. Івашина, Л. Г. Бишовец у своїй роботі провели аналіз сучасного стану національних традицій та гастрономічних уподобань українців, розглянули компоненти рецептурного складу регіональних борщів та розробили технологію борщу під назвою «Борщ Холодноярський» з використанням імеретинського шафрану. Добавки з квітів призвела до розширення асортименту регіональних борщів та створенню страви з новими смаковими особливостями [3].

Н. А. Ткаченко, П. О. Некрасов, С. І. Вікуль, Я. А. Гончарук обґрунтували доцільність використання квітів чорнобривців *Tagetes patula* при розробці молочних продуктів, встановили параметричні показники при екстрагуванні біологічно активних речовин цієї рослини. У їхніх дослідженнях було розроблено рецептуру сироваткових напоїв із лікувально-профілактичними властивостями [2].

Наталія Шаповалова, Світлана Вежлівцева, Дмитро Антюшко дослідили й визначили споживні властивості локшини з внесенням до рецептурного складу порошку з чорнобривців та розрахували оптимальну її кількість при внесенні добавки [8].

Тому **метою статті** є визначення якісних показників тіста для вареників із використанням імеретинського шафрану для розширення асортименту та збагачення харчової цінності кінцевого продукту.

**Виклад основного матеріалу.** Імеретинський шафран – це прянощі. Ця приправа часто використовується у стравах кухні Грузії. Навіть сама назва має походження від західного регіону – Імеретія. Отримують імеретинський шафран шляхом висушування квітів чорнобривців, а саме їхніх пелюсток. У свою чергу, чорнобривці вважаються найбагатшим джерелом природних пігментів серед квітів; пігменти отримують з пелюсток квітів [9]. Найбільш значущими групами пігментів, що присутні в чорнобривцях, є флавоноїди та каротиноїди [10]. Каротиноїди ефіру лютеїну були визначені як переважаючі пігменти в пелюстках чорнобривців [11]. Ці пігменти регулярно трапляються як у їстівних, так і в неїстівних рослинах, і їм приписують багато біологічних активностей, у тому числі антиоксидантну. Крім того, попередні дослідження продемонстрували профілактичну дію як сирого, так і лютеїнового екстракту чорнобривців на гіперглікемію на діабетичних моделях гризунів [12]. В імеретинському шафрані присутній яскраво виражений аромат квітів і фруктів. При додаванні до страв розкривається відчуття медового смаку з ледь гіркуватим пікантним присмаком. Яскравий барвистий колір квітів чорнобривців обумовлено присутністю антоціану. Доведено, що чим більше антоціану, тим квітка має червоніше забарвлення, насичений смак і аромат. До складу імеретинського шафрану входять ефірні олії. За кольорами імеретинський шафран нагадує куркуму й шафран.

При проведенні дослідної роботи тісто для вареників виробляли за традиційною рецептурою. Досліджували вареники з фаршем із картоплі зі шкварками № 1.437 (Збірник рецептур національних страв). Тісто для контрольного зразка замішували з використан-



ням борошна пшеничного вищого сорту. У рецептурі фаршевої композиції зміни традиційних інгредієнтів не застосовували, використовуючи в усіх зразках вареників начинку із фаршу картопляного зі шкварками.

При замісі тіста для вареників у дослідженнях імеретинський шафран додавали у вигляді порошку в кількісному співвідношенні від 0,5 до 1,5 % відносно маси борошна. Попередньо готували суміш борошна та імеретинського шафрану однорідної консистенції. Рецептúra дослідних зразків винесена в табл. 1.

У подальших дослідженнях імеретинський шафран у вигляді порошку в кількості від 0,5...1,5 % вносили при замісі тіста для вареників разом із борошном пшеничним (табл. 1). Попередньо готували однорідну суміш борошна та імеретинського шафрану.

*Таблиця 1 – Рецептúra вареники з картопляним фаршем зі шкварками з внесенням імеретинського шафрану в кількості від 0,5...1,5 %*

| Найменування сировини | Витрати сировини на 1000 г продукції, г |        |        |        |
|-----------------------|-----------------------------------------|--------|--------|--------|
|                       | Контроль                                | 0,5%   | 1,0%   | 1,5%   |
| <i>Для тіста:</i>     |                                         |        |        |        |
| Борошно пшеничне      | 695                                     | 691,52 | 688,05 | 684,57 |
| Яйця                  | 53                                      | 53     | 53     | 53     |
| Вода                  | 245                                     | 245    | 245    | 245    |
| Цукор                 | 25                                      | 25     | 25     | 25     |
| Сіль                  | 12                                      | 12     | 12     | 12     |
| Імеретинський шафран  | -                                       | 3,48   | 6,95   | 10,43  |
| Вихід                 | 1000                                    | 1000   | 1000   | 1000   |
| <i>Для начинки:</i>   |                                         |        |        |        |
| Картопля              | 760                                     | 760    | 760    | 760    |
| Цибуля ріпчаста       | 210                                     | 210    | 210    | 210    |
| Сало шпик             | 190                                     | 190    | 190    | 190    |
| Сіль                  | 10                                      | 10     | 10     | 10     |
| Вихід                 | 1000                                    | 1000   | 1000   | 1000   |

Джерело: розроблено авторами.

Визначено, що введення імеретинського шафрану до рецептурного складу тіста для вареників призводило до зміни органолептичних показників тіста в дослідних зразках № 1, 2 і 3.

Введення в рецептурну суміш тіста 0,5 % імеретинського шафрану від маси борошна (зразок № 1) призводило до незначної зміни кольору тіста, яке набувало ледь жовтуватого відтінку в порівнянні зі зразком-контролем, в структурі тіста змін не виявлено. Після теплової обробки зразок № 1 не мав сторонніх присмаків, виявлявся незначний аромат приправи імеретинського шафрану. Фарш був соковитий, у міру солоний. Тістова оболонка не мала розривів, без непровареного тіста.

Введення в рецептурну суміш тіста 1 % імеретинського шафрану від маси борошна (зразок № 2) призводило до зміни кольору тіста до жовтого відтінку в порівнянні з контрольним зразком. Після теплової обробки вареники зберігали форму, мали добре заліплені краї. Фарш не виступав через тістову оболонку, вареники не злипалися, мали суху поверхню. Тісто мало щільну консистенцію. Готові вироби мали ледь медовий приємний присмак і аромат квітів імеретинського шафрану. В оболонці вареників відсутні розриви, краї добре зліплені. Структура тіста не змінювалася, фарш вареників соковитий у міру солоний.

Введення в рецептурну суміш тіста 1,5 % імеретинського шафрану від маси борошна (зразок № 3) призводило до зміни кольору до забарвлення жовтого відтінку порівняно з контрольним зразком. Консистенції тіста присутня щільність, тістова оболонка без розриву. Структура тіста не змінювалася, фарш соковитий в міру солоний. Вареники мали більш яскравий насичений квітковий аромат; смак гіркуватий.

Профілограму органолептичних показників вареників наведено на рис. 1.

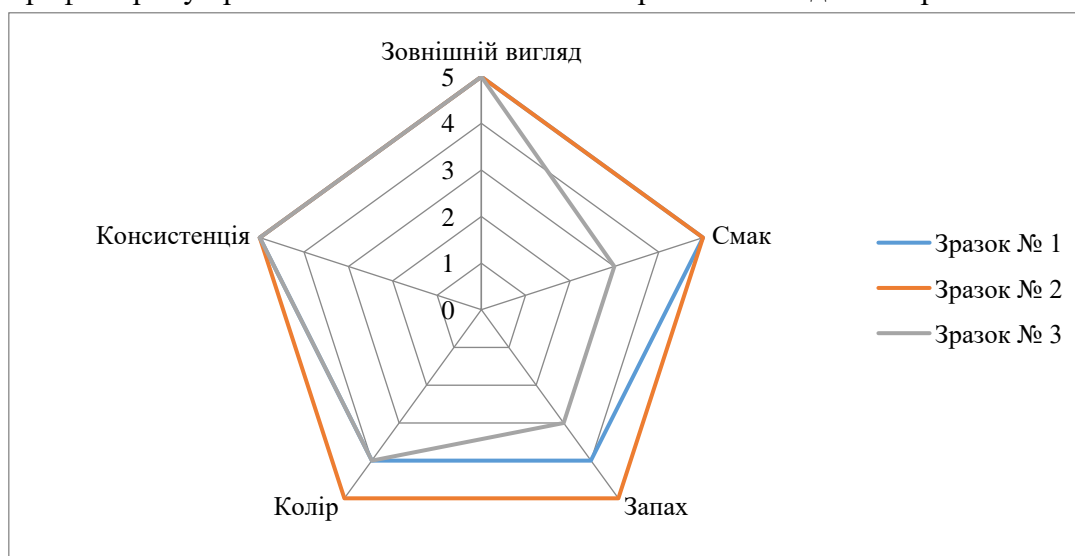


Рис. 1. Профілограма органолептичних показників вареників

Джерело: розроблено авторами.

Технологічна схема напівфабрикату вареників із фаршем картопляним зі шкварками з додаванням імеретинського шафрану до тіста надається на рис. 2.

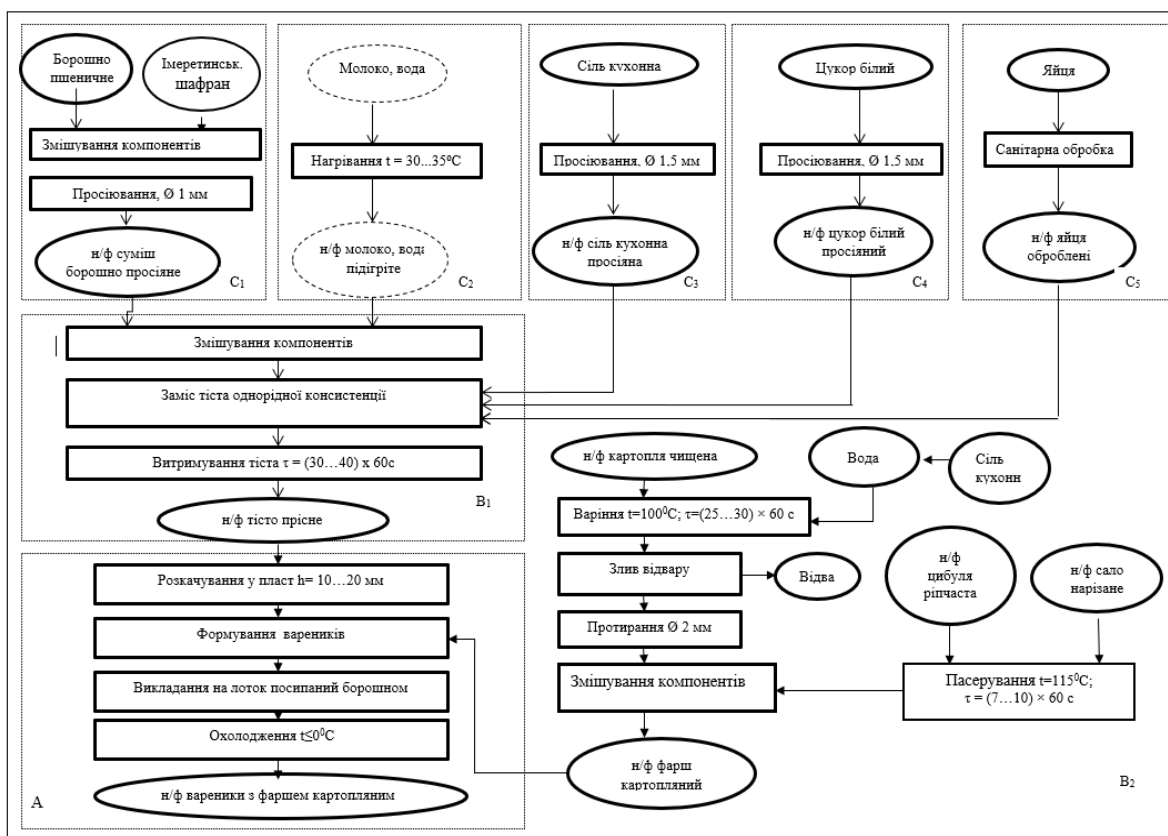


Рис. 2. Технологічна схема напівфабрикату вареників з імеретинським шафраном

Джерело: розроблено авторами.

У табл. 2 наведений підсистемний аналіз виробництва вареників з імеретинським шафраном.

Таблиця 2 – Підсистемний аналіз виробництва вареників з імеретинським шафраном

| Підсистема     | Характеристика                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| C <sub>1</sub> | Утворення н/ф «Суміш борошна просіяне», передбачає змішування борошна пшеничного з імеретинським шафраном, просіювання суміші борошна і добавки через сито Ø 1 мм                                                                                   |
| C <sub>2</sub> | Утворення н/ф «Молоко або вода підігріте», передбачає нагрівання молока або води до t = 30...35 °С                                                                                                                                                  |
| C <sub>3</sub> | Утворення н/ф «Сіль кухонна просіяна», передбачає просіювання солі кухонної через сито Ø 1,5 мм                                                                                                                                                     |
| C <sub>4</sub> | Утворення н/ф «Цукор білий просіяний», передбачає просіювання цукру білого через сито Ø 1,5 мм                                                                                                                                                      |
| C <sub>5</sub> | Утворення н/ф «Яйця оброблені», передбачає санітарну обробку яєць згідно з правилами                                                                                                                                                                |
| B <sub>1</sub> | Утворення н/ф «Тісто прісне» передбачає змішування рецептурних компонентів тіста до однорідної маси та витримання тіста протягом $\tau = (30...40) \times 60$ с                                                                                     |
| B <sub>2</sub> | Утворення н/ф «Фарш картопляний зі шкварками», передбачає відварювання н/ф картоплі очищеної, злив відвару, протирання картоплі, змішування з цибулею пасерованою на салі                                                                           |
| A              | Утворення н/ф «Вареники з фаршем із картоплі зі шкварками» передбачає розкочування тіста у пласт h= 10...20 мм, формування н/ф вареників сирих, викладання їх на посипаний борошном дерев'яний лоток та охолодження до $t \leq 0^{\circ}\text{C}$ ; |

Джерело: розроблено авторами.

**Висновки.** Таким чином оптимальною кількістю імеретинського шафрану у складі тіста для вареників слід вважати 1,0 % від маси борошна пшеничного. Така рецептурна композиція надає вареникам приємного зовнішнього вигляду, незвичайного присмаку. Використання у складі тіста вареників імеретинського шафрану сприяє розширенню асортименту тіста для вареників. Зміна складу співвідношення рецептурних компонентів тіста забезпечує підвищення біологічної та харчової цінності кінцевого продукту з новими властивостями. При цьому поліпшуються органолептичні та функціонально-технологічні властивості готового продукту.

Введення до складу рецептури тіста для вареників продукту рослинного походження з лікувальними або профілактичними властивостями впроваджує здорове харчування серед населення. Тому використання імеретинського шафрану, як джерела біологічно-активних речовин, у виробництві тіста для вареників є актуальним і своєчасним напрямом.

### Список використаних джерел

1. Данилюк, І. Технологія прісного тіста із порошком *atherinarontica* та борошном пророщеного зерна пшениці / І. Данилюк // Технічні науки та технології. – 2017. – № 4(10). – С. 228-234.
2. Оптимізація параметрів екстрагування біологічно-активних речовин квітів *Tagetes Patula* / Н. А. Ткаченко, П. О. Некрасов, С. І. Вікуль, Я. А. Гончарук // Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С. З. Гжицького. – 2016. – № 8(65). – С. 122-132.
3. Івашина, Л. Л. Інновації в технології приготування борщу «Холодноярського» / Л. Л. Івашина, Л. Г. Бишовець // Інновації та технології в сфері послуг і харчування. – 2021. – № 1-2 (3-4). – С. 51-58.
4. Спеція/приправа шафран (імеретинський шафран) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://prom.ua/ua/p1298756591-spetsiyapriprava-zafaranimeretinskij.html>.
5. Імеретинський шафран [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://spiceryshop.com.ua/content/imeretinskii-shafran>.
6. Бербец, Т. М. Їстівні квіти – нова тенденція у сучасній кулінарії / Т. М. Бербец // Вісник Уманського національного університету садівництва. – 2021. – № 2. – С. 52-57.
7. Сучасний стан питання якості та безпечності зерна та зернопродуктів в Україні / Л. М. Хомічак, Г. Д. Гуменюк, Л. В. Баль-Прилипко, Ю. В. Слива // Хлебопекарское и кондитерское дело. – 2010. – № 3(65). – С. 26-29.
8. Шаповалова, Н. Споживні властивості локшини з використанням порошку із суцвіття чорнобривців / Н. Шаповалова, С. Вежлівцева, Д. Антюшко // Товари і ринки. – 2021. – № 4. – С. 102-112.

9. InVitro  $\alpha$ -Amylase and  $\alpha$ -Glucosidase Inhibitory Effects, Antioxidant Activities, and Lutein Content of Nine Different Cultivars of Marigold Flowers / W. Parklak, S. Ounjaijean, K. Kulprachakarn, K. Boonyapranai // *Molecules*. – 2023. – № 28 (3314). – С. 2-11. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28083314>.

10. Investigation into the antioxidant activity and chemical composition of alcoholic extracts from defatted marigold / Y. Gong, X. Liu, W. H. He, H. G. Xu, F. Yuan, Y. X. Gao // *Fitoterapia*. – 2012. – № 83. – С. 481-489.

11. Effect lutein of marigold flower (*Tagetes erecta* L.) on decreasing glucose and malondialdehyde levels in Alloxan-induced blood mice. / Kusmiati, W. Caesariato, F. Afiati, R. Hutabarat // *AIP Conference. Proceedings*. – 2120. – № 1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5115726>.

12. Pharmacological screening of synergistic antidiabetic efficacy of *Tagetes erecta* and *Foeniculum vulgare* / R. Rodda, S. K. Avvari, V. R. Chidrawar, T. R. Reddy // *Int. J. Phytopharm.* – 2013. – № 4(4). – С. 223-229.

13. Компонентний склад та протимікробна дія ефірної олії суцвіть чорнобривців прямоствячих [Електронний ресурс] / О. О. Малюгіна, О. В. Мазулін, Г. П. Смойловська, Г. В. Мазулін, О. К. Єренко // *Фармацевтичний журнал*. – 2014. – № 1. – С. 86-92. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/pharmazh\\_2014\\_1\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/pharmazh_2014_1_14).

14. Малюгіна О. О. Визначення кількісного вмісту флавоноїдів у суцвіттях чорнобривців розлогих і прямоствячих [Електронний ресурс] / О. О. Малюгіна, О. В. Мазулін, Г. В. Мазулін // *Запорізький медичний журнал*. – 2013. – № 6 (18). – С. 88-91. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmzh\\_2013\\_6\\_23](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmzh_2013_6_23).

### References

1. Danyliuk, I. (2017). Tekhnolohiia prisnoho tista iz poroshkom atherinapontica ta boroshnom prorooshchenoho zerna pshenytsi [Technology of fresh dough with atherinapontica powder and sprouted wheat flour]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (4(10)), 228–234.

2. Tkachenko, N.A., Nekrasov, P.O., Vikul, S.I., Honcharuk, Ya.A. (2016). Optymyzatsiia parametriv ekstrahuvannya biologichno-aktyvnykh rehovyn kvitiv *Tagetes Patula* [Optimization of parameters of extraction of biologically active substances of *Tagetes Patula* flowers]. *Naukovyi visnyk LNUVMBT imeni S.Z. Gzhitskoho – Scientific Bulletin of S. Z. Gzhitsky LNUVMBT*, (8(65)), 122–132.

3. Ivashyna, L.L., Byshovets, L.H. (2021). Innovatsii v tekhnolohii pryhotuvannya borshchu «Kholodnoiarskoho» [Innovations in the technology of making "Kholodnoyarskyi" borscht]. *Innovatsii ta tekhnolohii v sferi posluh i kharchuvannya – Innovations and technologies in the field of services and food*, (1-2(3-4)), 51-58.

4. *Spetsiia/pryprava shafaran (imeretynskiy shafiran) [Saffron spice/condiment (Imereti saffron)]*. (n.d.). <https://prom.ua/ua/p1298756591-spetsiyapriprava-zafaranimeretinskij.html>.

5. *Imeretynskiy shafiran [Imereti saffron]*. (n.d.). <https://spiceryshop.com.ua/content/imeretinskii-shafiran>.

6. Berbets, T.M. (2021). Yistivni kvity – nova tendentsiia u suchasniy kulinarii [Edible flowers – a new trend in modern cooking]. *Visnyk Umanskoho natsionalnoho universytetu sadivnytstva – Bulletin of the Uman National University of Horticulture*, (2), 52-57.

7. Khomichak, L.M., Humeniuk, H.D., Bal-Prylypko, L.V., Slyva, Yu.V. (2010). Suchasnyy stan pytannya yakosti ta bezpechnosti zerna ta zernoproduktiv v Ukraini [The current state of the quality and safety of grain and grain products in Ukraine]. *Khlebopekarskoe y kondyterskoe delo – Bakery and confectionery business*, (3(65)), 26–29.

8. Shapovalova, N., Vezhlyvtseva, S, Antiushko, D, (2021). Spozhyvni vlastyivosti lokshyny z vykorystanniam poroshku iz sutsvityta chornobryvtziv [Consumer properties of noodles using marigold inflorescence powder]. *Tovary i rynky – Goods and markets*, (4), 102–112.

9. Parklak, W., Ounjaijean, S., Kulprachakarn, K., Boonyapranai, K. (2023). InVitro  $\alpha$ -Amylase and  $\alpha$ -Glucosidase Inhibitory Effects, Antioxidant Activities, and Lutein Content of Nine Different Cultivars of Marigold Flowers (*Tagetes* spp.). *Molecules*, (28(3314)), 2-11. <https://doi.org/10.3390/molecules28083314>.

10. Gong, Y., Liu, X., He, W.H., Xu, H.G., Yuan, F., Gao, Y.X. (2012). Investigation into the antioxidant activity and chemical composition of alcoholic extracts from defatted marigold (*Tagetes erecta* L.) residue. *Fitoterapia*, (83), 481–489.
11. Kusmiati, Caesariato, W., Afiati, F., Hutabarat, R. (2019). Effect lutein of marigold flower (*Tagetes erecta* L.) on decreasing glucose and malondialdehyde levels in Alloxan-induced blood mice. *AIP Conference. Proceedings*, (2120(1)). <https://doi.org/10.1063/1.5115726>.
12. Rodda, R., Avvari, S.K., Chidrawar, V.R., Reddy, T.R. (2013). Pharmacological screening of synergistic antidiabetic efficacy of *Tagetes erecta* and *Foeniculum vulgare*. *Int. J. Phytopharm*, (4(4)), 223–229.
13. Maliuhina O. O., Mazulin O. V., Smoilovska H. P., Mazulin H. V., Yerenko O. K. (2014). Komponentnyi sklad ta protymikrobna diia efirnoi olii sutsvit chornobryvtsiv priamostoiachykh [Component composition and antimicrobial action of the essential oil of marigold inflorescence]. *Farmatsevtichnyi zhurnal – Pharmaceutical Journal*, (1), 86-92. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/pharmazh\\_2014\\_1\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/pharmazh_2014_1_14).
14. Maliuhina O. O., Mazulin O. V., Mazulin H. V. (2013). Vyznachennia kilkisnoho vmistu flavonoidiv u sutsvittiakh chornobryvtsiv rozlohykh i priamostoiachykh [Determination of the quantitative content of flavonoids in the inflorescences of spreading and upright marigolds]. *Zaporizkyi medychnyi zhurnal – Zaporizhzhya Medical Journal*, (6(18)), 88-91. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmzh\\_2013\\_6\\_23](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmzh_2013_6_23).

Отримано 15.12.2023

UDC 664.65

**Tatyana Marenkova<sup>1</sup>, Olha Sereda<sup>2</sup>,**

<sup>1</sup>senior lecture, Department of Food Technology  
Sumy National Agrarian University (Sumy, Ukraine)

**E-mail:** [tanya\\_201@ukr.net](mailto:tanya_201@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7481-0848>

<sup>2</sup>senior lecture, Department of Food Technology  
Sumy National Agrarian University (Sumy, Ukraine)

**E-mail:** [seal@ukr.net](mailto:seal@ukr.net). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2614-725X>

## QUALITY INDICATORS OF DOUGH FOR DUMPLINGS USING IMERETY SAFFRON

*The work deals with topical issues of solving the problems of expanding the assortment of flour dishes using natural sources of biologically active substances. Attention should be paid to the development of flour dishes of a functional orientation for further offering to consumers in catering establishments. One of the timely trends is the creation of dumplings - national flour dishes of Ukrainian cuisine, giving them a functional orientation through plant-based ingredients. Among such ingredients, it is worth noting the biologically active complex of Imereti saffron, which contains vitamins, minerals, and dietary fibers. It is used as an antioxidant and has a therapeutic and preventive effect.*

*It should also be noted that the research of ancient ethnic traditions of national dishes of various national ethnic groups is an urgent issue of our time. Therefore, adding edible flower dumplings to the dough recipe provides a new idea in the search for a combination of a traditional recipe and an innovative approach to creating new products.*

*A study of the technological aspects of the use of domestic plant raw materials - dried marigold flowers (Imereti saffron) in the technology of dough for dumplings was conducted. Standard methods were used to determine product quality indicators. The characteristics of Imereti saffron as a promising ingredient for the production of fresh dough for dumplings are given.*

*In the course of research, it was determined that the addition of Imereti saffron flowers for dumplings allows to modernize the organoleptic indicators of the quality of the products, has a positive effect on the chemical composition of the dough for dumplings, saturates the dough with macro- and micro-nutrients and dietary fibers necessary for the body. It was established experimentally that when adding Imereti saffron to the composition of the dough recipe for dumplings, it should be considered rational to add flower powder in the amount of 1% to the mass of flour.*

*The article describes the features of the technology of making fresh dough for dumplings, developed a technological scheme for dumplings, and defined subsystem analysis in detail. Dried flowers of marigolds - Imereti saffron are a promising raw material, and the developed variant of fresh dough for dumplings can be recommended as part of the production program of the restaurant industry.*

**Key words:** flour dishes, fresh dough, dumplings, Imereti saffron, marigold flowers, fresh dough, ethnic food.

**Fig.:** 2. **References:** 14.

**Ольга Серета<sup>1</sup>, Оксана Мельник<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри технології харчування  
Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)  
E-mail: [seaol@ukr.net](mailto:seaol@ukr.net). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2614-725X>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології харчування  
Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)  
E-mail: [oxana7@i.ua](mailto:oxana7@i.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9201-7955>. ResearcherID: [ANE-3206-2022](https://orcid.org/0000-0002-9201-7955)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗБИВНОГО БОРОШНЯНОГО НАПІВФАБРИКАТУ З БОРОШНОМ ІЗ ЦВІРКУНІВ**

У статті наведено результати дослідження фізико-хімічних характеристик випеченого збивного борошняного напівфабрикату з додаванням борошна із цвіркунів у кількості від 5,0...15,0 %. Обґрунтовано зміну показників упікання та терміну зберігання бісквітного напівфабрикату. Термін зберігання збивного борошняного напівфабрикату визначали шляхом дослідження процесу усихання напівфабрикату та крихтуватості м'якушки від 2 до 8 діб. За результатами досліджень визначили, що додавання борошна із цвіркунів у рецептуру бісквітного напівфабрикату не впливало на фізико-хімічні показники готових інноваційних виробів.

**Ключові слова:** збивний борошняний напівфабрикат; борошно із цвіркунів; бісквіт круглий; упікання; усихання; крихтуватість м'якушки; термін зберігання.

Рис.: 3. Бібл.: 12.

**Актуальність теми.** Збивні борошняні напівфабрикати (ЗБН) традиційно мають попит у споживачів. Проте термін їх зберігання частково залежить від сировини, що входить до складу рецептури, та умов зберігання. Згідно з нормативними документами, ЗБН без оздоблювання, можуть зберігатись при температурі 18 °С та відносній вологості повітря 75 % протягом 72 год у відкритому стані та протягом 7 діб у картонних коробках [1]. Додавання до ЗБН підвищеної кількості розпушувачів та консервантів, що запобігають розвитку небажаної мікрофлори, також збільшують термін зберігання протягом 1 місяця на великих підприємствах.

Загалом додавання в рецептуру ЗБН інноваційної сировини впливає на фізико-хімічні властивості готового продукту, тобто на процеси черствіння, усихання та крихтуватість м'якушки.

Оскільки процес черствіння випеченого ЗБН пов'язане з процесами зміни стану крохмалю та клейковини борошна, зміна якісного та кількісного складу вуглеводної та білкової фракцій будуть впливати відповідно на фізико-хімічні властивості готового напівфабрикату. Під час випікання зерна крохмалю частково клейстеризуються, зв'язують вільну вологу тіста та воду, що виділяється внаслідок коагуляції білків. А крохмаль частково переходить із кристалічного стану в аморфний, зерна його набухають і збільшуються в об'ємі. При зберіганні ЗБН відбувається зворотний процес: клейстеризований крохмаль з аморфного стану частково переходить у кристалічний, тобто відбувається ретроградація крохмалю [2].

Усихання випеченого ЗБН під час зберігання зумовлює уповільнення швидкості зміни величини деформації м'якушки, а показник крихтуватості ЗБН характеризує його свіжість або ступінь черствіння.

**Аналіз останніх публікацій.** Продукти переробки їстівних комах (борошно, сушені цвіркуні) поступово досліджуються як потенційна альтернатива традиційної худоби та інноваційна сировина завдяки її високому поживному потенціалу та екологічності виробництва [3].

Однак прийнятність продуктів переробки їстівних комах є не досить високою в усьому світі за рахунок культурних факторів та чутливості до комах. Однак використання їстівних комах як харчовий продукт, переважно у вигляді борошна, може бути однією з ефективних стратегій для підвищення харчової цінності продукту та підвищення прийнятності [5].

Дослідниками доведено, що додавання продуктів переробки їстівних комах до хлібобулочних виробів на основі пшеничного борошна, впливало на функціонально-технологічні властивості напівфабрикатів та готових виробів. Cappelli A. зауважив, що для хліба додавання порошку домашнього цвіркуна (*Achetadomesticus*) або личинок борошнистого черв'яка (*Tenebriomolitor*) у кількості більше ніж 15,0 % сприяло збільшенню міцності тіста та зменшенню розтяжності тіста, що зумовило зменшення об'єму хліба [6].

Osimani та ін. досліджували хліб із пшеничного борошна з додаванням борошна з цвіркунів у кількості 10,0–30,0 % і встановили, що технологічні властивості тіста та хліба погіршуються при збільшенні дозування борошна в порівнянні з контрольним зразком [7]. В іншому дослідженні Azzollini та його колеги виявили, що текстурні властивості екструдованих снєків із пшеничного борошна, збагачених борошном із личинок борошнистого хробака (*T. molitor*) у кількості 10,0 %, були подібними до контрольних, тоді як закуски, збагачені 20,0 % борошна з комах, мали погану текстуру [8]. Крім того, Sabuk повідомив, що пористість і об'єм кексу з пшеничного борошна зменшувалися після додавання 15,0 % борошна коника (*Locustamigratoria*) [9].

Таким чином, при включенні певної кількості продуктів переробки їстівних комах у харчовий продукт відбуваються зміни функціонально-технологічних властивостей напівфабрикатів та готового виробу. Зменшення вмісту клейковини внаслідок заміни частини пшеничного борошна борошном із цвіркунів може спричинити зміну фізико-хімічних властивостей готового продукту на основі пшеничного борошна.

Тому, *метою* даної роботи було дослідження вплив борошна із цвіркунів на фізико-хімічні показники якості готового ЗБН.

**Матеріали та методи досліджень.** У цьому дослідженні була запропонована технологія ЗБН за рецептурою бісквіта круглого з додаванням борошна із цвіркунів у кількості 5,0...15,0 % до маси борошна.

Борошно із цвіркунів (БЦ) є джерелом білка (55,0–70,0 % у перерахунку на СР) [9], має високі поживні властивості, містить незамінні амінокислоти, ненасичені жирні кислоти, вітаміни, мінерали [10], хітин і хітозан (бажані антимікробні агенти) [11]. Проте додавання борошна із цвіркунів у рецептуру борошняних кондитерських виробів може впливати на фізико-хімічні показники готових виробів, на протікання процесів черствіння, на здатність до деформації м'якушки та на її крихтуватість. Тому дослідження зазначених властивостей є доцільним для бісквітних напівфабрикатів з використанням нової інноваційної сировини. Зміни фізико-хімічних показників ЗБН досліджувався протягом 8 діб. Їх зберігали в картонних коробках за температури 18–20 °С і відносної вологості повітря 75 % (згідно з ДСТУ 4803:2007).

При дослідженні процесу усихання ЗБН використано криву усихання, яка відображає зміну його числових значень (зниження маси бісквіта) як функцію від  $\tau$  – часу після випікання. Зміну маси бісквіта, а отже, і показника усихання, визначали шляхом зважування свіжовипеченого бісквіта й повторним зважуванням його через кожні 48 год. Крихтуватість м'якушки бісквітного напівфабрикату визначали за відношенням маси крихти, що утворилась унаслідок тертя двох шматків, до маси наважки бісквіта [13], а ступінь її деформації – на автоматизованому пенетрометрі Labor через кожні 48 год [14].

**Результати досліджень.** Відомий факт, що випеченому ЗБН притаманна структура твердої піни. Тому втрата певної кількості вологи під час випікання тістових заготовок призводить до зменшення їхньої маси. У ДСТУ 4803:2007 зазначено, що вологість бісквітних напівфабрикатів повинен бути в межах  $(24 \pm 3) \%$ . Відомо, що показник вологості впливає на упікання виробів. Адже при випіканні ЗБН у структурі тістової маси відбувається перерозподіл та вивільнення вологи.

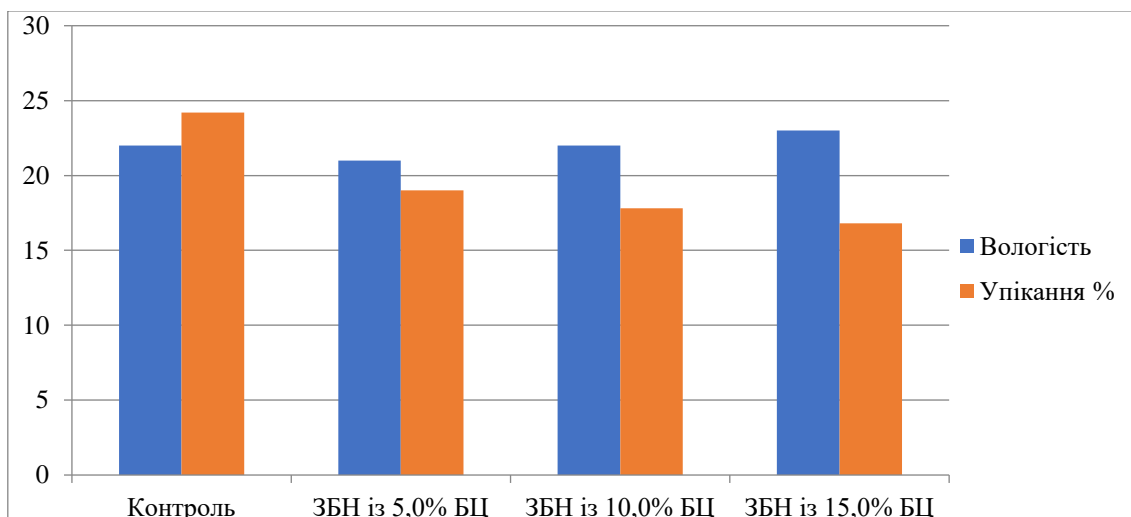


Рис. 1. Порівняльна характеристика показників вологості та упікання у ЗБН з додаванням борошна цвіркунів від 5,0 до 15,0 %

Джерело: розроблено авторами.

За результатами досліджень (рис. 1) додавання БЦ до ЗБН у різній кількості впливає на процес втрати маси та зміни вологості напівфабрикату під час випікання. Так при додаванні до ЗБН у кількості 5,0 % показник вологості в порівнянні з контрольним зразком збільшився на 1,05 %, а показник упікання зменшився на 0,78 %; після додавання 10,0 % БЦ показник вологості збільшується на 1,1%, упікання виробу зменшується на 0,73 %; при додаванні 15,0 % БЦ відповідно вологість збільшується на 1,15 %, упікання зменшується на 0,69 %. Це, ймовірно, пов'язано з гідрофільними властивостями білкових складових БЦ зв'язувати та міцніше утримувати вологу та призводить до зниження показників упікання та збільшення виходу виробу.

Після випікання за технологією ЗБН його необхідно витримати при кімнатній температурі (18...20 °С) протягом 8 год для закріплення структури. У цей час волога перерозподіляється між скоринкою і внутрішнім шаром м'якушки, а частина вологи втрачається з верхнього шару. У результаті утворюється стійка пориста структура, що дозволяє розрізати ЗБН без деформації м'якушки. Після охолодження та витримання виробу наступним етапом стало дослідження впливу додавання БЦ на втрату вологості (усихання) під час зберігання.

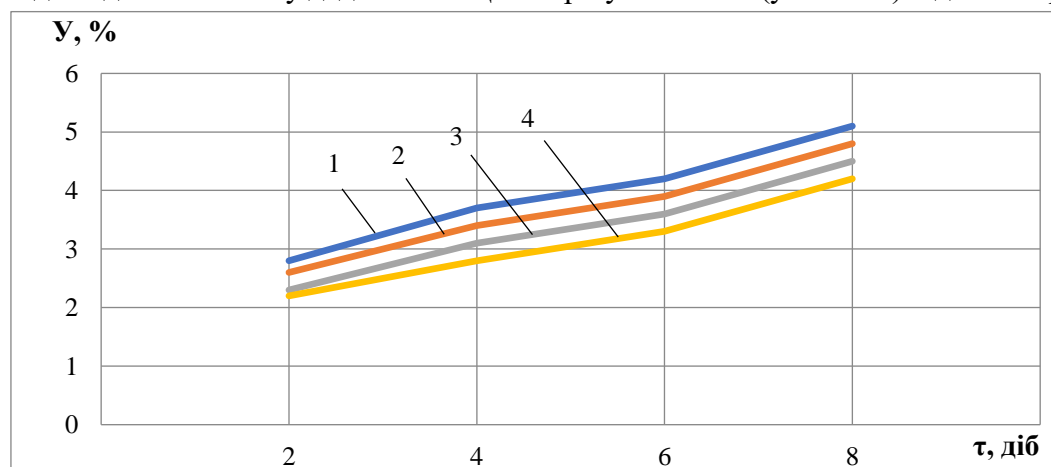


Рис. 2. Динаміка усихання ЗБН із додаванням борошна із цвіркунів: 1 – контроль; 2 – додавання 5,0 % борошна із цвіркунів; 3 – додавання 10,0 % борошна із цвіркунів; 4 – додавання 15,0 % борошна із цвіркунів

Джерело: розроблено авторами.



За аналізом кривих (рис. 2) було досліджено, що у ЗБН з додаванням борошна з цвіркунів відбувається зменшення ступеня усихання на 0,6 % протягом зберігання до 2 діб та на 2,1 % під час зберігання протягом 8 діб порівняно з контрольним зразком. Найвищий показник усихання мав зразок без додавання борошна із цвіркунів. У результаті проведених досліджень можна зробити висновок, що за рахунок високої вологоутримувальної здатності борошно із цвіркунів сповільнюється процес усихання виробів, вони залишаються більш м'якими та пружними.

Процеси упікання та усихання ЗБН впливають на стан м'якушки, адже ЗБН характеризуються гарною пористою м'якушкою, яка під час зберігання не повинна втрачати своїх органолептичних властивостей за рахунок підвищення крихтуватості виробів.

Дослідження крихтуватості м'якушки проводились через кожні 2 доби зберігання готового напівфабрикату з різною кількістю БЦ.

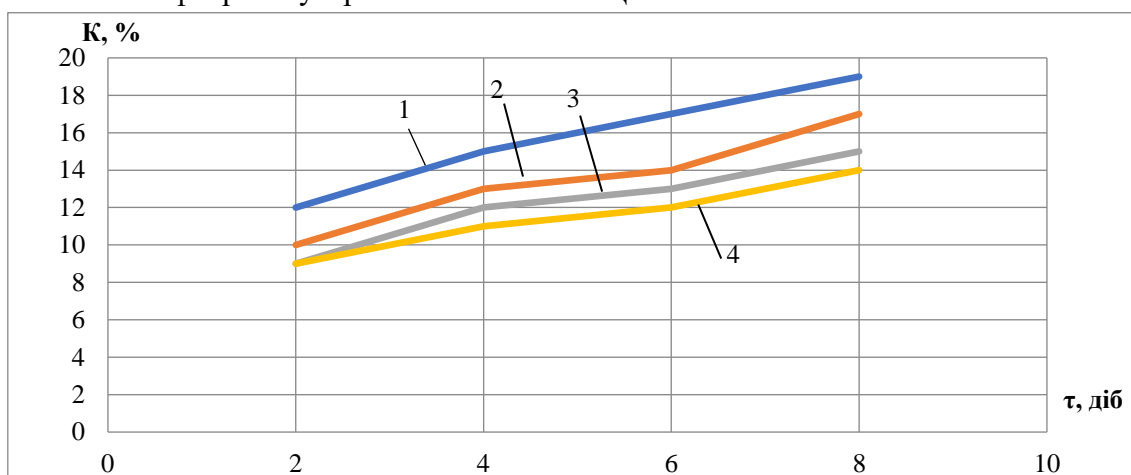


Рис. 3. Динаміка зміни крихтуватості м'якушки ЗБН із додаванням борошна із цвіркунів:

1 – контроль; 2 – додавання 5,0 % борошна із цвіркунів; 3 – додавання 10,0 % борошна із цвіркунів; 4 – додавання 15,0 % борошна із цвіркунів

Джерело: розроблено авторами.

При дослідженні крихтуватості м'якушки ЗБН (рис. 3), було встановлено, що крихтуватість контрольного зразка та зразків напівфабрикату з різним вмістом БЦ в процесі зберігання протягом 8 діб збільшується. Однак, через 2 доби зберігання крихтуватість досліджуваних зразків з додаванням БЦ була менша від контрольного, згідно з додаванням 5,0 % крихтуватість зменшилась на 83,0 %; 10,0 % – на 75,0 %; 15,0 % – на 75,0 % відповідно. Через 8 діб зберігання крихтуватість досліджуваних зразків була менша від контрольного зразка згідно з додаванням 5,0 % крихтуватість зменшилась на 89,4 %; 10,0 % – на 78,9 %; 15,0 % – на 73,7 %. У результаті проведених досліджень виявлено, що найбільш інтенсивно процес усихання виробів відбувається у перші 2 доби зберігання. Додавання БЦ у рецептуру ЗБН стримує цей процес, що пов'язане із певною водопоглинальною та водоутримувальною здатністю БЦ. Ці властивості ЗБН пояснюються гальмуванням процесів черствіння, які спостерігались при зменшенні крихтуватості м'якушки виробів під час зберігання порівняно з контролем.

**Висновки та рекомендації.** Отже, за результатами дослідження фізико-хімічних показників ЗБН з додаванням БЦ зазначимо, що використання нової сировини у виробництві збивних борошняних напівфабрикатів зумовлює зміну показників упікання, усихання та крихтуватості м'якушки. Додавання БЦ у кількості від 5,0 до 15,0 % вплинуло на зменшення втрати маси на 0,78 % та збільшення вологості на 1,05 % під час випікання ЗБН. Показники усихання та динаміка зміни структури м'якушки показали, що ЗБН з додаванням БЦ можуть зберігатися без суттєвих змін протягом 96 годин.

**Список використаних джерел**

1. ДСТУ 4803:2007. Торти і тістечка. Загальні технічні умови. – Київ : Держспоживстандарт України, 2007. – 26 с.
2. Лісовська, Т. О. Технологія бісквітного напівфабрикату з використанням борошна кукурудзяного екструдованого : монографія / Т. О. Лісовська, Н. В. Чорна. – Харків : ХДУХТ, 2020. – 126 с.
3. Романовська, О. Динаміка якості бісквітних напівфабрикатів при зберіганні / О. Романовська // Товари і ринки. – 2017. – № 1. – С. 176-184.
4. Characterization of freeze — Dried, oven-dried and blanched house crickets (*AchetaDomesticus*) and Jamaicanfield crickets (*GryllusAssimilis*) by Means of theirphysicochemical properties and volatile compounds / H. Khatun, J. Claes, R. Smets, A. DeWinne, M. Akhtaruzzaman, V. D. M. Borght // *Eur. FoodRes. Technol.* – 2021. – Vol. 247. – P. 1291-1305.
5. The psychology of eatinginsects: A cross-cultural comparis on betweenGermany and China / C. Hartmann, J. Shi, A. Giusto, M. Siegrist // *Food Qual. Prefer.* – 2015. – Vol. 44. – P. 148-156.
6. Assessment of the rheological properties and bread characteristics obtained by innovative protein sources (*CicerArietinum*, *AchetaDomesticus*, *TenebrioMolitor*): Novel Food or potentialimprovers for wheat flour? / A. Cappelli, N. Oliva, G. Bonaccorsi, C. Lorini, E. Cini // *LWT.* – 2020. – Vol. 118. – P. 118.
7. Breadenriched with cricket powder (*AchetaDomesticus*): A technological, microbiological and nutritional evaluation. *Innov* / A. Osimani, V. Milanović, F. Cardinali, A. Roncolini, C. Garofalo, F. Clementi, M. Pasquini, M. Mozzon, R. Foligni, N. Raffaelli et al. // *FoodSci. Emerg. Technol.* – 2018. – № 48. – P. 150-163.
8. Effects of Formulation and processconditionson micro structure, texture and digestibility of extruded insect-riched snacks. *Innov* / D. Azzollini, A. Derossi, V. Fogliano, C. M. M. Lakemond, C. Severini // *FoodSci. Emerg. Technol.* – 2018. – № 45. – P. 344-353.
9. Nilova, T. Malyutenkova In investigation into the effects of bioactive substances from vegetable oils on the antioxidant properties of bakery products / T. Nilova, S. Pilipenko // *Agronomy Research.* – 2017. – Vol. 15. – Pp. 1399-1410.
10. Technology of biscuit semi-finished products using recycled pumpkinseeds / E. Moskvicheva, I. Timoshenkova, D. Chernikova, E. Fedinishina, M. Bernavskaya // *IOP Conference Series: Earthand Environmental Science.* – 2019. – P. 337.
11. Functional Properties of Edible Insects: A Systematic Review / V. D’Antonio, N. Battista, G. Sacchetti, C. D. Mattia, M. Serafini, // *In Nutrition Research Reviews.* – Cambridge : Cambridge University Press, 2021. – Pp. 1-22.
12. Cabuk, B. Influence of grasshopper (*Locusta Migratoria*) and meal worm (*Tenebrio Molitor*) Powders on the quality characteristics of protein rich muffins: Nutritional, physicochemical, texturalandsensoryaspects / B. Cabuk // *J. FoodMeas. Charact.* – 2021. – Vol. 15. – Pp. 3862-3872.

**References**

1. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (2007). DSTU 4803:2007. *Torty i tistechka. Zahalni tekhnichni umovy [Cakes and pastries. General technical conditions]*.
2. Lisovska, T.O., Chorna, N.V. (2020). *Tekhnolohiia biskvitnoho napivfabrykatu z vykorystanniam boroshna kukurudzianoho ekstrudovanoho [Semi-finished biscuit technology using extruded corn flour]*. KhDUKhT.
3. Romanovska, O. (2017). Dynamika yakosti biskvitnykh napivfabrykativ pry zberihanni [Quality dynamics of biscuit semi-finished products during storage]. *Tovary i rynky – Goods and markets, 1*, 176-184.
4. Khatun, H., Claes, J., Smets, R., DeWinne, A., Akhtaruzzaman, M., Van Der Borght, M. (2021). Characterization of freeze — Dried, oven-dried and blanched house crickets (*AchetaDomesticus*) and Jamaicanfield crickets (*GryllusAssimilis*) by Means of theirphysicochemical properties and volatile compounds. *Eur. FoodRes. Technol*, 1291–1305.
5. Hartmann, C., Shi, J., Giusto, A., Siegrist, M. (2015). The psychology of eatinginsects: A cross-cultural comparis on betweenGermany and China. *Food Qual. Prefer*, 148–156.

6. Cappelli, A., Oliva, N., Bonaccorsi, G., Lorini, C., Cini, E. (2020). Assessment of the rheological properties and bread characteristics obtained by innovative protein sources (CicerArietinum, AchetaDomesticus, TenebrioMolitor): Novel Food or potentialimprovers for wheat flour? *LWT*, 118.
7. Osimani, A., Milanović, V., Cardinali, F., Roncolini, A., Garofalo, C., Clementi, F. ... Raffaelli, N. (2018). Breadenriched with cricket powder (AchetaDomesticus): A technological, microbiological and nutritional evaluation. *Innov. FoodSci. Emerg. Technol.*, 48, 150–163.
8. Azzollini, D., Derossi, A., Fogliano, V., Lakemond, C.M.M., Severini, C. (2018). Effects of Formulation and processconditionson micro structure, texture and digestibility of extruded insect-riched snacks. *Innov. FoodSci. Emerg. Technol.*, 45, 344–353.
9. Nilova, L., Pilipenko, T., Malyutenkova, S. (2017). In investigation into the effects of bioactive substances from vegetable oils on the antioxidant properties of bakery products. *Agronomy Research*, 15, 1399-1410.
10. Moskvicheva, E., Timoshenkova, I., Chernikova, D., Fedinishina, E., Bernavskaya, M. (2019). Technology of biscuit semi-finished products using recycled pumpkinseeds. *IOP Conference Series: Earthand Environmental Science*, 337.
11. D'Antonio, V., Battista, N., Sacchetti, G., Mattia, C.D., Serafini, M. (2021). Functional Properties of Edible Insects: A Systematic Review. In *Nutrition Research Reviews* (pp. 1–22). Cambridge University Press.
12. Cabuk, B. (2021). Influence of grasshopper (Locusta Migratoria) and meal worm (Tenebrio Molitor) Powders on the quality characteristics of protein rich muffins: Nutritional, physicochemical, texturalandsensoryaspects. *J. FoodMeas. Charact*, 15, 3862–3872.

Отримано 19.12.2023

UDC 664.681.2

**Olha Sereda<sup>1</sup>, Oksana Melnyk<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Graduate Student, Department of Food Technology  
Sumy National Agrarian University (Sumy, Ukraine)**E-mail:** [seaol@ukr.net](mailto:seaol@ukr.net). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-2614-725X><sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Technology  
Sumy National Agrarian University (Sumy, Ukraine)**E-mail:** [oxana7@i.ua](mailto:oxana7@i.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9201-7955>. **ResearcherID:** [AHE-3206-2022](https://orcid.org/0000-0002-9201-7955)

## INVESTIGATION OF THE PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE SEMI-FINISHED FLOUR WITH CHICKEN FLOUR

The article presents the results of the study of the physicochemical characteristics of the baked battered flour semi-finished product with the addition of cricket flour in the amount of 5.0...15.0 %. Cricket flour is a high-protein product that can affect the physicochemical properties of the finished semi-finished product. During the baking of whipped flour semi-finished products, moisture is redistributed and released in the structure of the dough mass. Accordingly, the structure of the semi-finished product may be more fragile, and the condition of its surface may be deformed. It was determined that when added to the whipped flour semi-finished product in the amount of 5.0 %, the moisture index increased by 1.05 % compared to the control sample, and the baking index decreased by 0.78 %; after adding 10.0 % of flour from crickets, the humidity index increases by 1.1%, baking of the product decreases by 0.73 %; when adding 15.0 % of cricket flour, moisture content increases by 1.15 %, baking decreases by 0.69 %. The shelf life of the whipped flour semi-finished product was determined by studying the drying process of the semi-finished product and the crumbliness of the pulp from 2 to 8 days. It was investigated that in the whipped flour semi-finished product with the addition of cricket flour, the degree of drying decreases by 0.6% during storage for up to 2 days and by 2.1 % during storage for 8 days in comparison with the control sample. When the friability of the pulp was investigated, it was established that the friability of the control sample and samples of semi-finished products with different contents of cricket flour increases during storage for 8 days. Based on the results of the research, it was determined that the addition of cricket flour to the recipe of semi-finished biscuits had a minor effect on the physicochemical parameters of the finished innovative products

**Keywords:** whipped flour semi-finished product; flour from crickets; round biscuit; baking; drying up; crumbly pulp; expiration date

Fig. 3. References: 12.

**Сергій Павлюк<sup>1</sup>, Тетяна Філінська<sup>2</sup>, Ірина Суха<sup>3</sup>, Антоніна Філінська<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції  
Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)

**E-mail:** [serpik07@ukr.net](mailto:serpik07@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-7615-963X>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук,

доцент кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції  
Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)

**E-mail:** [f111nskaya@ukr.net](mailto:f111nskaya@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-7921-1989>

<sup>3</sup>кандидат технічних наук,

доцент кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції  
Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)

**E-mail:** [irinasuha3@gmail.com](mailto:irinasuha3@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5579-2047>

<sup>4</sup>старший викладач кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції  
Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)

**E-mail:** [antoniyafilin@ukr.net](mailto:antoniyafilin@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-6975-6186>

## ДОСЛІДЖЕННЯ БЕЗПЕЧНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПЕТ ПЛЯШОК ІЗ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ ДЛЯ ПАКУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

У харчовій промисловості для пакування продукції використовують різні види тари. Вагоме місце посідає полімерна тара, яка має низку переваг і зручностей у застосуванні, але як одноразова створює високі екологічні ризики забруднення навколишнього середовища. Сучасні тенденції до зниження залежності від одноразової тари супроводжуються впровадженням новітніх технологій, які дозволяють використовувати при виготовленні полімерної тари не лише первинну сировину в чистому вигляді, але і її суміші із вторинною в різних пропорціях. Кількість вторинної сировини може досягати 70 %, а іноді й більше, що, безперечно, знижує негативний вплив полімерних відходів на стан навколишнього середовища і здоров'я людей. У статті наведено результати дослідження безпечності використання пляшок, виготовлених повністю з вторинного поліетилентерефталату, для пакування молока 2,5%-вої жирності, спиртовмісної продукції з вмістом спирту 5% і 40%, а також водних розчинів оцтової і молочної кислоти різної концентрації. Визначені показники міграції у досліджувані середовища ацетальдегіду, ацетону, бутанолу, ізопропанолу, метанолу, етилбензолу, диметилтерефталату та інших токсичних компонентів відповідають встановленим гігієнічним нормативам і не перевищують допустимої кількості міграції. Пляшки, виготовлені повністю з вторинної сировини, відповідають вимогам до тари, що контактує з харчовими продуктами, і можуть бути рекомендовані для пакування досліджуваних типів продукції.

**Ключові слова:** поліетилентерефталат; тара; харчові продукти; молоко; оцтова кислота; молочна кислота; розчини спирту; токсичні речовини.

Табл.: 2. Бібл.: 19.

**Актуальність теми дослідження.** Для пакування харчової продукції використовують тару, виготовлену з різноманітної сировини: скла, паперу, фольги, полімерних і комбінованих матеріалів. Спеціалістами виконуються дослідження різних типів пакувань з метою оцінювання їхнього ризику та негативного впливу на організм людини [1]. Використання полімерної тари, у тому числі з поліетилентерефталату (ПЕТ), призводить до великої кількості відходів. Питанням їх утилізації і перероблення приділяється велика увага як з екологічного, так і з економічного погляду [2; 3]. Серед широкого переліку продукції, яку виготовляють із вторинного ПЕТ матеріалу, є пляшки харчового призначення. Вони, як й інші види тари, слугують потенційним джерелом забруднення, з них у харчові продукти можуть мігрувати шкідливі речовини [4]. Тому актуальним питанням сьогодення є дослідження безпечності використання полімерних матеріалів, виготовлених з вторинної ПЕТ сировини для пакування харчової продукції на предмет міграції з них токсичних компонентів.

**Постановка проблеми.** Тара для харчових продуктів, виготовлена з додаванням відпрацьованих і перероблених ПЕТ пляшок, викликає побоювання щодо якості й безпечності пакованого продукту та потребує відповідних досліджень. Для ПЕТ пляшок харчового призначення мають виконуватися токсикологічні дослідження, визначатися показники міграції хімічних речовин, які виділяються з тари. Вказані показники не повинні перевищувати величину допустимої кількості міграції (ДКМ).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** ПЕТ тару широко використовують у харчовій промисловості для пакування алкогольних і безалкогольних напоїв, питної води, харчових олій, молочної та інших видів продукції [5]. Вона значно легша за скляну тару, стійка до руйнування, її зручно використовувати на лініях розливу. Значні переваги має ПЕТ тара в порівнянні з іншими пакувальними матеріалами при транспортуванні і зберіганні продукції. Незважаючи на тенденцію з 2019 року до зниження виробництва ПЕТ виробів в Україні, кількість відходів залишається високою і потребує перероблення та повторного використання. Світові виробники споживчих товарів, серед яких Nestle, PepsiCo, Mondelez, Danone, представили інтернет-платформу Loop щодо зниження залежності від одноразової упаковки. Пропонується до впровадження модель циклічної економіки, яка закриває цикл виробництва полімерного матеріалу й заохочує інновації до його повторного використання. На сьогодні вітчизняні виробники ПЕТ пляшок також зорієнтовані на безпеку й екологічність своєї продукції [6]. Новітні технології дозволяють використовувати при виготовленні тари з ПЕТ не тільки первинну сировину в чистому вигляді, але і її суміші із вторинною в різних пропорціях. Кількість вторинної сировини може досягати 70 %, а іноді й більше, що безперечно знижує негативний вплив полімерних відходів на стан навколишнього середовища і здоров'я людей.

Питанням визначення токсичних інгредієнтів ПЕТ тари, яка використовується для харчових продуктів, приділяється особлива увага. Для визначення її відповідності вимогам харчової безпеки виконують органолептичні й санітарно-хімічні дослідження, контролюється рівень міграції хімічних речовин у досліджуване середовище [7].

Для пакування харчових продуктів і напоїв на водній основі можна використовувати ПЕТ пляшки, виготовлені як з первинної, так і з вторинної (100%-вої переробленої) сировини. Такого висновку дійшли порівнюючи для обох видів тари показники міграції у воду низки хімічних речовин, серед яких: ацетальдегід, ацетон, бутанол, свинець, хром, цинк, кадмій та ін. За результатами досліджень вони не перевищують відповідні допустимі значення ДКМ [8].

Виробники широко використовують ПЕТ пляшки для пакування рослинних олій. Досліджено безпечність використання ПЕТ пляшок для пакування пресової соняшникової олії. Встановлено, що після зберігання олії в ПЕТ пляшках з первинної і 100%-вої вторинної сировини вміст у них шкідливих компонентів відповідає вимогам ДСТУ 4492:2017 «Олія соняшникова. Технічні умови» [9].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх публікацій показав, що питанням дослідження безпечності використання полімерних пакувальних матеріалів, виготовлених із вторинної ПЕТ сировини приділяється значна увага. Досліджено можливість безпечного використання пляшок із вторинної ПЕТ тари для пакування води і рослинної олії. Проте потребують дослідження міграції токсичних компонентів з ПЕТ пляшок також в інші харчові середовища.

**Метою статті** є дослідження міграції токсичних речовин з ПЕТ пляшок, виготовлених з вторинної сировини, у молоко коров'яче питне пастеризоване, водно-спиртові розчини, водні розчини оцтової і молочної кислоти різних концентрацій, які є об'єктами дослідження.

**Виклад основного матеріалу.** Досліджувані об'єкти були паковані у ПЕТ пляшки, виготовлені з вторинної сировини (виробник ТОВ «ПРО П.Е.Т.») [10]. Визначення вмісту токсичних речовин у зразках виконувалися за відповідними методиками [11-15] і порівнювалися з гігієнічними нормативами [16; 17].

Молоко є базовим харчовим продуктом, а молочна продукція належить до щоденних товарів у споживчому кошику, на яку припадає вагомий відсоток витрат населення [18]. Молоко пакують у різну тару, в тому числі й ПЕТ пляшки. Використання останніх, особливо

виготовлених із вторинної сировини, потребує підтвердження їх безпечності. Для дослідження обрано молоко коров'яче питне пастеризоване 2,5%-вої жирності. Після його зберігання впродовж терміну придатності (7 діб) визначено вміст свинцю, кадмію, міді й цинку. Дослідження зразків молока виконувалися у випробувальному центрі державної установи «Житомирський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України» з використанням наступного обладнання: атомно-абсорбційного спектрофотометра AAScontr 800D, атомно-абсорбційного спектрофотометра «Сатурн-ЗП-1», аналізатора концентрації ртуті «Юлія-2» та ін. Результати досліджень наведені в табл. 1.

*Таблиця 1 – Вміст токсичних елементів у молоці, пакованому в ПЕТ пляшки із вторинної сировини*

| Назва показника | Результати випробувань, мг/кг | Гігієнічний норматив, мг/кг |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Вміст свинцю    | 0,02                          | не більше за 0,02           |
| Вміст кадмію    | 0,007                         | не більше за 0,03           |
| Вміст міді      | 0,32                          | не більше за 1,0            |
| Вміст цинку     | 3,45                          | не більше за 5,0            |
| Вміст ртуті     | 0,0005                        | не більше за 0,005          |
| Вміст миш'яку   | 0,005                         | не більше за 0,05           |

Як видно з наведених результатів досліджуваний зразок молока, який зберігався протягом усього терміну придатності у ПЕТ пляшках, виготовлених із вторинної сировини, за вмістом токсичних елементів відповідає ДСТУ 2661:2010 «Молоко коров'яче питне. Загальні технічні вимоги», що дає підстави зробити висновок безпечності використання такої тари для пакування молока.

ПЕТ пляшки використовують також для пакування алкогольних і слабоалкогольних напоїв, вміст спирту у яких коливається у широкому діапазоні. Для дослідження показників міграції шкідливих речовин у водно-спиртове середовище обрано розчини з вмістом етилового спирту 5 і 40 %, які паковані у пляшки, також виготовлені з вторинної ПЕТ сировини. Визначені показники міграції ацетону, ацетальдегіду, метанолу, диметилтерефталату, формальдегіду та інших шкідливих компонентів наведені в табл. 2.

*Таблиця 2 – Вміст токсичних речовин у водних розчинах спирту 5%-вої і 40%-вої концентрації, пакованих у пляшки з вторинної ПЕТ сировини*

| Назва показника   | Визначена величина показника, мг/дм <sup>3</sup> |                                 | Гігієнічний норматив, мг/дм <sup>3</sup> |
|-------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|
|                   | 5%-вий розчин етилового спирту                   | 40%-вий розчин етилового спирту |                                          |
| Ацетон            | 0,05                                             | 0,05                            | 0,1                                      |
| Ацетальдегід      | 0,060-0,068                                      | 0,088-0,094                     | 0,2                                      |
| Метанол           | 0,05                                             | 0,05                            | 0,2                                      |
| Ізопропанол       | 0,05                                             | 0,05                            | 0,1                                      |
| Бутанол           | 0,05                                             | 0,05                            | 0,5                                      |
| Ізобутанол        | 0,05                                             | 0,05                            | 0,5                                      |
| Етилбензол        | 0,01                                             | 0,01                            | 0,01                                     |
| Диметилтерефталат | 0,5                                              | 0,5                             | 1,5                                      |
| Формальдегід      | 0,059-0,065                                      | 0,061-0,063                     | 0,1                                      |
| Свинець           | 0,01                                             | 0,01                            | 0,03                                     |
| Кадмій            | 0,001                                            | 0,001                           | 0,001                                    |
| Цинк              | 0,005                                            | 0,005                           | 1,0                                      |
| Мідь              | 0,005                                            | 0,005                           | 1,0                                      |
| Нікель            | 0,01                                             | 0,01                            | 0,1                                      |
| Марганець         | 0,01                                             | 0,01                            | 0,1                                      |

У харчовій промисловості широко використовують органічні і неорганічні кислоти. Харчова оцтова кислота виготовляється концентрацією 3, 6, 9, 50, 70 та 80 %, її одержують із кислоти оцтової синтетичної харчової шляхом розведення питною водою до необхідної концентрації. Присутні в торговельних мережах 6%-ва і 9%-ва оцтова кислоти найчастіше паковані у ПЕТ пляшки. Молочна кислота присутня у складі кефіру, пахти, йогуртів, соусів, маринадів та іншої харчової продукції. Вона використовується як консервант, антиоксидант та регулятор кислотності під кодом харчової добавки E270 і є важливим компонентом харчових продуктів [19]. Харчові кислоти мають відповідати обов'язковим вимогам щодо їх безпечності для життя та здоров'я споживачів.

Як об'єкт дослідження обрано харчову оцтову кислоту 6%-вої і 9%-вої концентрації, а також водні розчини молочної кислоти концентрацією 0,5 % і 3,0 %. Усі зразки паковані у пляшки (безбарвні, синього і коричневого кольору), виготовлені з вторинної ПЕТ сировини. Дослідження розчинів спирту, оцтової і молочної кислоти виконувалися у Випробувальній лабораторії (ЦНДЛ та лабораторія промислової токсикології) Львівського національного медичного університету імені Данила Галицького. Невизначеність вимірювання на рівні 15%. Результати випробувань рівнів міграції хімічних речовин у розчини оцтової і молочної кислоти не перевищують гігієнічний норматив. За визначеними показниками пляшки ПЕТ з вторинної сировини (безбарвні, синього й коричневого кольору) відповідають вимогам за допустимими кількостями міграції хімічних речовин, які виділяються з полімерних та інших матеріалів, що контактують із харчовими продуктами.

**Висновки.** На підставі проведених досліджень визначені рівні міграції токсичних речовин з ПЕТ пляшок, виготовлених з вторинної сировини, у різні харчові середовища - молоко, розчини спирту, за концентрацією подібні до алкогольних і слабоалкогольних напоїв, а також у водні розчини оцтової і молочної кислот різних концентрацій. Визначено, що показники міграції з тари у досліджувані середовища ацетальдегіду, ацетону, бутанолу, ізопропанолу, метанолу, етилбензолу, диметилтерефталату та інших токсичних компонентів відповідають встановленим гігієнічним нормативам і не перевищують допустимої кількості міграції. Пляшки, виготовлені повністю з вторинної сировини, відповідають вимогам до тари, що контактує з харчовими продуктами, і можуть бути рекомендовані для пакування досліджуваних типів продукції. Враховуючи те, що харчові продукти являють собою складні, багатокомпонентні системи, у яких у процесі зберігання відбуваються певні перетворення, виконання аналогічних дослідних робіт потребує продовження і розширення переліку досліджуваних харчових середовищ.

#### Список використаних джерел

1. Оцінка ризиків для здоров'я людини пакувальних матеріалів для харчових продуктів і шляхи їх запобігання / Л. В. Горцева, Т. В. Шутова, О. С. Мартинова, В. В. Завальна, Т. П. Костюченко // Український журнал сучасних проблем токсикології. – 2018. – № 4(84). – С. 59-62. DOI: <http://dx.doi.org/10.33273/2663-4570-2018-84-4-59-62>.
2. Polyolefins and Polyethylene Terephthalate Package Wastes: Recycling and Use in Composites / H. Jones, F. Saffar, V. Koutsos, D. Ray // *Energies*. – 2021. – № 14. – P. 7306. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14217306>.
3. Lupinos, A. Analysis of trends of development of enterprise activity in the field of polymeric waste utilization in Ukraine / A. Lupinos, N. Hurzhii // *Management and Entrepreneurship: Trends of Development*. – 2018. – № 2(04). – P. 55-63. DOI: <https://doi.org/10.26661/2522-1566-2018-2/04-06>.
4. Іванішена, Т. В. Порівняльний аналіз безпечності пакувальних матеріалів для харчової промисловості / Т. В. Іванішена, О. О. Іванішина // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2019. – № 5. – С. 142-146.
5. Куник, О. М. Дослідження впливу виду пакування на термін придатності питного пастеризованого молока / О. М. Куник, О. М. Морозова, Д. Г. Сарібєкова // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2020. – № 3. – С. 34-43.

6. Аналіз ринку ПЕТ для харчової промисловості в Україні. 2021 рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-pet-dlya-pishevoj-promyshlennosti-v-ukraine-2021-god>.

7. Горцева, Л. В. До питання визначення токсичних інгредієнтів поліетилентерефталату, який використовується для упаковки харчових продуктів / Л. В. Горцева, Т. В. Шутова, Т. П. Костюченко // Єдине здоров'я та проблеми харчування України. – 2013. – № 1 (38). – С. 52-54.

8. Павлюк С. К. ПЕТ тара з вторинної сировини для пакування харчових продуктів / С. К. Павлюк, Т. Г. Філінська, А. О. Філінська // Food chemistry. Modern methods for production of food, food additives and packaging materials : book of abstracts (Lviv, October 7-9, 2020). – Lviv, 2020. – С. 15.

9. Павлюк С. К. Перероблена ПЕТ тара для пакування рослинних олій / С. К. Павлюк, Т. Г. Філінська, А. О. Філінська // Інноваційний розвиток харчової індустрії : зб. наук. праць за матеріалами VIII Міжнар. наук.-практ. конф. / Інститут продовольчих ресурсів НААН (23 грудня 2021 р., м. Київ). – Київ, 2021. – С. 80-81.

10. ТУ У 22.2-45123779-001:2023. Преформи та пляшки полімерні марки ПЕТФ.

11. ДСТУ EN 14082:2019 Продукти харчові. Визначення вмісту свинцю, кадмію, цинку, міді, заліза та хрому методом атомно-абсорбційної спектроскопії (AAS) після сухого озонення (EN 14082:2003, IDT).

12. Визначення вмісту ртуті в об'єктах виробничого, навколишнього середовища і біологічних матеріалах. МВ 10.1-115-2005. – Київ, 2005. – 48 с.

13. МУ 5178-90 Методические указания по обнаружению и определению содержания общей ртути в пищевых продуктах методом беспламенной атомной абсорбции. – Москва, 1990.

14. МУК 4.1.3166-14 Газохроматографическое определение гексана, гептана, ацетальдегида, ацетона, метилацетата, этилацетата, метанола, изопропанола, акрилонитрила, н-пропанола, н-пропилацетата, бутилацетата, изобутанола, н-бутанола, бензола, толуола, этилбензола, м-, о- и п-ксилолов, изопропилбензола, стирола, α-метилстирола в воде и водных вытяжках из материалов различного состава.

15. ISO 8288. Качество воды. Определение кобальта, никеля, меди, цинка, кадмия и свинца. Пламенные атомно-абсорбционные спектрометрические методы. – 1987. – 18 с.

16. Про затвердження гігієнічних нормативів якості води, водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення [Електронний ресурс] : Наказ МОЗ України № 721 від 02.05.2022 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text>.

17. СанПиН 42-123-4240-86 Допустимые количества миграции (ДКМ) химических веществ, выделяющихся из полимерных и других материалов, контактирующих с пищевыми продуктами и методы их определения [Электронный ресурс]. – Режим доступу: [https://zakononline.com.ua/documents/show/158062\\_\\_158062](https://zakononline.com.ua/documents/show/158062__158062).

18. Рахман, М. С. Аналіз ринку молока та молочної продукції України / М. С. Рахман, Д. А. Гризо // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Економічна». – 2021. – № 101. – Р. 59-67. DOI: <https://doi.org/10.26565/2311-2379-2021-101-06>.

19. Давидович, О. Я. Методи визначення концентрації молочної кислоти у харчових продуктах / О. Я. Давидович, Х. Р. Спринь // Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки. – 2022. – № 30. – С.45-52. DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-30-06>.

## References

1. Hortseva, L.V., Shutova, T.V., Martynova, O.S., Zavalna, V.V., Kostiuchenko, T.P. (2018). Otsinka ryzykiv dlia zdorovia liudyny pakuvalnykh materialiv dlia kharchovykh produktiv i shliakhy yikh zapobihannia [Assessment of risks to human health of packaging materials for food products and ways to prevent them]. *Ukrainskyi zhurnal suchasnykh problem toksykologii – Ukrainian journal of modern problems of toxicology*, 4(84), 59-62. <http://dx.doi.org/10.33273/2663-4570-2018-84-4-59-62>.

2. Jones, H., Saffar, F., Koutsos, V., Ray, D. (2021). Polyolefins and Polyethylene Terephthalate Package Wastes: Recycling and Use in Composites. *Energies*, 14, 7306. <https://doi.org/10.3390/en14217306>.

3. Lupinos, A., Hurzhii, N. (2018). Analysis of trends of development of enterprise activity in the field of polymeric waste utilization in Ukraine. *Management and Entrepreneurship: Trends of Development*, 2(04), 55-63. <https://doi.org/10.26661/2522-1566-2018-2/04-06>.



4. Ivanishena, T.V., Ivanishyna, O.O. (2019). Porivnialnyi analiz bezpechnosti pakuvalnykh materialiv dlia kharchovoi promyslovosti [Comparative analysis of the safety of packaging materials for the food industry]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Bulletin of the Khmelnytsky National University. Technical sciences*, (5), 142-146.
5. Kunyk, O.M., Morozova, O.M., Saribiekova, D.H. (2020). Doslidzhennia vplyvu vydu pakuvannia na termin prydatnosti pytneho pasteryzovanoho moloka [Study of the influence of the type of packaging on the shelf life of drinking pasteurized milk]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Bulletin of the Khmelnytsky National University*, (3), 34-43.
6. Analiz rynku PET dlia kharchovoi promyslovosti v UKRAINI. 2021 rik [Analysis of the PET market for the food industry in Ukraine. 2021 year]. (2021). <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-pet-dlya-pishevoj-promyshlennosti-v-ukraine-2021-god>.
7. Hortseva, L.V., Shutova, T.V., Kostiuchenko, T.P. (2013). Do pytannia vyznachennia toksychnykh inhrediiientiv polietylentereftalatu, yakyi vykorystovuietsia dlia upakovky kharchovykh produktiv [To the question of determining the toxic ingredients of polyethylene terephthalate, which is used for food packaging]. *Yednye zdorovia ta problemy kharchuvannia Ukrainy – Unified health and nutrition problems of Ukraine*, (1(38)), 52-54.
8. Pavliuk, S.K., Filinska, T.H., Filinska, A.O. (2020). PET tara z vtorynnoi syrovyny dlia pakuvannia kharchovykh produktiv [PET containers from secondary raw materials for food packaging]. *Food chemistry. Modern methods for production of food, food additives and packaging materials: book of abstracts* (p. 15).
9. Pavliuk, S.K., Filinska, T.H., Filinska, A.O. (2021). Pereroblena PET tara dlia pakuvannia roslynnykh olii [Recycled PET container for packaging vegetable oils]. *Innovatsiyni rozvytok kharchovoi industrii: zb. nauk. prats za materialamy VIII Mizhnar. nauk.-prakt. konf. – Innovative development of the food industry: coll. of science works based on the materials of VIII International science and practice conf.* (pp. 80-81).
10. TU U 22.2-45123779-001:2023. Preformy ta pliashyky polimerni marky PETF [PET polymer preforms and bottles].
11. DSTU EN 14082:2019 Produkty kharchovi. Vyznachennia vmistu svytsiu, kadmiu, tsynku, midi, zaliza ta khromu metodom atomno-absorbtsiinoi spektrometrii (AAS) pislia sukhooho ozolennia [Food products. Determination of the content of lead, cadmium, zinc, copper, iron and chromium by the method of atomic absorption spectrometry (AAS) after dry ashing](EN 14082:2003, IDT).
12. Vyznachennia vmistu rtuti v ob'ektakh vyrobnychoho, navkolyshnoho seredovyshcha i biolohichnykh materialakh [Determination of mercury content in industrial objects, environment and biological materials]. MV 10.1-115-2005. (2005).
13. MU 5178-90 «Metodicheskie ukazaniya po obnaruzheniyu i opredeleniyu sodержaniya obshchei rtuti v pishchevikh produktakh metodom besplamennoi atomnoi absorbtsii» [Methodical guidelines for the detection and determination of total mercury content in food products by the flameless atomic absorption method]. (1990).
14. MUK 4.1.3166-14 Gazokhromatograficheskoe opredelenie geksana, geptana, atsetaldegida, atsetona, metilatsetata, etilatsetata, metanola, izopropanola, akrilonitrila, n-propanola, n-propilatsetata, butilatsetata, izobutanola, n-butanola, benzola, toluola, etilbenzola, m-, o- i p-ksilolov, izopropilbenzola, stirola, α-metilstirola v vode i vodnikh vityazhkakh iz materialov razlichnogo sostava: Metodicheskie ukazaniya [Gas chromatographic determination of hexane, heptane, acetaldehyde, acetone, methyl acetate, ethyl acetate, methanol, isopropanol, acrylonitrile, n-propanol, n-propyl acetate, butyl acetate, isobutanol, n-butanol, benzene, toluene, ethylbenzene, m-, o- and n- xylene, isopropylbenzene, styrene, α-methylstyrene in water and aqueous extracts from materials of different composition: Methodical instructions.].
15. ISO 8288. Opredelenie kobalta, nikelya, medi, tsinka, kadmiya i svintsia. [Determination of cobalt, nickel, copper, zinc, cadmium and lead.]. (1987).
16. Pro zatverdzhennia hiiienichnykh normatyviv yakosti ody, vodnykh ob'ektiv dlia zadovolennia pytnykh, hospodarsko-pobutovykh ta inshykh potreb naseleння» [On the approval of hygienic standards for the quality of water, water bodies to meet the drinking, household and other needs of the population], Order of the Ministry of Health of Ukraine № 721 (02.05.2022).
17. SanPiN 42-123-4240-86 «Dopustimie kolichestva migratsii (DKM) khimicheskikh veshchestv, vilyayushchikhsya iz polimernikh i drugikh materialov, kontaktiruyushchikh s pishchevimi produktami i metodi ikh opredeleniya» [SanPiN 42-123-4240-86 «Permissible amounts of migration (AQM) of chemical substances released from polymeric and other materials in contact with food products and methods for their determination»].

18. Rakhman, M.S., Hryzo, D.A. (2021). Analiz rynku moloka ta molochnoi produktsii Ukrainy [Analysis of the market of milk and dairy products of Ukraine]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina seriya «Ekonomiczna» – Bulletin of the Kharkiv National University named after V. N. Karazin. "Economic" series*, (101), 59-67. <https://doi.org/10.26565/2311-2379-2021-101-06>.

19. Davydovych, O.Ya., Spryn, Kh.R. (2022). Metody vyznachennia kotsentratsii molochnoi kysloty u kharchovykh produktakh [Methods of determining the concentration of lactic acid in food products]. *Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Bulletin of the Lviv Trade and Economic University. Technical sciences*, (30), 45-52. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-30-06>.

Отримано 16.10.2023

UDC 664:878.5/7:621.798.1

**Sergii Pavliuk<sup>1</sup>, Tetiana Filinska<sup>2</sup>, Iryna Sukha<sup>3</sup>, Antonina Filinska<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>postgraduate of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products  
Ukrainian State Chemical and Technological University (Dnipro, Ukraine)

E-mail: [serpik07@ukr.net](mailto:serpik07@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7615-963X>

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers Fats and Food Products  
Ukrainian State Chemical and Technological University (Dnipro, Ukraine)

E-mail: [f111nskaya@ukr.net](mailto:f111nskaya@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7921-1989>

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products  
Ukrainian State Chemical and Technological University (Dnipro, Ukraine)

E-mail: [irinasuha3@gmail.com](mailto:irinasuha3@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5579-2047>

<sup>4</sup>senior lecturer of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products  
Ukrainian State Chemical and Technological University (Dnipro, Ukraine)

E-mail: [antoniyafilin@ukr.net](mailto:antoniyafilin@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6975-6186>

## RESEARCH ON THE SAFETY OF USING PET BOTTLES FROM SECONDARY RAW MATERIALS FOR FOOD PACKAGING

*In the food industry, various materials are used for packaging, including polymeric ones. Containers made from them have a number of advantages and conveniences both during transportation and in the process of storing packaged products, but they create significant risks of environmental pollution. It is disposable and needs to be disposed of or recycled after use.*

*Packaging food products in containers made from secondary raw materials allows solving a number of environmental problems and reducing dependence on disposable containers. The introduction of innovative technologies using polymer waste of polyethylene terephthalate as a raw material for manufacturing, for example, bottles, also has economic feasibility.*

*Polymer packaging is a potential source of pollution, harmful substances can migrate from it into food products, and therefore research is needed on the safety of using polymer materials made from secondary raw materials for packaging food products with regard to the migration of toxic components from them. Milk, alcoholic and low-alcohol products, oil, drinking water, vinegar, etc. are packed in polyethylene terephthalate bottles.*

*The analysis of research and publications showed that special attention is paid to the safety of the use of secondary polymer containers in the food industry. To determine its compliance with food safety requirements, organoleptic and sanitary-chemical studies are performed, the level of migration of chemicals into the studied environment is monitored. The possibility of safe use of bottles made of secondary polyethylene terephthalate for packaging water and vegetable oil was investigated. But research on the migration of toxic components from bottles to other food environments is needed.*

*The purpose of the article is to study the migration of toxic substances from bottles made from secondary raw materials into drinking pasteurized cow's milk, water-alcohol solutions, aqueous solutions of acetic and lactic acid of various concentrations.*

*The article presents the results of a study of the safety of using bottles made entirely of secondary polyethylene terephthalate for packaging milk with a 2.5% fat content, alcohol-containing products with an alcohol content of 5% and 40%, as well as aqueous solutions of acetic and lactic acid of various concentrations. The determined indicators of migration of acetaldehyde, acetone, butanol, isopropanol, methanol, ethylbenzene, dimethyl terephthalate and other toxic components into the studied environment comply with the established hygienic standards and do not exceed the permissible amount of migration. Bottles made entirely from recycled materials meet the requirements for containers, which is in contact with food products, and can be recommended for packaging the studied types of products.*

**Keywords:** polyethylene terephthalate; packaging; food products; milk; acetic acid; lactic acid; alcohol solutions; toxic substances.

Table: 2. References: 19.

**Марія Совгуть<sup>1</sup>, Олексій Косогін<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>магістр, кафедра технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [maria.sovgut@gmail.com](mailto:maria.sovgut@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4252-3579>  
Researcher ID: [JXG-6903-2024](https://orcid.org/0009-0004-4252-3579)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [o.kosogin@kpi.ua](mailto:o.kosogin@kpi.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8379-9580>  
Researcher ID: [I-3040-2018](https://orcid.org/0000-0001-8379-9580). SCOPUS Author ID: [55463712800](https://orcid.org/0000-0001-8379-9580)

**ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМАЛЬДЕГІДУ**

Запропоновано проводити визначення формальдегіду (НСОН) електрохімічним методом. Встановлено, що надійне детектування НСОН можливе по величині струму його окиснення в лужному середовищі. Методом аналізу вольт-амперних кривих встановлено потенціали робочого електрода, за яких можливе окиснення НСОН. Запропоновано використовувати двоелектродну схему електрохімічного сенсора, що дозволить відмовитись від використання зовнішнього потенціостатуючого пристрою та зменшить енергоспоживання для роботи сенсора. Показано, що можливе визначення НСОН з використанням двоелектродної комірки, в якій робочий електрод виконано з платинованого титану, і потенціал якій задається товстошаровим допоміжним електродом, що містить в своєму складі діоксид мангану марки ЕДМ-2. Розроблена комірка після оптимізації складу може бути використана у складі сенсора для визначення формальдегіду в водному середовищі.

**Ключові слова:** формальдегід; електрохімічне окиснення; вольтамперометрія; робочий електрод; допоміжний електрод; сенсор; платинований титан; діоксид мангану.

Рис.: 10. Бібл.: 7.

**Актуальність теми дослідження.** Забруднення повітряного та водного середовища формальдегідом внаслідок антропогенного впливу є серйозною проблемою в Україні та світі. Формальдегід НСОН є потенційно небезпечною речовиною, що відноситься до 2 класу небезпечності і є канцерогеном, навіть незначні кількості якого негативно впливають на здоров'я людини, що потребує проведення регулярного моніторингу його вмісту у водних та повітряних середовищах.

**Постановка проблеми.** Для визначення концентрації формальдегіду зазвичай використовують прямі та непрямі методи аналізу. Однак, такі методи вимагають використання дороговартісного обладнання та реагентів і мають низьку чутливість, що робить їх малопридатними для оперативного використання. Саме тому є потреба в розробці електрохімічного методу, заснованого на процесах окиснення або відновлення формальдегіду на електродах. Використання електрохімічного методу визначення НСОН дозволяє розробити чутливі пристрої, придатні для його оперативного моніторингу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанню електрохімічного визначення формальдегіду присвячено велику кількість наукових робіт, зокрема, вони направлені на дослідження різних електродних матеріалів для визначення формальдегіду. Так, у статті [1] автор описує електрохімічне окиснення формальдегіду на золотих та срібних дискових електродах, наводить детальний опис кінетики окиснення формальдегіду та зазначає, що золото та срібло можна застосовувати як електрокаталізатори для електрохімічного окиснення формальдегіду лише за наявності гідроксильних іонів на межі розподілу метал-розчин. На золоті, на відміну від металів платинової групи, процес електроокиснення формальдегіду практично не ускладнений утворенням СО. Зазначається, що в кінетиці стаціонарного електроокислення формальдегіду на золотому електроді важлива роль належить дифузійним процесам, і існує припущення, що саме дифузійні обмеження є основною причиною появи нестационарності анодної деструкції НСОН на золоті [2].

У статтях [3; 4] автори приводять дослідження нового кінетичного механізму для електроокиснення формальдегіду з використанням полікристалічної міді як робочого електрода, на якому електроокиснення формальдегіду відбувається через процес перенесення електронів, що каталізується  $\text{Cu}^{2+}$ . На межі поділу відбувається два процеси: один,

пов'язаний з електроокисненням формальдегіду, що призводить до утворення мурашиної кислоти, а інший – пов'язаний з окисненням мурашиної кислоти, у результаті чого виділяється  $\text{CO}_2$ . У процесі електролізу мідний електрод втрачає каталітичну активність через утворення на його поверхні оксиду міді.

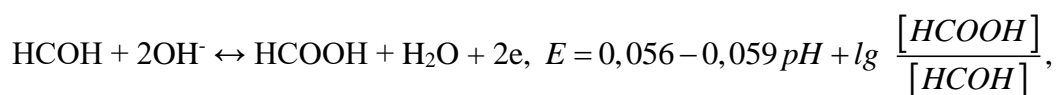
Стаття [5] присвячена електрохімічному окисненню формальдегіду на платині та паладії. У цій статті автори досліджували поведінку електродів при окисненні формальдегіду у розчинах від сильноокислих до сильнолужних. Платина є одним із найбільш широко використовуваних матеріалів для окиснення формальдегіду завдяки своїй каталітичній активності та стабільності. Платинові електроди відомі своєю високою ефективністю в каталізі окиснення формальдегіду до вуглекислого газу. Формальдегід на платині електрокаталітично окислюється за механізмом, у якому електрод окислюється до  $\text{PtOH}$ , а потім до  $\text{Pt}(\text{OH})_2$  [6].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Вибір матеріалу електрода для електрохімічного визначення формальдегіду залежить від різних факторів, включаючи специфіку застосування, міркування вартості та бажаний рівень каталітичної активності. У всіх приведених статтях досліджується окремо поведінка електродного матеріалу, проте основним електродним матеріалом в переважній більшості випадків є золото або платинові метали, що зменшує селективність електрохімічної системи та збільшує її вартість. Також значний інтерес становить побудова двохелектродної системи, яка буде характеризуватись низьким енергоспоживанням, тоді як наявні в літературі дослідження фокусуються на використанні триелектродних систем із застосуванням зовнішнього потенціостатуючого пристрою.

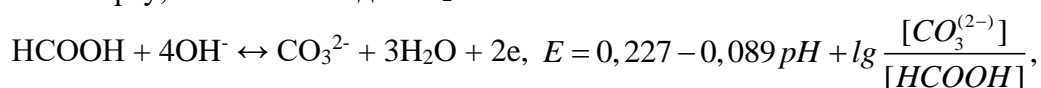
**Мета дослідження.** Метою роботи є розроблення електрохімічної системи, придатної для визначення формальдегіду у водних та повітряних середовищах. Для досягнення поставленої мети необхідним є вибір електродного матеріалу, який може слугувати інертною струмопровідною основою; вибір каталітично активного матеріалу для робочого електрода пристрою, на якому можливий перебіг електродної реакції електрохімічного перетворення формальдегіду; розроблення електрода, який характеризується низькою залежністю потенціалу від наявності формальдегіду та малою поляризованістю, що дозволить використати його як допоміжний електрод електрохімічної системи сенсора гальванічного типу, в якому сталий потенціал робочого електрода забезпечується за рахунок малополяризованого допоміжного електрода без використання зовнішнього потенціостатуючого пристрою. Розроблена електрохімічна система після її оптимізації може бути використана для створення сенсорів визначення формальдегіду в технологічних середовищах та дозволить забезпечити її постійний моніторинг.

**Виклад основного матеріалу.** З літератури відомо, що визначення формальдегіду можливе як за струмом його відновлення, так і окиснення. Зважаючи на достатньо негативний потенціал, за якого можливе повне відновлення  $\text{НСОН}$  (негативніше за мінус 1,7 В), за таких умов складно реалізувати систему з низьким енергоспоживанням і обов'язковим буде застосування зовнішнього потенціостатуючого пристрою. Разом з тим, окиснення формальдегіду можливе за потенціалів менше за +1,0 В, що дозволить підібрати для побудови гальванічного пристрою допоміжний електрод для забезпечення відповідного потенціалу робочого електрода.

Також відомо, що  $\text{НСОН}$  здатен до електрохімічних перетворень в кислих та лужних середовищах, однак саме в лужному середовищі досягається його більш повне окиснення спочатку до мурашиної кислоти



яка, у свою чергу, окислюється до  $\text{CO}_2$



тому для дослідження як робочий електроліт використовували розчин  $0,1$  моль/дм<sup>3</sup>  $\text{NaOH}$ .

Як електродний матеріал для окисно-відновних процесів найбільш часто застосовують платину та матеріали на її основі. З метою зменшення вартості можливе використання електродних матеріалів, де тонкий шар платини нанесено основу з іншого металу, який характеризується високою хімічною стійкістю та відіграє роль інертного струмопідводу [7]. У роботі було використано пластинчастий платиновий електрод типу Пл99,9 та пресований електрод з платинованого титану. Останній являв собою диск діаметром  $21$  мм, товщиною  $0,25$  мм і пористістю  $30\%$ , і виготовляли його з  $0,2$  г порошку титану, активованого платиною ( $20$  мг/г титану), напрусованого на шар з  $0,2$  г титану з зусиллям пресування  $90$  кН. Для надання механічної жорсткості диск напрусовували на диск, виготовлений з  $2,5$  г політетрафторетилену. Струмопідведення забезпечували запрусовуванням в титанову основу титанового дроту.

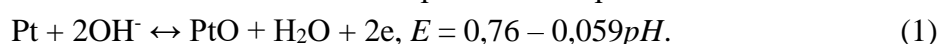
Дослідження проводили в розчинах без формальдегіду та з додаванням  $\text{НСОН}$  до його концентрації в розчині  $0,01$  моль/дм<sup>3</sup> та  $0,1$  моль/дм<sup>3</sup>. Для приготування розчинів з необхідним вмістом формальдегіду використовували вихідний  $30\%$ -й розчин.

Дослідження поведінки електродних матеріалів в різних розчинах проводили з використанням триелектродної схеми методом циклічної вольтамперометрії в умовах лінійної розгортки потенціалу. Приладом для отримання поляризаційних кривих слугував одноканальний потенціостат марки PGStat500n, швидкість розгортки потенціалу  $2$  мВ/с. Використовували скляну комірку, в якій розміщували робочий та допоміжний електрод. Електрод порівняння знаходився в окремій комірці, а електролітичний контакт між посудинами здійснювався через скляний електролітичний місток. Як електрод порівняння в електрохімічній системі використовували ртутно-оксидний електрод. Усі потенціали в роботі наведено відносно стандартного водневого електрода.

Анодну поляризацію усіх електродних матеріалів проводили до потенціалу  $+0,8$  В, тому що за більш позитивних значень потенціалів уже спостерігались значні струми, пов'язані з початком виділення кисню, що ускладнювало інтерпретацію даних. У статті на поляризаційних кривих для зручності опрацювання експерименту показано тільки перший та п'ятий цикл. Більшу кількість циклів поляризації не використовували, тому що в подальшому не відбувалось зсуву поляризаційних кривих порівно із попередніми, тобто досягався певний рівноважний стан.

*Електрохімічна поведінка платини.* Платина є одним із найбільш широко використовуваних матеріалів для окиснення формальдегіду завдяки своїй каталітичній активності та стабільності.

На платиновому електроді в розчині  $\text{NaOH}$  встановлюється безструмовий потенціал близько  $E = 0,05$  В, який відповідає встановленню рівноважної реакції



Анодна поляризація платинового електрода призводить до появи струмів за потенціалів позитивніше  $E = 0,4$  В (рис. 1), що може свідчити про утворення гідроксиду платини за реакцією [5] (рис. 1):

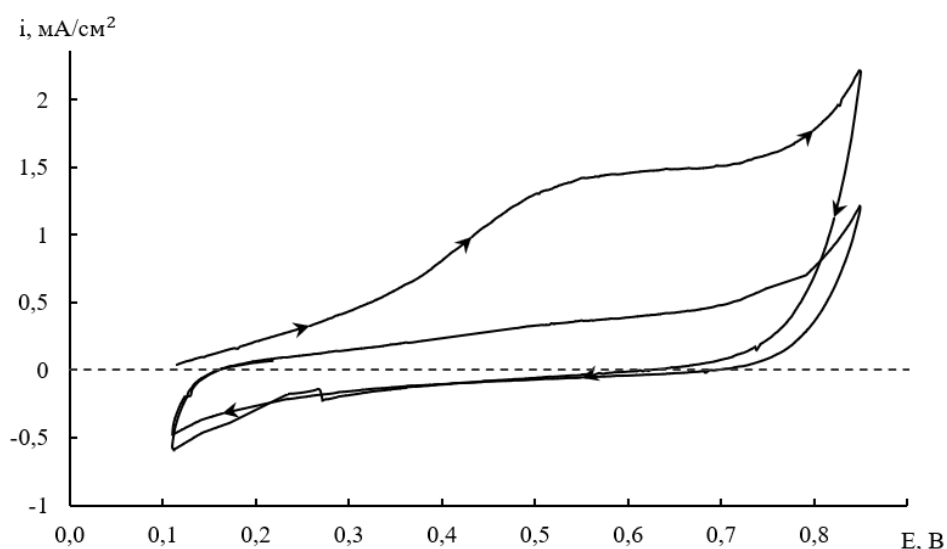


Рис. 1. Потенціодинамічна поляризаційна крива на платиновому електроді в розчині 0,1 моль/дм<sup>3</sup> NaOH. Стрілками показано напрям зсуву потенціалу  
 Джерело: розроблено авторами.



У наступних циклах ці струми зменшуються внаслідок закінчення формування дофазової плівки гідроксиду. За потенціалів позитивніше 0,8 В спостерігаються анодні струми, пов'язані із початком процесу виділення молекулярного кисню.

Введення в розчин лугу формальдегіду для створення концентрації 0,01 моль/дм<sup>3</sup> призводить до появи на поляризаційній кривій значних струмів (рис. 2). На кривих при прямому ході чітко можна відмітити максимум струму окислення за потенціалу -0,15 В.

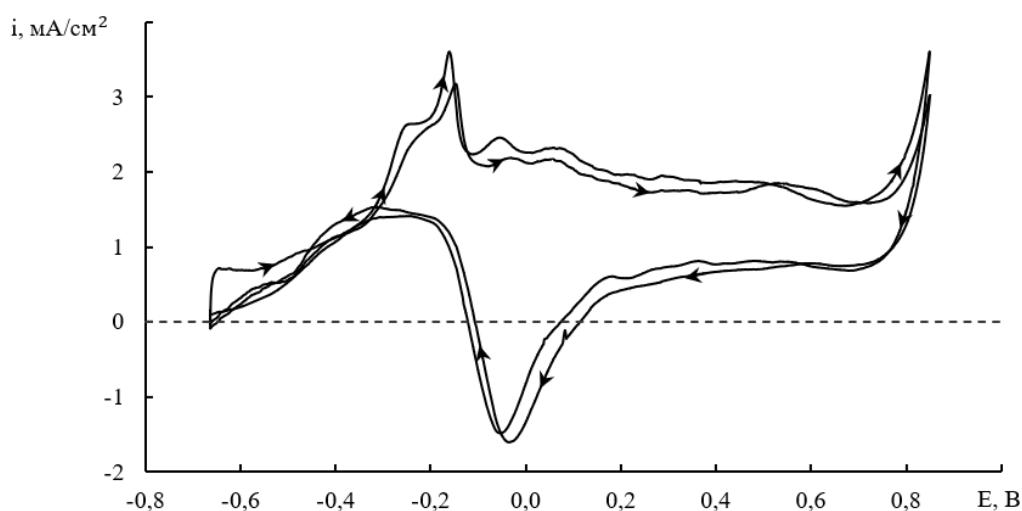


Рис. 2. Потенціодинамічна поляризаційна крива на платиновому електроді в розчині 0,1 моль/дм<sup>3</sup> NaOH + 0,01 моль/дм<sup>3</sup> HCHO  
 Джерело: розроблено авторами.

Наявність перегинів поляризаційної кривої перед максимумом струму може бути пов'язана зі стадійним механізмом перебігу процесу. Формальдегід на платині електрокаталітично окислюється за механізмом, у якому електрод окислюється до PtOH, а потім до Pt(OH)<sub>2</sub>, які, у свою чергу, окислюють формальдегід. При цьому реакції, що відбуваються в процесі окиснення формальдегіду на платиновому електроді, мають такий вигляд [6]:



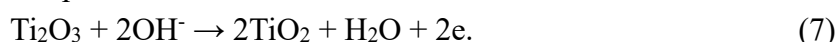
Окиснення формальдегіду починається за потенціалу, який знаходиться за межами адсорбції водню на платині. Це може бути пов'язане з тим, що деякі міцно зв'язані сполуки утворюються під час взаємодії адсорбованого водню з проміжним продуктом або продуктом окиснення HCOH.

На зворотному ході поляризаційної кривої за потенціалів 0...-0,1 В спостерігаються струми відновлення адсорбованих на електроді частинок, які утворились в результаті неповного перебігу реакцій (3)-(5).

*Електрохімічна поведінка титану.* Платина є хоча і найбільш поширеним електродним матеріалом, але разом з тим, малоселективним та дуже дорогим. Тому в промисловості дуже часто застосовують електродні матеріали, створені нанесенням тонкого каталітичного шару платини на інертну струмопровідну основу. Таким матеріалом може бути титан, але спочатку має бути встановлена його електрохімічна стабільність. На поверхні титанового електрода, виготовленого напресовуванням 0,2 г дрібнодисперсного порошку на фторопластовий диск, в розчині 0,1 моль/дм<sup>3</sup> NaOH встановлюється безструмовий потенціал близько -0,1...0 В, який відповідає перебігу спряжених реакцій відновлення розчиненого кисню



та збільшення стехіометрії поверхневих оксидів на титані



Анодна поляризація титанового електрода призводила до виникнення незначних струмів (рис. 3), пов'язаних із подальшим зростанням товщини пасивуючих шарів на поверхні титану за реакцією (7), і лише за потенціалів позитивніше 0,8 В спостерігалось зростання струму, зумовленого початком процесу виділення кисню. Введення в розчин формальдегіду у концентрації 0,01 моль/дм<sup>3</sup> не призводило до появи на поляризаційній кривій яких-небудь струмів (поляризаційна крива була ідентична отриманій у розчині без додавання формальдегіду, тому тут не наведена), що свідчить про повну інертність титану та підтверджує можливість його застосування як струмопровідної основи електрода.

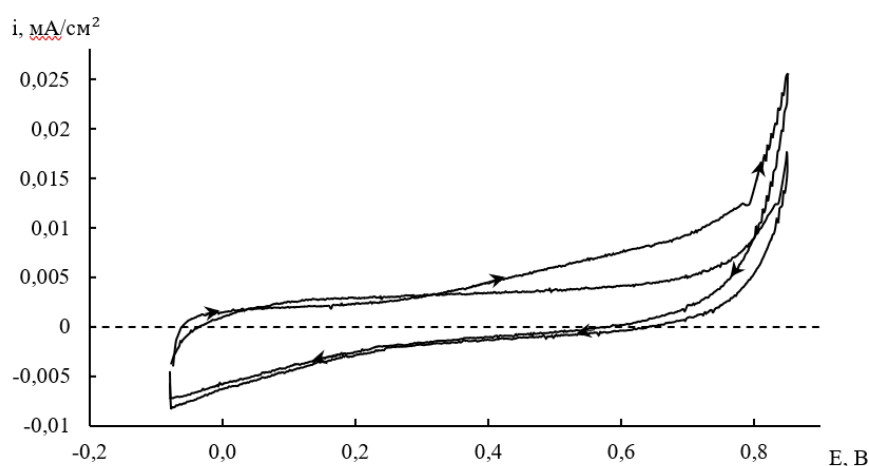


Рис. 3. Потенціодинамічна поляризаційна крива на титановому електроді в розчині 0,1 моль/дм<sup>3</sup> NaOH

Джерело: розроблено авторами.

*Електрохімічна поведінка платинованого титану (ПТА).* На поверхні титанового електрода, активованого платиною, в розчині 0,1 моль/дм<sup>3</sup> NaOH встановлюється безструмовий потенціал 0,1...0,15 В, який відповідає рівноважній реакції (1). Поведінка електрода за анодної поляризації (рис. 4) повністю ідентична такій для платинового електрода, але густини струмів, які реєструвались, значно нижчі, через те, що фактична площа електродів на порядок перевищувала геометричну. Лише за потенціалів позитивніше 0,8 В реєструються струми, пов'язані із початком виділення кисню.

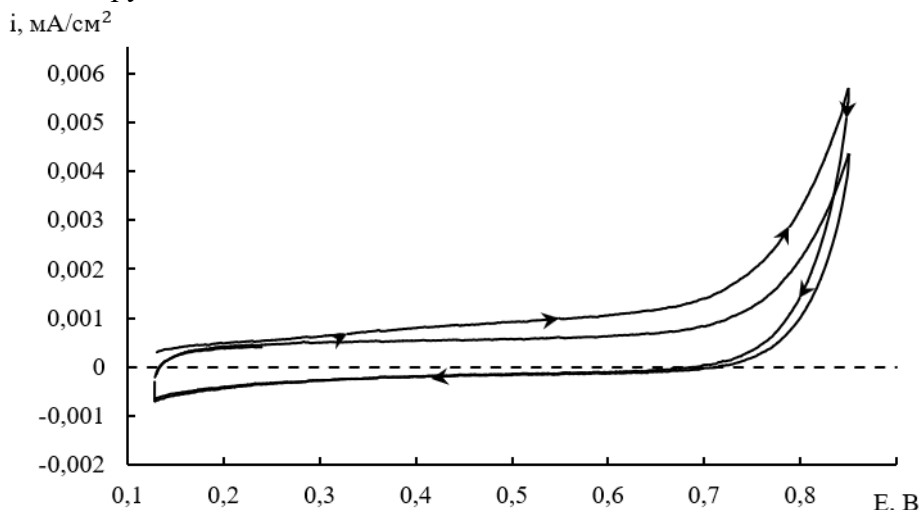


Рис. 4. Потенціодинамічна поляризаційна крива на електроді ПТА в розчині 0,1 моль/дм<sup>3</sup> NaOH

Джерело: розроблено авторами.

Введення в лужний розчин формальдегіду в концентрації 0,01 моль/дм<sup>3</sup> призводить до появи на циклічній вольт-амперній кривій двох хвиль окиснення (рис. 5) за потенціалів -0,1 В та 0,3 В, які, найбільш імовірно, відповідають стадійному окисненню формальдегіду.

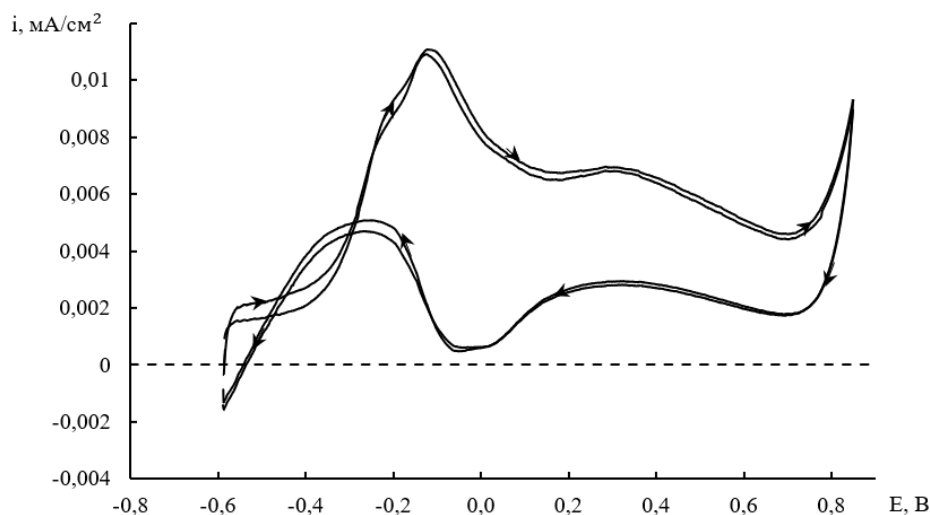


Рис. 5. Потенціодинамічна поляризаційна крива на електроді ПТА в розчині 0,1 моль/дм<sup>3</sup> NaOH + 0,01 моль/дм<sup>3</sup> HCHO

Джерело: розроблено авторами.

Як для платинового електрода, так і для ПТА, величини густини струму збільшувались з підвищенням концентрації формальдегіду в лужному розчині. За результатами ци-



клічних поляризаційних досліджень обрано потенціали максимум струмів, за яких відбувається окислення формальдегіду – вони відповідали  $E = 0,0$  В на платиновому електроді (рис. 2) та  $E = 0,3$  В на ПТА (рис. 5). З метою встановлення характеру залежності величин струмів від концентрації проведено дослідження в потенціостатичному режимі за визначених потенціалів, і за значеннями струмів, які встановлювались впродовж 5...15 хвилин, побудовано відповідні залежності для платинового електрода (рис. 6) та платиновитанового електрода (рис. 7).

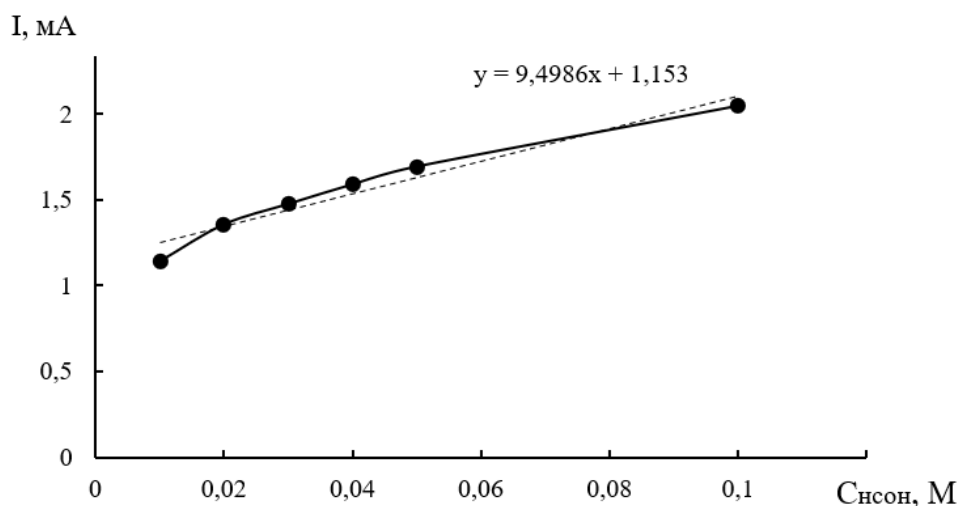


Рис. 6. Лінійна залежність сили струму на платиновому електроді від концентрації формальдегіду в розчині  $0,1$  моль/дм<sup>3</sup> NaOH

Джерело: розроблено авторами.

Хоча для платинового електрода спостерігались більші значення струмів, залежність струму від концентрації значно відхиляється від лінійної і має скоріше напівлогарифмічний характер, що буде ускладнювати побудову двоелектродної електрохімічної системи, придатної для моніторингу формальдегіду. На платиновитановому електроді реалізується майже лінійна залежність струму від концентрації (коефіцієнт апроксимації лінійного рівняння становив понад 0,995), тому надалі використовували саме цей тип електрода.

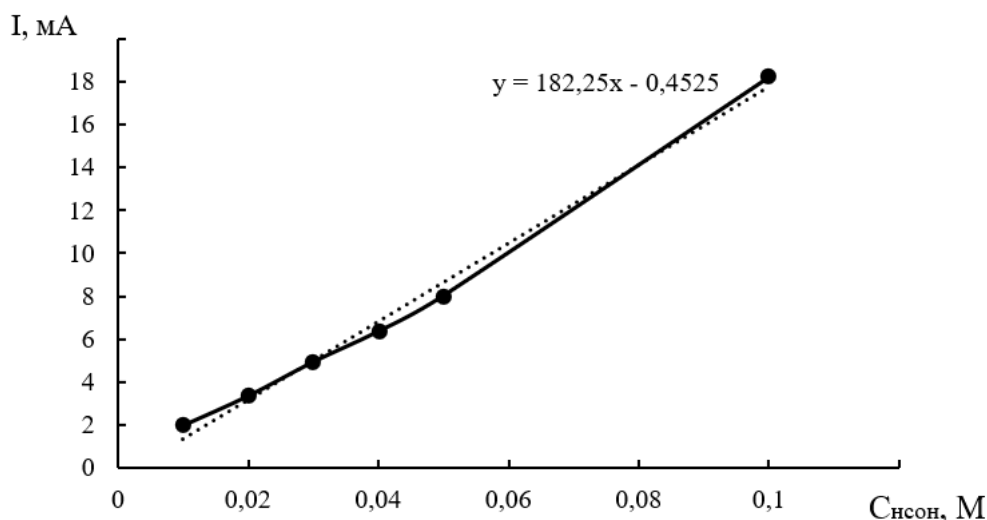
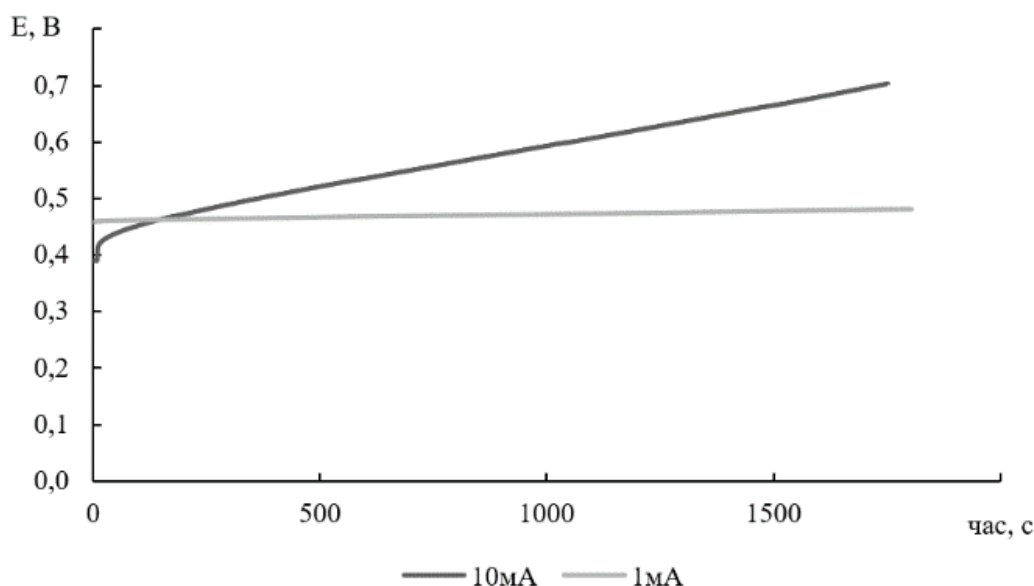


Рис. 7. Лінійна залежність сили струму на електроді ПТА від концентрації формальдегіду в розчині  $0,1$  моль/дм<sup>3</sup> NaOH

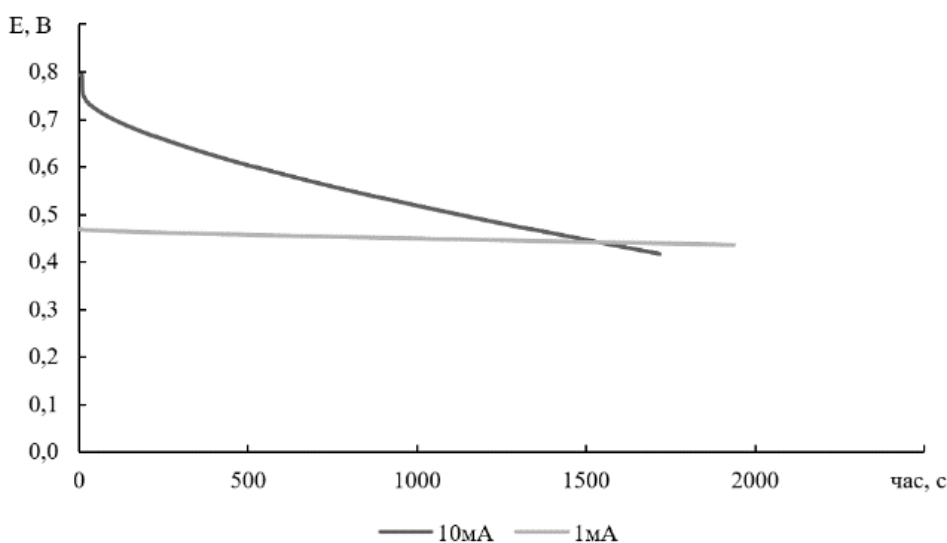
Джерело: розроблено авторами.

*Поляризаційні характеристики допоміжного електрода двоелектродної системи.* Як встановлено за результатами аналізу літератури, швидке визначення формальдегіду в водних та повітряних середовищах можливе з використанням електрохімічних сенсорів амперометричного типу, які у своїй конструкції містять щонайменше два електроди – робочий, потенціал якого змінюється за появи в розчині електроліту визначуваного компонента, та допоміжний, потенціал якого не повинен залежати від вмісту визначуваного компонента, однак повинен мати значення близьке до потенціалу окиснення/відновлення визначуваного речовини. Також допоміжний електрод повинен мати низьку поляризованість – не змінювати свій потенціал в результаті протікання великої кількості електрики в процесі роботи сенсора. Таким електродом може бути товстошаровий електрод, виготовлений з титанової струмопровідної основи, до складу якого введено діоксид мангану марки ЕДМ-2. Такий електрод виготовляли з 6 г порошку титану з додаванням 0,6 г  $MnO_2$ .

Як видно з отриманих даних (рис. 8, а), потенціал електрода в гальваностатичному режимі за постійного струму анодної поляризації 10 мА постійно зростає, що може бути зумовлено поступовим окисненням  $MnO_2$  та підвищенням його стехіометрії. За значення поляризуючого струму 1 мА дрейф потенціалу електрода не значний і знаходиться в діапазоні потенціалі 0,45...0,47 В. Катодна поляризація такого електрода струмом 1 мА демонструє його достатньо низьку поляризованість – потенціал електрода весь час знаходився в діапазоні 0,43...0,46 В (рис. 8, б), але за величини поляризуючого струму 10 мА в гальваностатичному режимі потенціал електрода невпинно зсувався в негативний бік через відновлення  $MnO_2$ , що супроводжується зниженням його стехіометрії. Отримані результати демонструють, що даний товстошаровий електрод може бути потенційно використаний як допоміжний електрод двоелектродної електрохімічної системи за умови, що величина струму, який проходить між електродами комірки, не буде значно перевищувати значення 1 мА. При цьому такий електрод буде «нав'язувати» іншому – робочому – електроду потенціал +0,45...+0,46 В, тобто більш позитивний, ніж достатньо для початку окиснення формальдегіду.



а



б

Рис. 8. Хронопотенціометричні залежності для товстошарового пористого електрода за анодної (а) та катодної (б) поляризації

Джерело: розроблено авторами.

Використання двоелектродної електрохімічної системи для визначення формальдегіду. На підставі проведених досліджень запропоновано електрохімічну систему, яка включає в себе робочий електрод, виготовлений з дрібнодисперсного платинованого титану, та допоміжний електрод з порошку титану з додаванням діоксиду мангану марки ЕДМ-2, і яка може бути використана для створення двоелектродного сенсора амперометричного типу для визначення формальдегіду. Методом пресування виготовлено двоелектродну комірку (рис. 9), де робочий 1 та допоміжний 3 електроди розділялися сепаратором 2 із суміші діоксиду цирконію як гідрофільного матеріалу із полімерним зв'язуючим – порошком політетрафторетилену. Спресовану комірку, яка мала вигляд таблетки діаметром 21 мм та товщиною 8 мм, встановлювали в циліндричний корпус 4 з оргскла, який містив отвір 5 діаметром 16 мм, що звернений до робочого електрода комірки. Електроди комірки за допомогою титанових струмопідводів 6 за двоелектродною схемою під'єднували до потенціостата, за допомогою якого робочому електроду задавався потенціал допоміжного електрода та який реєстрував струм, який проходив між електродами.

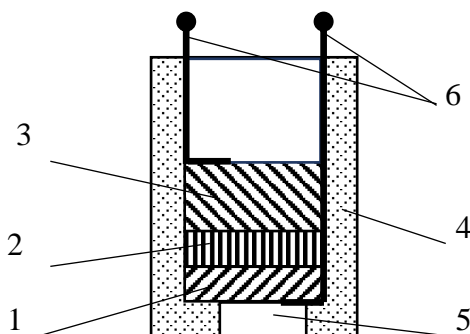


Рис. 9. Схематична будова двоелектродного пристрою для визначення формальдегіду:

1 – робочий електрод; 2 – сепаратор; 3 – допоміжний електрод; 4 – корпус;

5 – дифузійне вікно; 6 – титанові струмопідводи

Джерело: розроблено авторами.

Визначення придатності використання розробленої електрохімічної системи для визначення формальдегіду у водних розчинах проводили занурюючи нижню частину пристрою в ємність із водою, у яку додавали порціями розчин формальдегіду для створення певної концентрації. В результаті потрапляння НСОН через дифузійне вікно (поз. 5, рис. 9) між електродами електрохімічного пристрою виникав струм, який встановлювався впродовж 3...5 хвилин та реєструвався потенціостатом, до якого був підключений пристрій.

Використовуючи розчини з різною концентрацією формальдегіду, отримали залежність струму, що проходив між електродами, від концентрації формальдегіду в розчині (рис. 10).

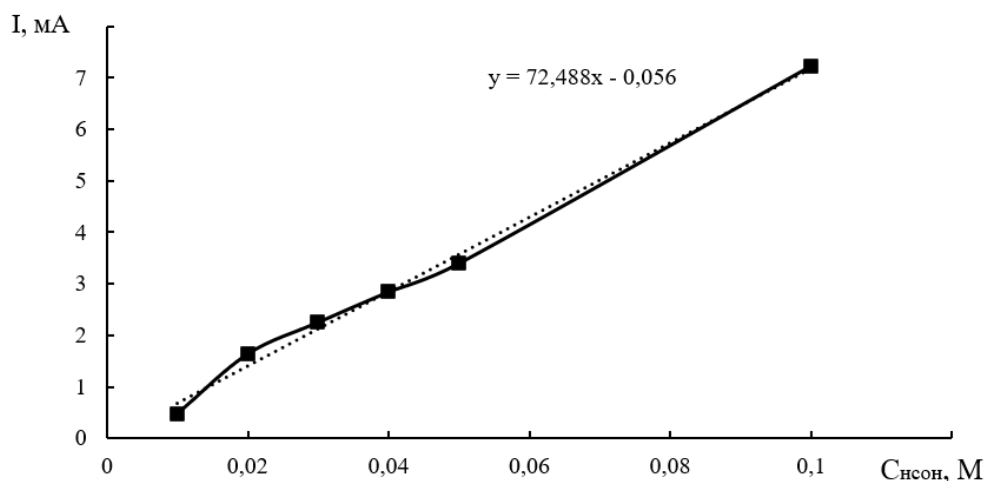


Рис.10. Залежність сили струму у двохелектродній системі від концентрації формальдегіду

Джерело: розроблено авторами.

Отримана залежність демонструє, що зі збільшенням концентрації формальдегіду в розчині спостерігається фактично лінійне зростання струму окиснення на робочому електроді розробленої двохелектродної системи, що робить її придатною до використання для створення амперометричного сенсора для моніторингу вмісту формальдегіду.

**Висновки.** У роботі методом циклічної вольтамперометрії проведено дослідження електрохімічної поведінки платини та платинованого титану у водних розчинах без та з додаванням формальдегіду. Вперше встановлено діапазон потенціалів, за яких на поверхні титану, активованого платиною, відбувається окиснення формальдегіду, при цьому струм окиснення майже лінійно залежить від концентрації формальдегіду в розчині. З метою створення двохелектродного пристрою для визначення формальдегіду запропоновано та досліджено товстопористий титановий електрод із додаванням ЕДМ-2, який характеризується низькою поляризованістю та зможе забезпечити сталий потенціал робочому електроду системи. Уперше розроблено двохелектродну систему з низьким вмістом благородних металів, яка може бути використана для моніторингу вмісту формальдегіду, та для якої встановлено лінійну залежність сили струму, що генерується на робочому електроді, від концентрації формальдегіду у воді. Отримані результати дозволяють зробити висновок про потенційну придатність створеної системи для моніторингу вмісту формальдегіду у водних, а після подальшого вдосконалення системи – і в повітряних системах.

#### Список використаних джерел

1. Bełtowska-Brzezinska, M. Electrochemical oxidation of formaldehyde on gold and silver / M. Bełtowska-Brzezinska // *Electrochimica Acta*. – 1985. – Vol. 30, No.9. – P. 1193-1198.
2. Stadler, R. Hydrogen evolution during the oxidation of formaldehyde on Au: The influence of single crystal structure and Tl-upd / R. Stadler, Z. Jusys, H. Baltruschat // *Electrochimica Acta*. – 2002. – Vol. 47, No. 28. – P. 4485-4500.

3. A New Kinetic-Mechanistic Approach to elucidate formaldehyde Electro-oxidation on Copper electrode / M. Hasanzadeh, B. Khalilzadeh, G. Karim-Nezhad, I. Kazeman, M.H. Abnosi // *Electroanalysis*. – 2010. – Vol. 22, No. 2. – P. 168-176.
4. Hasanzadeh, M. Electro-catalytic oxidation of formaldehyde on copper electrode: a new kinetics model / M. Hasanzadeh, N. Shadjou // *Acta chimica Slovenica*. – 2013. – Vol. 60, No. 1. – P. 184-189.
5. Ohno, I. Anodic Oxidation of Reductants in Electroless Plating / I. Ohno, O. Wakabayashi, S. Haruyama // *Journal of The Electrochemical Society*. – 1985. – Vol. 132, No. 10. – P. 2323-2330.
6. Oxidation of formaldehyde in an alkaline medium on a polycrystalline platinum electrode / P. Olivi, L. O. S. Bulhões, B. Beden, F. Hahn, J.-M. Léger, C. Lamy // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. – 1992. – Vol. 330, No.1-2. – P. 583-594.
7. Electrochemical properties of titanium-based catalytically active electrodes in perchloric acid / O. V. Kosohin, A. I. Kushmyruk, Y. S. Miroshnychenko, O. V. Linyucheva // *Materials Science*. – 2012. – Vol. 48. – P. 139-146.

### References

1. Bełtowska-Brzezinska, M. (1985). Electrochemical oxidation of formaldehyde on gold and silver. *Electrochimica Acta*, 30(9), 1193-1198. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(95\)80012-3](https://doi.org/10.1016/0013-4686(95)80012-3).
2. Stadler, R., Jusys, Z. & Baltruschat, H. (2002). Hydrogen evolution during the oxidation of formaldehyde on Au: The influence of single crystal structure and TI-upd. *Electrochimica Acta*, 47(28), 4485–4500. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(02\)00521-2](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(02)00521-2).
3. Hasanzadeh, M., Khalilzadeh, B., Karim-Nezhad, G., Kazeman, I. & Abnosi, M.H. (2010). A New Kinetic-Mechanistic Approach to elucidate formaldehyde Electro-oxidation on Copper electrode. *Electroanalysis*, 22(2), 168-176. <https://doi.org/10.1002/elan.200900294>.
4. Hasanzadeh, M. & Shadjou N. (2013). Electro-catalytic oxidation of formaldehyde on copper electrode: a new kinetics model. *Acta chimica Slovenica*, 60(1), 184–189. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23841350>.
5. Ohno, I., Wakabayashi, O. & Haruyama, S. (1985). Anodic Oxidation of Reductants in Electroless Plating. *Journal of The Electrochemical Society*, 132(10), 2323-2330. DOI 10.1149/1.2113572.
6. Olivi, P., Bulhões, L.O.S., Beden, B., Hahn, F., Léger, J.-M. & C. Lamy. (1992). Oxidation of formaldehyde in an alkaline medium on a polycrystalline platinum electrode. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 330(1–2), 583-594. [https://doi.org/10.1016/0022-0728\(92\)80331-W](https://doi.org/10.1016/0022-0728(92)80331-W).
7. Kosohin, O.V., Kushmyruk, A.I., Miroshnychenko, Y.S. & Linyucheva, O.V. (2012). Electrochemical properties of titanium-based catalytically active electrodes in perchloric acid. *Materials Science*, 48, 139–146. <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9483-0>.

Отримано 08.12.2023

UDC 544.6:547.281.1

**Mariia Sovhut<sup>1</sup>, Oleksii Kosohin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Master-student, Department of electrochemical production technology  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [maria.sovgut@gmail.com](mailto:maria.sovgut@gmail.com)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associated Professor of the Department of electrochemical production technology  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [o.kosogin@kpi.ua](mailto:o.kosogin@kpi.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8379-9580>

Researcher ID: [1-3040-2018](https://orcid.org/0000-0001-8379-9580). SCOPUS Author ID: [55463712800](https://orcid.org/0000-0001-8379-9580)

### ELECTROCHEMICAL DETERMINATION OF FORMALDEHYDE

*Pollution of the air and water environment with formaldehyde as a result of anthropogenic influence is a serious problem in Ukraine and the world. Even small amounts of formaldehyde have a negative impact on human health, so it is important to regularly monitor the content of the pollutant in water environments.*

*Direct and indirect methods of analysis are commonly used to determine formaldehyde, however, such methods are expensive, require expensive reagents, and have low sensitivity. That is why there is a need to develop an electrochemical method based on oxidation/reduction processes of formaldehyde on electrodes. The use of an electrochemical method for the determination of formaldehyde makes it possible to develop sensitive devices suitable for its operational monitoring.*

*The purpose of this work is to research electrode materials suitable for electrochemical oxidation of formaldehyde and to create an electrochemical system, the use of which will allow obtaining more accurate and sensitive results, which is important for reliable control over the level of formaldehyde in solutions.*

*The studies were carried out using platinum and platinum-plated titanium as working electrodes, the working solution was sodium hydroxide  $0.1 \text{ mol/dm}^3$  and 30% formaldehyde solution as the starting solution, which was used to create the required concentration in the working solution by dilution. The study of the behavior of electrode materials in various solutions was carried out using a three-electrode circuit by the method of cyclic voltammetry with a linear sweep of the potential. As a result, the oxidation potential of formaldehyde was determined, which was  $0.3 \text{ V}$  for platinum-plated titanium. In the potentiostatic mode, the dependence of the formaldehyde oxidation current on its concentration in the solution was investigated. The composition of the auxiliary electrode is proposed - a dispersed titanium with the addition of EDM-2 manganese dioxide, and its low polarization under the action of cathodic and anodic currents is determined. On the basis of the obtained results, a two-electrode system is proposed for determining of formaldehyde content in aqueous media, using which a linear dependence of the current generated at the working electrode on the concentration of formaldehyde in the solution is obtained, which makes it possible to draw a conclusion about the suitability of the created system for monitoring the formaldehyde content in aqueous solutions.*

**Keywords:** formaldehyde; electrochemical determination; voltammetry; working electrode; auxiliary electrode; sensor; platinum-plated titanium; manganese dioxide.

*Fig.: 10. References: 7.*

## РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-4(34)-207-220

УДК 621.314

**Юрій Денисов<sup>1</sup>, Віталій Скугарев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри “Електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки”,  
Національний університет “Чернігівська політехніка” (Чернігів, Україна)  
E-mail: [den711td@gmail.com](mailto:den711td@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2293-7964>  
ResearcherID: G-1144-2016. Scopus Author ID: 56338219200

<sup>2</sup>аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій  
Національний університет “Чернігівська політехніка” (Чернігів, Україна)

E-mail: [v.skugarev88@gmail.com](mailto:v.skugarev88@gmail.com). ORCID <https://orcid.org/0009-0008-2538-6997>. ResearcherID: JOK-0150-2023

### ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ ПУЛЬСАЦІЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ПОКАЗНИКИ ЕНЕРГОДИНАМІЧНОЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БОРТОВИХ СИСТЕМ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

*Роль систем силової електроніки в забезпеченні надійної роботи бортових радіоелектронних комплексів (літальні апарати, автомобільний транспорт та інші) різноманітного призначення є вирішальною. Особливістю таких систем є те, що вони живляться від джерел електроенергії обмеженої потужності. Здатність систем силової електроніки якісно та надійно впродовж довгого часу виконувати свої функції залежить від багатьох чинників, які залежать від якості енергодинамічних показників (ККД, перерегулювання, довжина перехідних процесів, стійкість), а також від якості характеристик активних та пасивних елементів силових, інформаційних кіл та їх топології. Головним чинником, який обмежує час роботи бортового електронного обладнання, є обмеженість енергетичного ресурсу, джерела живлення – акумулятора, який живить інформаційні та силові блоки бортових електронних комплексів. Забезпечення надійного функціонування цих комплексів впродовж довгого часу можливо на основі реалізації якісних енергетичних та динамічних характеристик систем силової електроніки з врахуванням їх взаємозалежності та взаємовпливу, що є актуальною проблемою. Отримання якісних енергетичних та динамічних характеристик може бути вирішено за рахунок нових законів та методів керування перетворювачами та впровадження нових напівпровідникових приладів.*

**Ключові слова:** імпульсні перетворювачі; системи енергоживлення; перерегулювання; енергоефективність; системи електроприводу.

Рис.: 11. Бібл.: 12.

**Постановка проблеми.** Враховуючи обмежений енергетичний ресурс бортового джерела живлення, час використання цього ресурсу пропонується збільшити за рахунок зменшення впливу дискретних перетворювачів електроенергії на втрати потужності та якість показників динамічних процесів, перерегулювання, час перехідного процесу, стійкість.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У відомих публікаціях [1]-[4], що присвячені поставленій тематиці, основна увага приділяється якісному конструюванню систем бортової силової електроніки з забезпеченням максимальної потужності в одиниці об'єму за рахунок підвищення частоти перемикання силових приладів. Що стосується енергетичних та динамічних показників, їх розрахунку та оптимізації-то все це вирішується за постійною складовою без врахування пульсацій [4]. У відомих роботах, що присвячені поставленій проблемі, не досліджено вплив пульсацій перетворювачів електроенергії на якість енергетичних та інформаційних процесів, що існують у системах силової електроніки, не враховано їх взаємозв'язок та взаємовплив.

**Метою роботи** є аналіз шляхів підвищення часу використання енергоресурсу бортових джерел живлення, за рахунок забезпечення якісних енергодинамічних показників, на які негативно впливають пульсації бортових перетворювачів електроенергії.

**Виклад основного матеріалу.**

**Перетворювачі систем бортових систем енергоживлення.** У бортових системах силової електроніки (літаки, вертольоти, квадрокоптери) та в автотранспорті широко використовуються автономні інвертори напруги (АІН), перетворювачі частоти,

випрямлячі, імпульсні перетворювачі постійної напруги (ІППН). Вони працюють в дискретному режимі, що супроводжується генерацією пульсацій напруги та струму. Потужність навантаження для таких систем складає від десятків кВт (системи запуску газотурбінних двигунів літаків), одиниць кіловат (системи запуску газотурбінних двигунів вертольотів) до десятків сотень Вт для керування параметрами вприскування палива, повітря, запалювання, що забезпечують роботу авіадвигуна з мінімальною втратою палива. Усі ці функції виконуються системами силової електроніки зі зворотними зв'язками за відповідними параметрами, що забезпечують керування роботою електричних двигунів: безколекторних постійного струму, синхронних змінного струму, лінійних та крокових. Крім цього, забезпечується електроживлення пристроїв інформаційної радіоелектроніки – системи керування та навігації. Зменшення рівня пульсацій і разом з цим об'єму перетворювачів електроенергії вирішується шляхом підвищення частоти перемикання силових ключів. Але ж це справедливо до частоти 500 кГц. На більш високих частотах з'являються специфічні явища у пасивних елементах схем, що не дозволяють досягти мети за цілями, що поставлені. Наприклад, потрібна ємність конденсатора фільтра зменшується з ростом частоти, але при цьому зменшується здатність конденсатора пропускати через себе змінну складову пульсуючого струму під впливом паразитних параметрів. Зі збільшенням частоти втрати в діелектрику конденсатора збільшуються. При цьому зростають втрати в магнітних матеріалах, навіть більше, ніж коли зменшується індуктивність дроселя фільтра. Це вимагає збільшення розміру магнітопроводу дроселя, щоб знизити в ньому втрати потужності. Крім цього, скін-ефект та ефект близькості на високих частотах зменшують при виготовленні дроселів та трансформаторів, знижуючи плотність намотки. Навіть у польових МОП-транзисторах великої потужності на частотах вище декількох МГц з'являються значні комутаційні втрати. Перелічені чинники призводять до збільшення втрат. Виникає проблема збільшення ККД за рахунок використання нових матеріалів, нових схемотехнічних рішень та законів керування перетворювачами, що дозволяють підвищити енергодинамічні показники систем силової електроніки. Розглянемо вплив окремих чинників на ці показники.

**Вплив паразитних параметрів активних та пасивних елементів схем.** Основна задача, що вирішується при розробці перетворювачів електроенергії – зробити корисними паразитні параметри активних елементів схем. Передусім це ємності силових напівпровідникових приладів, їх індуктивність розсіювання, індуктивності дротів, що з'єднують окремі компоненти схем. Наприклад, вхідна ємність МОП-транзистора впливає на ККД перетворювача на частотах вище за 3 МГц. Ця ємність збільшує час перемикання та призводить до втрат енергії, яка накопичується в ній двічі за період, якщо не реалізоване резонансне керування затвором. Ємність сток-витік МОП-транзистора також впливає на втрати, тому що вона заряджається та розряджається кожного періоду. Ємність сток-затвор створює зворотній зв'язок, що збільшує час перемикання транзистора. На великих частотах розмір трансформатора, який гальванічно ізолює вихідну мережу від вхідної, може бути знижено. Ємності між обмотками трансформатора можуть бути корисними елементами схем, але ж найбільшу проблему створює індуктивність розсіювання обмоток трансформатора.

**Енергонакопичуючий елемент.** Найбільш об'ємними елементами перетворювача є дроселі та конденсатори. На високих частотах вплив скін-ефекту на втрати збільшується, починає помітно впливати ефект близькості. Термін “ефект близькості” має відношення до впливу магнітного поля, який створено струмом одного дрота на розподіл струму у другому дроті. Конденсатори в перетворювачах використовуються в мережах змінного (резонансний контур), або постійного струму. Але ж при роботі на постійному



струмі вони знаходяться і під впливом значних змінних складових пульсацій струму, що збільшує втрату в діелектрику конденсатора. Вочевидь і тут проблема впливу пульсацій на енергетичні показники перетворювача.

**Напівпровідникові прилади.** Напівпровідникові прилади великої потужності в перетворювачах виконують дві функції: перемикання та випрямлення. На великих частотах звичайно використовують МОП-транзистори та діоди Шоткі. Біполярний транзистор на великих частотах не використовують, тому що він має невисоку швидкодію та велике пряме падіння напруги, що погіршує ККД, однак використання МОП-транзисторів та діодів Шоткі також створює проблеми, головною з них є паразитні ємності: вхідної та вихідної мереж прилада, на яких теж існують втрати потужності. Навіть використання діодів Шоткі лише знижує, але не виключає повністю втрати в випрямлячі. Ще одним їхнім недоліком є те, що велика ємність погіршує процес регулювання на великих частотах.

**Керування.** На високих частотах існують три проблеми керування перетворювачами. Перша – це датчики змінних, якими керують. Використання звичайних датчиків напруги або струму вносять в канали керування паразитні параметри індуктивності, ємності, опори. Вирішення питання керування ускладнюється необхідністю розв'язання вхідних та вихідних ланцюгів датчика. Друга проблема – забезпечення широкої смуги пропускання системи керування, щоб ефективно використовувати високочастотні комутації при розробці вхідних та вихідних фільтрів. Третя проблема – вплив пульсацій живлення на показники еталонних сигналів на вході регуляторів, що формують закони керування перетворювачами. Звичайно, коли розглядають питання оптимізації їх контурів регулювання, вважають, що жоден з них не виходить за межі керуваності. Проте це справедливо, якщо пульсації джерела живлення не впливають на їх вихідні сигнали. Це особливо помітно, коли регулятори контурів зворотного зв'язку виконують на основі мікросхем із невисоким значенням напруги живлення. При великих або швидких (під впливом пульсацій) змінах еталонного завдання можна очікувати насичення регулятора або його роботу “на упорі”. У цьому випадку сигнал, що керує, не має того рівня та форми, що вимагається згідно з різницею між еталонним сигналом і фактичним його значенням. Наслідком такої ситуації є те, що сигнал, який керує, в перехідному процесі приймає не ті значення, які потрібні за результатами розрахунку перехідної характеристики. Оскільки керуючий сигнал не здатний досягти необхідної амплітуди, то сигнал, що регулюється, змінюється повільно. У більшості випадків регулятор має інтегральну складову. Якщо такий інтегратор насичується, то він може повернутися в нормальний стан тільки тоді, коли на його вхід надходить сигнал зворотного знака. Для інтегрального регулятора це означає необхідність зміни знака сигналу, який є різницею між еталонним завданням та його поточним значенням. Така зміна знака може бути тільки тоді, коли еталонна та регульована величина спочатку зрівняються один з одним, а потім регульована величина продовжує змінюватися в бік нового обмеження. Наслідком цього є значне перерегулювання. Тут перерегулювання є необхідним для того, щоб процес заряду ємності в мережі зворотного зв'язку регулятора знову ввести в стаціонарний режим – режим сталого регулювання.

Звичайно, що таке перерегулювання з іншого погляду не є бажаним, тому що призводить до нестійкої роботи контура регулювання. Вочевидь, що необхідно створити такий регулятор, який би на своєму вході мав еталонний сигнал, що не залежить від пульсацій джерела живлення, яке його задає. Для цього треба забезпечити такий штучний режим роботи регулятора, при якому рівність еталонної та регульованої величин виникала би раніше того моменту, коли регулятор потрапляє до режиму насичення. Якщо ж при подальшому затуханні перехідного процесу ще подати на вхід регулятора сигнал розбіжності

заданої та дійсної величин зі зворотнім знаком, то перезаряд інтегруючої ємності почнеться також раніше і викидок величини, що регулюється, можна зменшити. Це вимагає відповідних схемотехнічних рішень та аналізу режимів роботи регулятора.

**Електромагнітні завади.** Для перетворювачів, що використовують в системах бортового живлення, вимагається відповідність військовому стандарту припустимих завод або ж його цивільному еквіваленту [5]. При цьому максимальна припустима амплітуда кондуктивних завод повинна відображатися в абсолютних значеннях струму незалежно від рівня потужності. Ці величини повинні спочатку зменшуватися зі швидкістю 30 дБ/декада, а вище за 2 МГц залишатися постійними.

Щоб забезпечити ці вимоги силові схеми повинні обмежувати пульсації з перемиканням у струмі і напрузі первинного джерела, що дуже важливо для змінних складових в діапазоні радіочастот. Наприклад, через вимоги щодо обмеження абсолютних значень пульсацій рівень їх послаблення у вхідному струмі перетворювача з вхідною напругою 40 В та потужністю 50 Вт при роботі на частоті 2 МГц повинен становити приблизно 100 дБ [6].

Для досягнення таких показників необхідно застосовувати метод активно-пасивної фільтрації.

**Питання топології схем енергетичної та інформаційної електроніки.** Система силових електроніки мають 2 складові – енергетичну (власне перетворювач) і інформаційну (системи керування, захисту, збору інформації про поточні значення параметрів, що регулюються). Топологія схем силових електроніки залежить від потужності навантаження, а також від його особливостей та призначенням за функціями, які він виконує. Це може бути автономний інвертор напруги, випрямляч чи перетворювач постійної напруги. Розглянемо можливі топології цих схем та їх особливості з погляду вимог до бортового електрообладнання:

Автономні інвертори напруги та вимоги до них:

- можливість регулювання в необхідних межах частоти вихідної напруги, що важливо, в першу чергу для електродвигунів систем запуску газотурбінних двигунів військово-транспортних літаків;
- можливість регулювання співвідношення між напругою живлення АІН та його вихідною напругою в необхідних значеннях. Це дозволяє при зміні живлячої напруги (наприклад при зниженні напруги в результаті розряду бортового акумулятора) підтримувати стабільною вихідну напругу;
- можливість роботи в режимі холостого ходу;
- можливість забезпечити синусоїдальної форми вихідної напруги, що призводять до мінімізації пульсацій, які негативно впливають на енергодинамічні показники системи живлення;
- стійка робота при навантаженні на асинхронні та синхронні двигуни, або у складі безколекторних двигунів постійного струму в якості комутатора;
- простота схемної реалізації з мінімальною кількістю комплектуючих елементів – силових та для вирішення задач якісного керування з достатньо високим ККД.

Досвід експлуатації АІН в системах живлення на борту літальних апаратів показав, що для запуску газотурбінних двигунів військово-транспортних літаків набули АІН по схемі трифазного моста, рис. 1, де VT1 - VT6 – силові транзистори зі зворотніми діодами. Завдяки резонансним ланкам; C1 - L1, C2 - L2, C3 - L3 задається траєкторія перемикання транзисторів, щоб отримати не прямокутну, а близьку до синусоїдальної форму вихідної напруги, що зменшує втрати потужності на силових ключах [6].

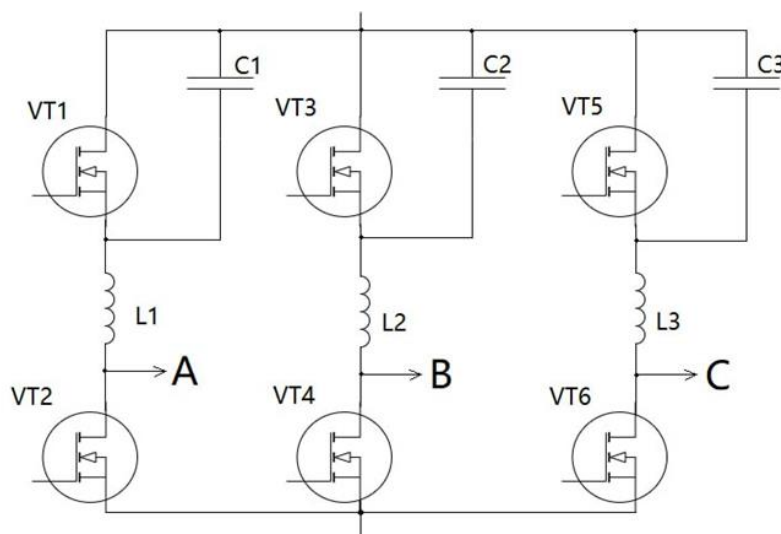


Рис. 1. Схема трифазного моста

Схема складається з трьох півмостів. При використанні двох із них маємо двухфазну мостову схему інвертора, а на основі одного можна реалізувати напівмостову схему АІН. Якщо АІН живиться від бортового генератора змінного струму, то на його вході присутній випрямляч. Схема АІН на рис. 1 знайшла широке застосування в якості комутатора безколекторних двигунів постійного струму [7-8], які використовуються для запуску газотурбінних двигунів вертольотів, та приводу чотирьох гвинтів квадрокоптерів. Така схема є базовою для однофазних та двофазних схем інверторів напруги для різноманітного застосування в базових системах електроживлення. Існують два загальних класи перетворювачів постійної напруги в постійну. Вони знаходять застосування в системах запуску газотурбінних двигунів вертольотів, досягають потужності 3 кВт, живляться від бортового акумулятора з вихідною напругою 24 В. Перший клас перетворювачів постійної напруги в постійну має прямокутну форму вихідної напруги. Струм та напруга прямокутної форми на ключах, що перемикаються, призводять до значних комутаційних втрат, які зростають зі збільшенням частоти. Другий клас – це резонансні перетворювачі, у яких LC - контури обмежують швидкість зростання напруги на ключі та струму через нього, що зменшує комутаційні втрати майже до нуля. Розглянемо ці два класи перетворювачів. Перетворювачі з прямокутною формою напруги та струму складається з напівпідпровідникових ключів (транзистори, діоди) та фільтруючих елементів індуктивності, ємності). Хоча є декілька топологічних різноманітностей, усі вони базуються на схемі, що показані на рис. 2.

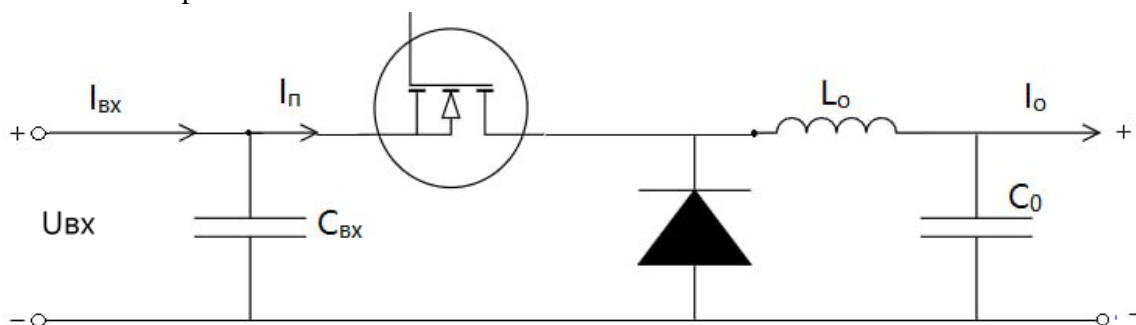


Рис. 2 Перетворювач з прямокутною формою напруги

Індуктивність  $L_0$  вважається досить великою, так що струм  $I_0$  постійний. Аналогічно напруга  $U_{вх}$  вважається постійною ( $C_{вх} \rightarrow \infty$ ). Схема (рис. 2) – це ідеальна топологія. Щоб показати, як з'являються комутаційні втрати, треба в ідеальну топологію схеми додати паразитні електронакопичуючі елементи. У діапазоні робочих частот (1-10) МГц доцільно використовувати МОП-транзистор, а в ролі діода - випрямляч Шоткі. Хоча ці прилади перемикаються швидко, але в них є внутрішні ємності, які мають істотні значення на таких частотах. Крім цього, паразитна індуктивність мережі, що створена конденсатором фільтра, транзистором та діодом, має помітний вплив на поведінку схеми. На рис. 3 показана схема перетворювача постійної напруги в постійну з цими паразитними елементами.

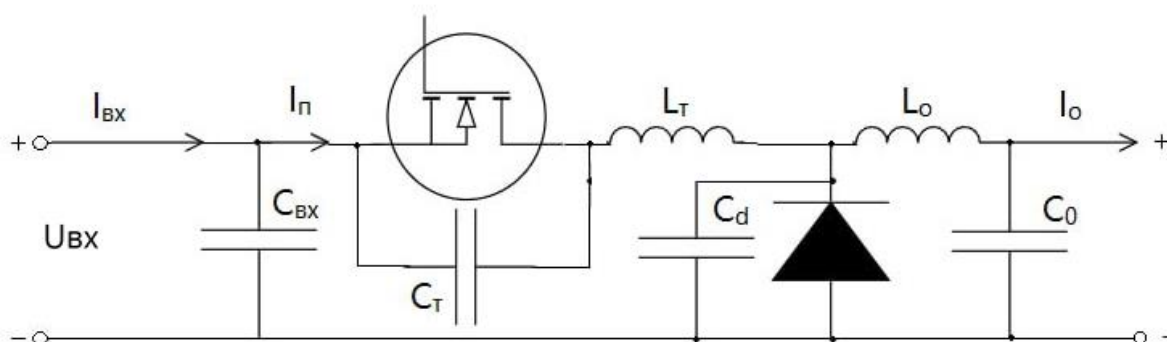


Рис. 3. Схема перетворювача постійної напруги в постійну з паразитними елементами

На рис. 3:  $C_T$ ,  $L_T$  – паразитні ємність та індуктивність транзистора,  $C_d$  – паразитна ємність діода. Якщо спочатку не враховувати паразитну індуктивність, то можна досить легко пояснити вплив паразитних ємностей  $C_T$ ,  $C_d$  на перехідні процеси в ключі. Якщо МОП-транзистор вимикається дуже швидко, то струм, який до того протікав через його канал, переключиться на  $C_T$ ,  $C_d$  пропорційно їх величинам. Ємність  $C_T$  буде заряджатися, а  $C_d$  – розряджатися доти, поки напруга не досягне нуля та включиться діод. Під час цього інтервалу відбувається зміна енергії, що накопичена в паразитних ємностях, але її розсіювання не відбувається. Однак, коли МОП-транзистор увімкнеться, енергія буде втрачена з таких причин. По-перше, МОП-транзистор повинен прийняти увесь струм навантаження до того, як закриється діод і доти, поки діод залишається відкритим, на транзисторі підтримується висока напруга. Стосовно паразитної індуктивності, то якщо вона доведена навіть до 30 нГн, її вплив на перехідний процес увімкнення транзистора буде незначним. Швидкість зменшення напруги на МОП-транзисторі звичайно мала і вона не заважає заряду паразитної ємності діода. Однак під час перехідного процесу виключення навіть малої індуктивності призводить до двох важливих негативних ефектів. Перший складається з того, коли напруга на МОП-транзисторі досягне нуля і діод вмикається, то струм протікає через паразитну індуктивність і заряджає ємність МОП-транзистора до напруги, яка перевищує  $U_{вх}$ . Друга є наслідком того, що оскільки індуктивність  $L_T$  та ємність МОП-транзистора не створюють коливального контуру, енергія, що накопичена в індуктивності, губиться. Коли коефіцієнт передачі вхід-вихід перетворювача значний, чи коли потрібна електрична ізоляція між вхідною та вихідною системами, в схему додають трансформатор. Напівпровідникові прилади в цьому випадку існують для перемикавання вхідної напруги з полярністю, що послідовно змінюється на первинній обмотці.

Одна з можливих схем, у якій потужність передається через трансформатор тільки на протязі половини періоду (коли транзистор і діод D1 включені) показана на рис. 4.

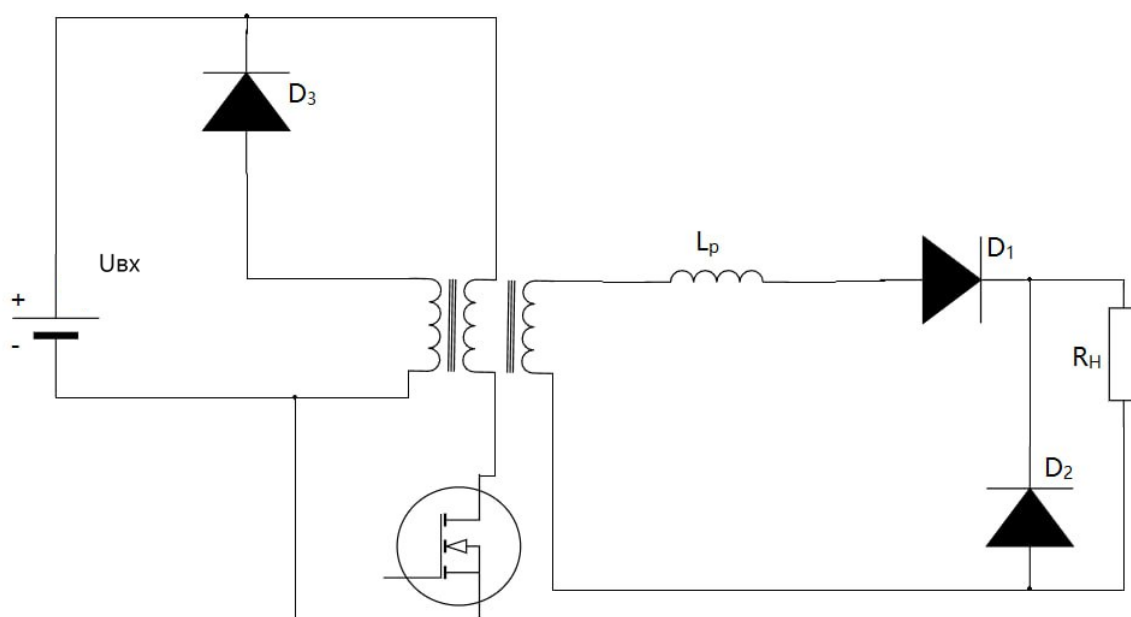


Рис. 4. Схема, у якій потужність передається через трансформатор

Під час другої половини періоду струм навантаження протікає через діод  $D_2$ . У цей час трансформатор перемагнічується через діод  $D_3$ . Перетворювачі цього типу, в яких енергія спочатку не накопичується в індуктивності намагнічування трансформатора перед тим, як її передати в навантаження, звуться прямоходовими Перетворювачі, в яких енергія спочатку накопичується належать до класу зворотногоходових. До транзистора схеми, рис.4, прикладається подвійна вхідна напруга, коли він закритий, тому тут втрати енергії більше, ніж у схемі на рис. 3. Крім того, паразитна індуктивність між МОП-транзистором і діодом тут велика, що призводить до зростання втрат. Ці ефекти обмежують частоту комутації схеми, рис. 4, значенням 500 кГц. З цього погляду резонансні перетворювачі є кращими ніж ті, що розглянуто. У цих перетворювачах LC-резонансні контури другого порядку обмежують швидкості зростання напруги і струму ключа. Паразитні параметри таких схем є часткою елементів резонансного контуру, а при достатньо високій частоті резонансні контури цілком виконуються на цих елементах. На рис. 5 показано принцип побудови таких перетворювачів.

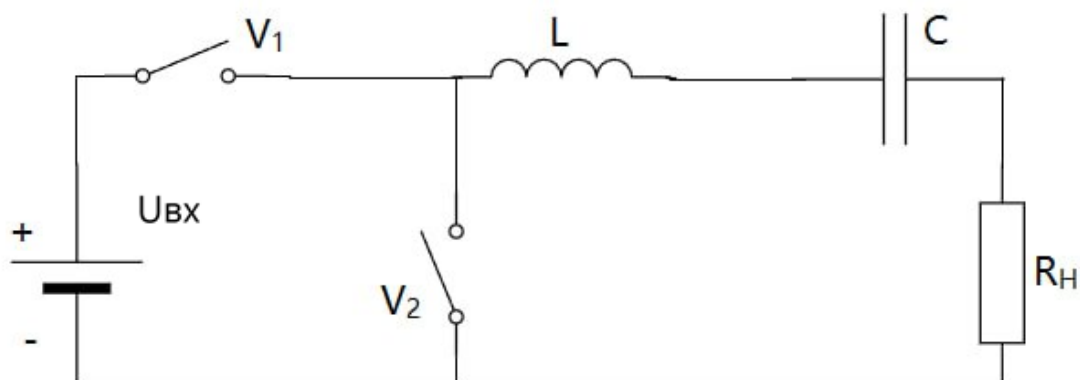


Рис. 5. Резонансний перетворювач

За допомогою ключа  $V_1$  формується прямокутна напруга на послідовному LCR ланцюгу. Якщо частота комутації дорівнює резонансній частоті контура, а його добротність досить велика, то основна складова прямокутної напруги повністю з'являється на  $R_n$ , а змінна складова виділяється на індуктивності. Потужність, що передається через резонансний перетворювач, може бути керованою змінною частоти комутації. Але при відхиленні від резонансної частоти потужність, що передається, зменшується. Друге рішення можливе на основі повної мостової схеми, яка забезпечує регулювання потужності, що передається за рахунок зміни коефіцієнта заповнення при постійній частоті. Таким чином, можна констатувати, що сучасні системи регулювання потужності розвиваються на основі двох методів: регулювання коефіцієнта заповнення (широкоімпульсне регулювання) і метод на основі резонанса. При широкоімпульсному регулюванні відбувається періодично переривиста передача потужності від джерела до навантаження з регулюванням цього процесу за рахунок зміни коефіцієнта заповнення. У випадку резонансного методу передача потужності відбувається при синусоїдальній формі струму і напруги й тут силові ключі перемикаються при нульовому струмі. У порівнянні з широкоімпульсними перетворювачами в резонансних схемах менше втрати на перемикання. Завдяки простоті схеми, легкості керування, метод широкоімпульсної модуляції є основним у схемах силової електроніки малої та середньої потужності, які широко представлені в системах силової електроніки бортових систем електроживлення. Перетворювачі, як правило, працюють, з частотою перемикання 30-50 кГц. У цьому інтервалі частот досягається оптимальне співвідношення між масою, габаритами, к.к.д, надійністю і т. ін. Проте в цьому частотному діапазоні загострюються проблеми впливу пульсацій джерела живлення на енергодинамічні показники замкненої системи регулювання, часткою якої вони є. Треба зазначити, що і у перетворювачах із широкоімпульсним регулюванням можна застосувати принцип резонансного перемикання шляхом заміни силового ключа на резонансний. Таким чином можна отримати схеми квазірезонансних перетворювачів з перемиканням при нульовому струмі або при нульовій напрузі, які знайшли застосування в системах електроживлення бортових електронних систем. Цей клас перетворювачів досконально описано та проаналізовано в [6].

**Структурна побудова систем живлення бортового електро навантаження.** Складність побудови системи розподіленого електроживлення на борту рухомого об'єкта залежить від його призначення. Найбільш складна побудова такої системи на літальних апаратах – літаках, вертольотах. На їхньому борту реалізується автоматизоване керування з метою підтримки оптимальних показників роботи авіадвигуна з мінімальними втратами палива – система FADEC. Така система виконує моніторинг нештатних ситуацій, контроль параметрів авіадвигуна та їх індикацію [9]. Поточна інформація надходить до бортового комп'ютера, який видає відповідні команди виконуючим органам, складовою частиною яких є електропривід на основі безколекторних двигунів постійного струму синхронних або лінійних та крокових електродвигунів. При цьому виникає потреба в джерелах живлення з різними показниками потужності та вихідної напруги – постійної або змінної. Такі джерела живлення у своєму складі мають різноманітні перетворювачі, про які сказано вище. Як приклад покажемо специфіку електронавантаження квадрокоптера та його структурну схему рис. 6.

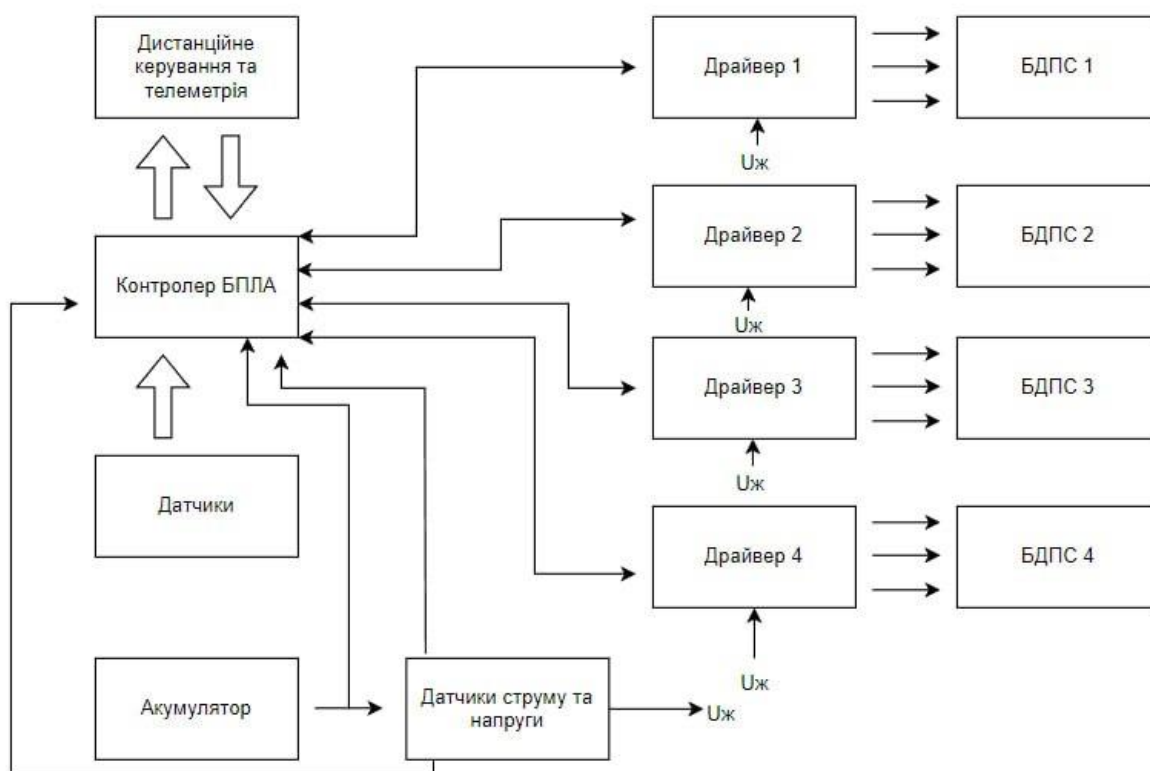


Рис. 6. Структурна схема живлення навантажень квадрокоптера

У порівнянні із системами керування та навігації літака чи вертольота аналогічна система квадрокоптера [10] проста, що потребує порівняно простих рішень по забезпеченню електроживлення її окремих складових. На борту квадрокоптера мається 4 безколекторних двигуна постійного струму (БДПС1-БДПС4), комутатори яких живляться від бортового акумулятора з вихідною напругою 12 В. Для живлення інформаційних блоків використовуються перетворювачі постійної напруги на постійну. На борту літака чи вертольота також багато перетворювачів такого класу, які перетворюють постійну напругу одного рівня в її менше чи більше значення, зі стабілізацію та фільтрацію пульсацій. Ці перетворення відбуваються за структурними схемами рис. 7, 8.

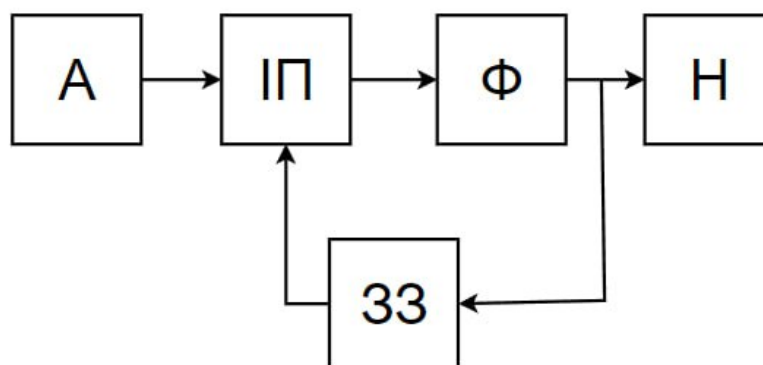


Рис. 7. Перетворювач постійної напруги на постійну

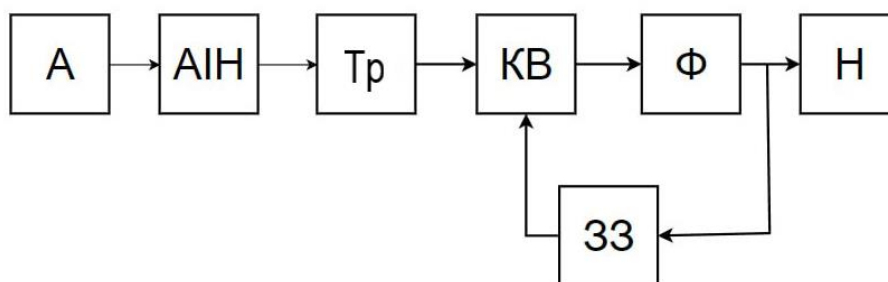


Рис. 8. Перетворювач постійної напруги на постійну з інвертором

На рис.7, 8: А – акумулятор, Тр – трансформатор, Іп – Імпульсний перетворювач постійної напруги на постійну напругу іншого рівня, Ф – фільтр, Н – навантаження, АІН – автономний інвертор напруги, КВ – керований випрямляч. За схемою (рис. 8), відбувається перетворення напруги меншого рівня на її більше значення. На борту літака чи вертольота мається багато електродвигунів різного призначення, живлення яких відбувається за відповідними структурними схемами. Запуск газотурбінного двигуна вертольота відбувається за структурною схемою рис. 9, де Др – драйвер, ДШ – датчик швидкості.

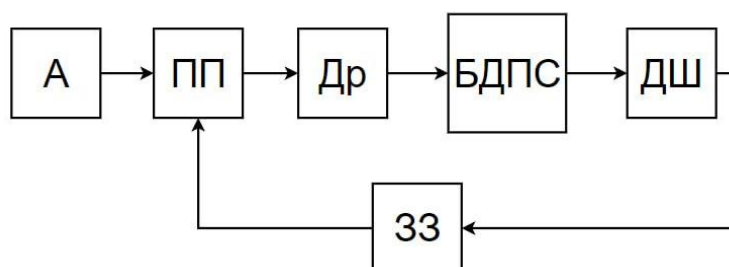


Рис. 9. Схема запуску газотурбінного двигуна вертольота

На борту літальних апаратів найбільше навантаження на бортову живлячу мережу складає електродвигун для запуску газотурбінного двигуна. Крім цього, там застосовують багато електроприводів в системах виконуючих механізмів різноманітного призначення для стабілізації швидкості обертання та керування лінійними переміщеннями робочих органів відповідних пристроїв. Для стабілізації швидкості обертання з вимогами підтримки її високої точності, структурну побудову електропривода показано на рис. 10.

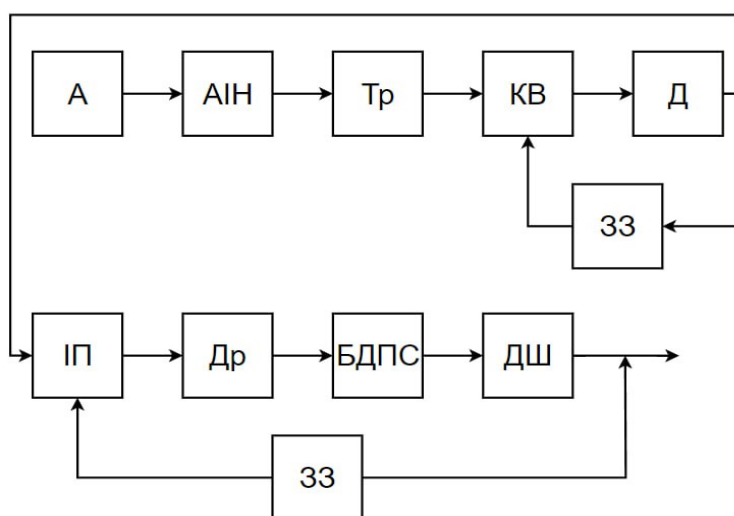


Рис. 10. Структурна схема побудови системи точного електропривода



На рис. 10 для досягнення високої точності обертання напруга живлення, що подається на вхід регульованого імпульсного перетворювача ПІ, стабілізується. Це зменшує вплив пульсацій керованого випрямляча на точність стабілізації швидкості. Стабілізація швидкості відбувається за рахунок зворотного зв'язку за швидкістю у другому силовому контурі регулювання.

Отже, у на рис. 10 є два силових контури стабілізації. Перший стабілізує напругу живлення, а другий – швидкість. За такою ж структурній схемі будують бортові електроприводи для реалізації точних лінійних переміщень для синхронізації швидкості обертання виконуючих органів на основі синхронних двигунів. Для цього застосовують структурну схему (рис. 11).

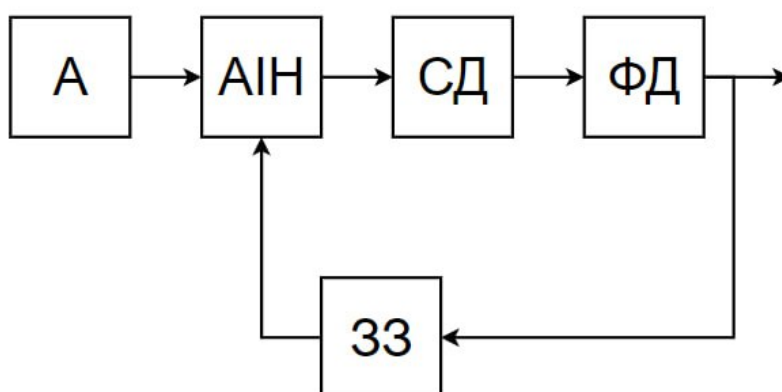


Рис. 11. Структурна схема електроприводів виконуючих органів на основі синхронних двигунів:

СД – синхронний двигун, ФД – фазовий дискримінатор

У цій схемі за фазовим відхиленням положення синхронного двигуна регулюється вихідна частота автономного інвертора напруги.

**Розрахунок пульсації на виході перетворювачів систем силової електроніки.** Як видно з наведених структурних схем, у процесі перетворення електроенергії на виході перетворювачів формуються дискретні процеси, які описуються неаналітичними функціями. У мережах із несінусоїдальними формами процесів виникає питання, як розрахувати їхні параметри, у тому числі й найважливіший з них – рівень пульсацій. Наявні методики, що вирішують це питання, передбачають розрахунок коефіцієнта пульсації за основною гармонікою, яка в ряді Фур'є за тригонометричними функціями має найбільшу вагу в порівнянні з іншими членами ряду. Проте для вирішення цього питання ряд Фур'є за тригонометричними аналітичними функціями не є найкращим базисом для апроксимації неаналітичних функцій, що формують перетворювачі. Аналітичні функції, як відомо, мають безліч похідних. Перетворення Фур'є при аналітичному базисі аналізує неаналітичний сигнал, що є причиною ефекта Гіббса [11]. Наслідком цього є велика локальна помилка при апроксимації функції з розривами першого роду. Саме такі функції комутують силові перетворювачі електроенергії: випрямлячі, автономні інвертори, імпульсні перетворювачі.

Рівень та характер пульсації вихідного параметра перетворювача необхідно оцінювати як різницю між його найбільшим і найменшим значенням від піку до піку. Щоб отримати результати таких оцінок розрахунок рівня пульсацій на виході перетворювачів треба проводити дискретними методами. Найбільш ефективним з них є дискретне перетворення Лапласа або Z-перетворення [12]. Для оцінки рівня пульсацій на виході пере-

творювача необхідно провести аналіз перехідного процесу в дискретній системі перетворювач – фільтр – навантаження. У такій системі формуючим елементом буде виступати власне перетворювач, передаточна функція якого є зображення за Лапласом форми напруги, яку він формує. Аналіз такої дискретної системи дозволяє отримати значення пульсації вихідного параметра перетворювача від “піку до піку” в аналітичній формі. Отриманий результат відображає залежність рівня пульсацій від частоти перемикавання, параметрів фільтра на виході перетворювача та його топології.

**Висновки.** Аналіз шляхів зменшення впливу пульсацій перетворювачів на енергодинамічні показники бортових систем силової електроніки показав, що існують два шляхи вирішення цієї проблеми. Перший пов'язаний з підвищенням частоти перемикавання на основі напівпровідникових приладів з мінімальними значеннями паразитних параметрів – це шлях удосконалення технології їх виробництва. Для спеціалістів, які лише користуються такими приладами в процесі проектування та виробництва систем силової електроніки, існує шлях зменшення впливу пульсацій на їх енергодинамічні показники за рахунок пасивних та активних фільтрів, а також за рахунок побудови таких структурних схем систем силової електроніки, в яких реалізуються закони керування, що забезпечують мінімальний вплив пульсацій на енергетику і динаміку систем живлення. Оцінки рівня пульсацій за основною гармонікою, що використовуються найбільш часто, не є достатньою. Оцінки рівня пульсацій необхідно проводити від піку до піку значення параметра перехідного процесу на основі дискретного  $Z$ -перетворення Лапласа.

#### Список використаних джерел

1. Moir, L. *Military Avionics Systems* / L. Moir, A. Seabridge. – John Wiley Sons, 2006. – 520 p.
2. Abu-Rub, H. *Power Electronics for More Electric Aircraft* / H. Abu-Rub, M. Malinowski, K. Al-Haddad // *Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications*, IEEE. – 2014. – P. 365-386. DOI: 10.1002/9781118755525.ch12.
3. *Electrification of Aircraft Systems. Part I: Power Generation and Distribution, Electrical Networks and Architectures* / P. Thalin, R. Rajamani, J.-C. Maré, S. Taubert // *Fundamentals of Electric Aircraft*. – Revised Edition. – SAE. – 2023. – P. 26-53.
4. Basso, C. *Designing Control Loops for Linear and Switching Power Supplies Power Supplies : A Tutorial Guide* / C. Basso. – Artech, 2012.
5. Perez, R. J. *Subsystem EMC for Aircraft* / R. J. Perez // *Handbook of Aerospace Electromagnetic Compatibility*, IEEE. – 2019. – P. 483-535. DOI: 10.1002/9781119082880.ch9.
6. Buticchi, G. *DC-DC Converter and On-board DC Microgrid Stability* / G. Buticchi, J. Yang // *Transportation Electrification: Breakthroughs in Electrified Vehicles, Aircraft, Rolling Stock, and Watercraft*, IEEE. – 2023. – P.189-208. DOI: 10.1002/9781119812357.ch8.
7. Акинин К. П. Структурная минимизация электроприводов малой мощности на основе бесконтактных двигателей с постоянными магнитами / К. П. Акинин. – Киев : ИЭД НАНУ, 2020. – 342 с.
8. Schmidt, R. *More Electrical Actuation for ATA 32: Modular Power Electronics & Electrical Motor Concepts (2010-01-1745)* / R. Schmidt // *Advances in Aircraft Landing Gear*. – SAE, 2015. – Pp. 109-114.
9. Jing, C. *Accuracy analysis of a single-fault Markov model for FADEC system* / C. Jing, H. Wei, C. Kunye // *Journal of Systems Engineering and Electronics*. – 2019. – Vol. 30, №. 5. – Pp. 1044-1052. DOI: 10.21629/JSEE.2019.05.20.
10. Денисов, Ю. О. Системи регулювання роботизованих комплексів / Ю. О. Денисов, В. П. Войтенко, А. С. Ревко. – Івано-Франківськ : НАІР, 2021. – 125 с.
11. Rafique, H. *Simulation of Harmonic Analysis, Synthesis and Gibbs Effect of Periodic Signals* / H. Rafique // *2019 16th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*. – Istanbul, 2019. – P. 282-287. DOI: 10.1109/SSD.2019.8893281.
12. Lago, G. V. *Additions to z-transformation theory* / G. V. Lago // *Electrical Engineering*. –1955. – Vol. 74, № 2, Feb. – P. 138-138. DOI: 10.1109/EE.1955.6439785.

### References

1. Moir, L., Seabridge, A. (2006). *Military Avionics Systems*. John Wiley Sons, Ltd.
2. Abu-Rub, H., Malinowski, M., Al-Haddad, K. (2014). Power Electronics for More Electric Aircraft. *Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications*, IEEE (pp. 365-386). doi: 10.1002/9781118755525.ch12.
3. Thalin, P.; Rajamani, R.; Maré, J.-C., Taubert, S. (2023). Electrification of Aircraft Systems—Part I: Power Generation and Distribution, Electrical Networks and Architectures. *Fundamentals of Electric Aircraft: Revised Edition*, SAE (pp.26-53).
4. Basso, C. (2012). *Designing Control Loops for Linear and Switching Power Supplies Power Supplies: A Tutorial Guide*, Artech.
5. Perez, R.J. (2019). Subsystem EMC for Aircraft. *Handbook of Aerospace Electromagnetic Compatibility*, IEEE (pp. 483-535). doi: 10.1002/9781119082880.ch9.
6. Buticchi, G., Jiajun, Y. (2023). DC–DC Converter and On-board DC Microgrid Stability. *Transportation Electrification: Breakthroughs in Electrified Vehicles, Aircraft, Rolling Stock, and Watercraft*, IEEE (pp.189-208). doi: 10.1002/9781119812357.ch8.
7. Akinin, K P. (2020). *Struktornaia minimizatsiia elektroprivodov maloi moshchnosti na osnove beskontaknykh dvigatelei s postoiannymi magnitami [Structural minimization of low-power electric drives based on contactless motors with permanent magnets]*. IJeD NANU.
8. Schmidt, R. (2015). More Electrical Actuation for ATA 32: Modular Power Electronics & Electrical Motor Concepts (2010-01-1745). *Advances in Aircraft Landing Gear*, SAE (pp. 109-114).
9. Jing, C., Wei H., Kunye, C. (2019). Accuracy analysis of a single-fault Markov model for FADEC system. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 30(5), 1044-1052. doi: 10.21629/JSEE.2019.05.20.
10. Denysov, Yu. O., Voitenko, V. P., Revko, A. S. (2021). *Systemy rehuliuвання robotyzovanykh kompleksiv [Regulation systems of robotic complexes]*. NAIR.
11. Rafique, H. (2019). Simulation of Harmonic Analysis, Synthesis and Gibbs Effect of Periodic Signals. *2019 16th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)* (pp. 282-287). Istanbul, Turkey. doi: 10.1109/SSD.2019.8893281.
12. Lago, G.V. (1955). Additions to z-transformation theory. *Electrical Engineering*, 74(2), 138-138. doi: 10.1109/EE.1955.6439785.

Отримано 24.11.2023

UDC 629.374.7

**Yuri Denisov<sup>1</sup>, Vitalii Skuharev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the “Electronics, automation, robotics and mechatronics” Department Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)  
**E-mail:** den711td@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-2293-7964>.  
**ResearcherID:** [G-1144-2016](https://orcid.org/0000-0003-2293-7964). **Scopus Author ID:** [56338219200](https://orcid.org/0000-0003-2293-7964)

<sup>2</sup>PhD Student of the “Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies” Department Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)  
**E-mail:** v.skugarev88@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-2538-6997>. **ResearcherID:** [JOK-0150-2023](https://orcid.org/0009-0008-2538-6997)

### **THE WAYS REDUCED THE INFLUENCE OF PULSATIONS REVERSING THE INDICATORS OF ENERGY DYNAMIC ENERGY EFFICIENCY OF ON-BOARD POWER ELECTRONICS SYSTEMS**

*The role of power electronics systems in ensuring reliable and easy operation of on-board avionics and gas turbine engine starting devices is crucial. Their feature is that they are powered by sources of limited power, which raises the problem of economical use of their energy resource. Achieving this goal is possible based on the implementation of high-quality management modes of energy processes occurring in on-board power electronics systems. The discrete nature of these processes gives rise to pulsations of adjustable parameters, which significantly affect the energy-dynamic indicators of power electronics systems. Therefore, the problem of reducing the impact of pulsations on the quality of energy and the dynamics of such systems is urgent. Formulation of the problem. It is proposed to improve the quality of power modes of on-board aviation power electronics systems based on the analysis of means of reducing the influence of pulsations on the quality of power mode management processes.*

*In known works devoted to the given problem, insufficient attention is paid to taking into account the impact of pulsations on the quality of processes of regulated power electronics systems on board aircraft and methods of reducing this impact. Autonomous voltage inverters (AVI), controllable generators, and various impulse DC voltage converters are widely used on board aircraft. As a rule, they are elements of the corresponding closed self-regulation systems. During their development, the following issues must be resolved: circuitry of the power part of the converter, control systems, reduction of the influence of pulsations on power losses and the quality of processes in feedback loops, minimization of electromagnetic interference, selection of high-quality active and passive elements. In the process of solving these issues, the influence of the switching frequency of converters and parasitic parameters of power devices on power losses in power electronics systems was analyzed. Recommendations are provided for the selection of energy storage elements and power semiconductor devices to ensure minimum pulsations. A comparative analysis of the topologies of various schemes of power electronics systems used in the distributed power supply systems of aircraft was carried out according to the criterion of the minimal influence of pulsations on energy-dynamic indicators. Ways to solve the problem of controlling converters at high frequencies in closed systems are shown, namely, minimization of the influence of power source pulsations on the reference task of the controller of the corresponding office. The result of this influence may be the exit of the controller from the controllable zone. It is not typical for regulators that are made on the basis of microcircuits with a low supply voltage. The effectiveness of discrete analysis methods for evaluating the influence of pulsations on the energy-dynamic indicators of on-board power electronics systems is shown.*

*Conclusions. An analysis of ways to reduce the influence of converter pulsations on the energy-dynamic indicators of on-board power electronics systems showed that there are two ways to solve this problem. The first, related to increasing the switching frequency on the basis of semiconductor devices with minimum values of parasitic parameters, is a way of improving the technology of their production. For specialists who only use such devices in the process of designing and manufacturing power electronics systems, there is a way to reduce the impact of pulsations on their energy-dynamic indicators through passive and active filters, as well as through the construction of structural diagrams of power electronics systems in which control laws are implemented, which ensure minimal impact of pulsations on the energy and dynamics of power supply systems. Estimation of the level of pulsations by the fundamental harmonic, which is used most often, is not sufficient. It is necessary to estimate the level of ripples from peak to peak of the value of the transient process parameter based on the discrete Z-transformation method.*

**Key words:** pulse conversion; energy supply systems; re-regulation; energy efficiency; electric drive system.

*Fig.: 11. References: 12.*

**Анатолій Приступа<sup>1</sup>, Анатолій Ревко<sup>2</sup>, Вікторія Маргасова<sup>3</sup>, Катерина Новик<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент,  
завідувач кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
**E-mail:** [anatoliy.prystupa@stu.cn.ua](mailto:anatoliy.prystupa@stu.cn.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9412-2698>  
**ResearcherID:** [F-5507-2014](https://orcid.org/0000-0001-9412-2698). **Scopus Author ID:** [57190807222](https://orcid.org/0000-0001-9412-2698)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
**E-mail:** [asrmeister@gmail.com](mailto:asrmeister@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6818-2961>  
**ResearcherID:** [ABA-7094-2021](https://orcid.org/0000-0001-6818-2961). **Scopus Author ID:** [57188714850](https://orcid.org/0000-0001-6818-2961)

<sup>3</sup>доктор економічних наук, професор, проректор з наукової роботи  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
**E-mail:** [viktoriyamargasova@gmail.com](mailto:viktoriyamargasova@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8582-2158>  
**ResearcherID:** [D-3198-2015](https://orcid.org/0000-0001-8582-2158). **Scopus Author ID:** [57202906268](https://orcid.org/0000-0001-8582-2158)

<sup>4</sup>аспірантка кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
**E-mail:** [ekaterinanovik965@gmail.com](mailto:ekaterinanovik965@gmail.com). **Scopus Author ID:** [57848921200](https://orcid.org/0000-0001-8582-2158)

## СИСТЕМА ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАНЦІЇ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

У роботі представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень авторів у вивченні особливостей створення системи енергозабезпечення станції, отриманих при виконанні НДП «THEOREMS-Dnipro. Transboundary Hydrometeorological and Environmental Monitoring System of Dnipro river», «Прикладна розробка організаційно-економічного механізму забезпечення екологічної безпеки водних ресурсів шляхом автоматизованого моніторингу», «Мультиагентна система захисту об'єктів критичної інфраструктури на основі рою мультикоптерних дронів».

На сьогоднішній день велика кількість публікацій пов'язана з підвищенням точності засобів вимірювальної техніки станцій спостереження, вдосконалення алгоритмів обробки та передачі інформації, а системам енергозабезпечення приділяється недостатня увага.

Проте точність і достовірність вимірної інформації, надійність роботи станції спостереження значною мірою буде залежати від якості джерела живлення обладнання станції. У світлі останніх подій, пов'язаних із воєнною агресією Російської Федерації, станції гідрометеорологічних спостережень можуть бути доповнені системами відеоспостереження та стати важливим елементом у системі забезпечення охорони певних територій. Ще більшої функціональності вони можуть набути, якщо будуть використовуватись як станції підзарядки дронів різних типів. Таке розширення функціоналу станцій не можливе без якісної системи енергозабезпечення.

У статті представлено огляд основних структурних схем станцій гідрометеорологічних спостережень. Розглянуто особливості використання кожної структурної схеми. Обґрунтовано необхідність впровадження системи моніторингу електричних та неелектричних параметрів блока живлення автономної та комбінованої станції спостережень. Наведено розрахунок зміни енергії акумуляторної батареї, на основі якого можна вибрати номінальну ємність акумуляторної батареї, необхідну для надійної та безперебійної роботи станції.

**Ключові слова:** система енергозабезпечення, блок живлення, акумуляторна батарея; структурна схема; моделювання.

Рис.: 4. Бібл.: 38.

**Актуальність дослідження.** Нині виникає дедалі більше завдань, які потребують постійного моніторингу певних параметрів. Зокрема це стосується моніторингу параметрів навколишнього середовища, контролю за станом водних об'єктів, радіаційного контролю, а також вирішення охоронних задач автоматизованого спостереження за певною територією. Розвиток сучасних технологій дає змогу використовувати на станціях моніторингу різноманітне вимірювальне обладнання, засоби відеоспостереження та зв'язку, інтелектуальні пристрої обробки та зберігання інформації. Ефективність роботи станції моніторингу значною мірою залежить від надійності системи енергозабезпечення станції. Тому вдосконалення підходів щодо проектування системи енергозабезпечення станції є актуальним завданням.

**Постановка проблеми.** Питанням автоматизованого моніторингу гідрологічних, метеорологічних та екологічних параметрів останнім часом приділяється дедалі більше уваги як з боку вітчизняних, так і закордонних учених [1-13]. Розвиток відновлювальних джерел енергії та напівпровідникових перетворювачів для її розподілу між споживачами в межах станції моніторингу дозволяє робити такі станції мобільними [2; 4; 6] або розміщувати у важкодоступних місцях [3; 5; 8].

Проте відсутність обґрунтованих критеріїв вибору параметрів елементів системи енергозабезпечення, насамперед встановленої потужності відновлювальних джерел енергії та ємності акумуляторних батарей, вносить значну надлишковість у станції спостережень, збільшуючи їхні габаритні розміри та вагу, що не завжди є допустимим. Обрання занижених значень потужності первинних перетворювачів енергії та ємності акумуляторних батарей призводить до відключення станції через дефіцит енергії в затяжні серії несприятливих погодних умов. Тому розробка прозорих підходів щодо проєктування системи енергозабезпечення станцій гідрометеорологічних спостережень є У задачею.

У цій роботі представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень авторів у вивченні особливостей створення системи енергозабезпечення станції, отриманих при виконанні НДР “THEOREMS-Dnipro. Transboundary Hydrometeorological and Environmental Monitoring System of Dnipro river”, “Прикладна розробка організаційно-економічного механізму забезпечення екологічної безпеки водних ресурсів шляхом автоматизованого моніторингу”, “Мультиагентна система захисту об'єктів критичної інфраструктури на основі рою мультикоптерних дронів”.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні велика кількість публікацій пов'язана з підвищенням точності засобів вимірювальної техніки станцій спостереження [14-15], вдосконаленню алгоритмів обробки [16-17] та передачі інформації [18-20]. Проте системам енергозабезпечення приділяється недостатня увага. У [25] представлено обґрунтування вибору потужності фотоелектричних перетворювачів для станцій моніторингу.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Точність і достовірність вимірної інформації, надійність роботи станції спостереження в значній мірі буде залежати від якості джерела живлення обладнання станції. У світлі останніх подій, пов'язаних із військовою агресією російської федерації, станції гідрометеорологічних спостережень можуть бути доповнені системами відеоспостереження та стати важливим елементом в системі забезпечення охорони певних територій. Ще більшої функціональності вони можуть набути, якщо будуть використовуватись в якості станцій підзарядки дронів різних типів. Таке розширення функціоналу станцій не можливе без якісної системи енергозабезпечення, в тому числі модулю акумуляування енергії.

Мета дослідження полягає у аналізі типових структурних схем станцій гідрометеорологічних спостережень, дослідженню режимів роботи обладнання станцій та їх впливу на систему енергозабезпечення.

**Виклад основного матеріалу.** За типом електроживлення станції гідрометеорологічних спостережень можна підрозділити на три категорії:

*Станції з мережевим живленням.*

Мережеве живлення зазвичай використовується для стаціонарних пристроїв, що споживають значну потужність. Такі станції рідко переносяться з місця на місце і повністю залежать від стану електромережі (рис. 1). З іншого боку, подібні структури, зазвичай при нормальній ситуації, не мають обмежень з точки зору необхідної потужності, частота оновлення вимірних даних буде обмежуватись швидкістю датчиків, так само відсутні обмеження щодо кількості датчиків та їх взаємного віддаленого розміщення в

рамках однієї станції [21]. Дуже часто поряд з вимірювальним обладнанням на таких станціях розміщують додаткове обладнання, яке використовується для забезпечення допоміжних процесів. Суттєвим недоліком станцій з мережевим живленням є відмова у функціонуванні при знеструмленні внаслідок пошкоджень чи ненормальних режимів стаціонарної електричної мережі. Тому для найбільш відповідальних станцій під час проектування системи електропостачання передбачають 2 незалежних джерела, що в переважній більшості випадків забезпечує безперебійність енергозабезпечення станції. Однак, як показує досвід останніх подій, навіть такий підхід не дозволяє гарантувати енергозабезпечення станції при масовому руйнуванні електроенергетичних об'єктів та значному дефіцитові активної потужності в енергосистемі.

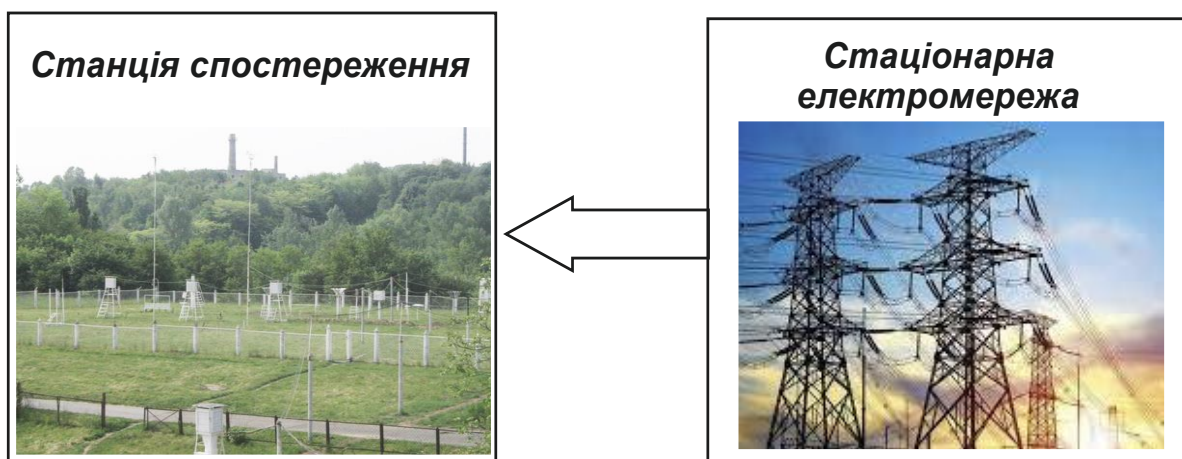


Рис. 1. Структурна схема станції спостереження з мережевим живленням [22]

*Станція з автономним живленням.*

Станції з автономним живленням зазвичай живляться від акумуляторних батарей. Також автономними джерелами живлення можуть виступати так звані альтернативні відновлювальні джерела енергії: вітрогенератори, сонячні батареї, міні гідроелектростанції та багато інших джерел енергії. (рис. 2). У цій структурі функціонування обладнання станції не залежить від стану стаціонарної енергосистеми, зокрема її нестійкої роботи або обмеження потужності при сильних зовнішніх збуреннях природного, техногенного або військового походження. З іншого боку, потужність системи енергозабезпечення станції повністю залежить від природних факторів: швидкості вітру, інтенсивності сонячного випромінювання тощо та рівня заряду акумуляторної батареї. Отже, для забезпечення надійної безперебійної роботи в подібних структурах необхідно обмежувати кількість вимірювальних датчиків та/або зменшувати кількість вимірювань та/або використовувати завищені параметри первинних перетворювачів енергії та ємності акумуляторної батареї.

Водночас використання структур з автономним живленням дозволяє виконувати такі станції мобільними – забезпечувати моніторинг визначених параметрів на певній території, вздовж визначеної траєкторії, що в певних ситуаціях дозволяє визначити реальну швидкість зміни контрольованого параметру та, при виникненні загрози екологічної катастрофи, попередити можливі наслідки завчасно.

Останнім часом дедалі більш популярним стало використання декількох різних типів відновлювальних джерел, наприклад сонячні панелі та вітрогенератор, разом для більшої енергонезалежності та зменшення залежності від затяжних періодів несприятливих погодних умов: тривалі серії похмурих днів, що характерні пізній осені в Україні та/або безвітряні серії, коли декілька днів поспіль швидкість вітру не перевищує 5 м/с.

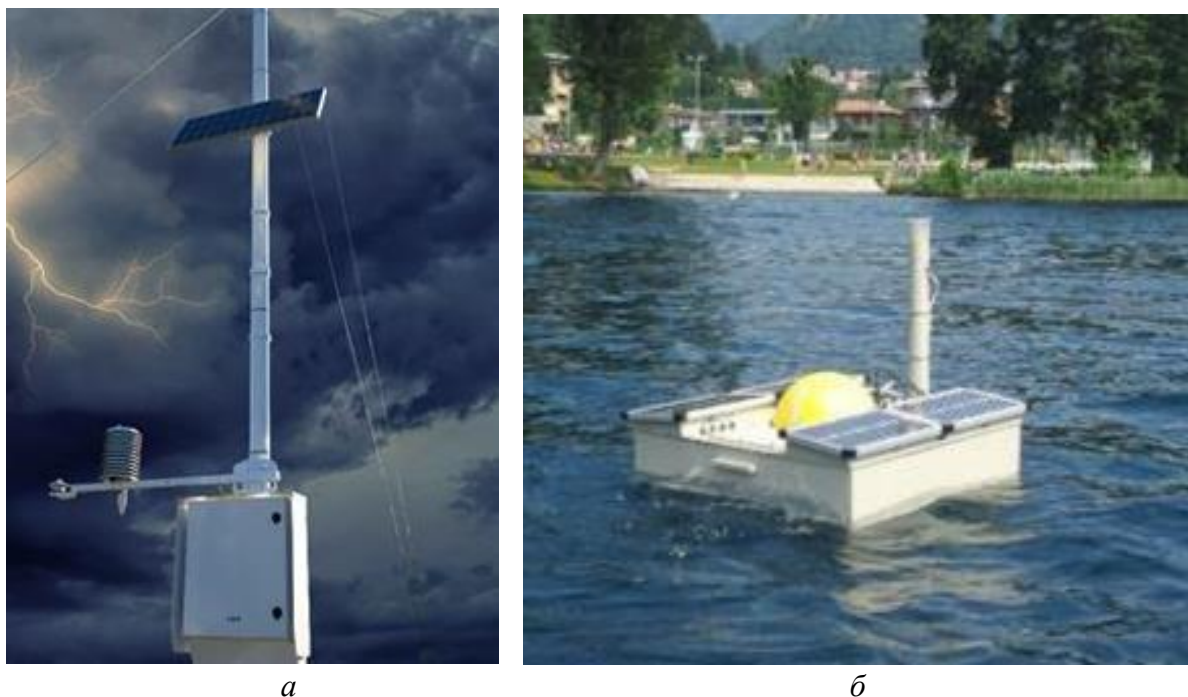


Рис. 2. Приклади реалізації станції спостереження з автономним живленням:  
а – стаціонарна [23], б – мобільна [24]

#### Станції з комбінованим живленням.

Комбіноване живлення є найбільш зручним у використанні. Воно передбачає можливість живлення як від батарей, так і від стаціонарної електричної мережі змінного струму (рис. 3). Для збільшення надійності та енергонезалежності станції з комбінованим живленням можуть доповнюватись відновлювальними джерелами, які будуть віддавати енергію в енергосистему при нормальному режимі її роботи та забезпечувати енергозабезпечення станції при аварійних режимах в енергосистемі. Крім того, за потреби, коли енергосистема має суттєві пошкодження, що ми наглядно спостерігаємо в теперішній час активної фази російської військової агресії, енергія з таких станцій може бути спрямована для забезпечення електроживлення критично важливих об'єктів поза межами станції спостереження [21].

Для розподілу енергії між споживачами станції використовується окремий блок живлення. Розвиток компонентів силової електроніки дозволяє реалізувати його на основі напівпровідникових перетворювачів. Це дає змогу суттєво зменшити габаритні розміри та вагу блоку живлення, підвищити гнучкість управління та зменшити власне електроспоживання блоку живлення на процес формування необхідних рівнів напруг та струмів [25].

Різноманіття вимірювального та допоміжного обладнання ставить перед блоком живлення задачу забезпечення різних рівнів напруг для забезпечення стабільної роботи цього обладнання та отримання результатів спостережень відповідно до вимог як національних, так і міжнародних нормативних документів [26-33].



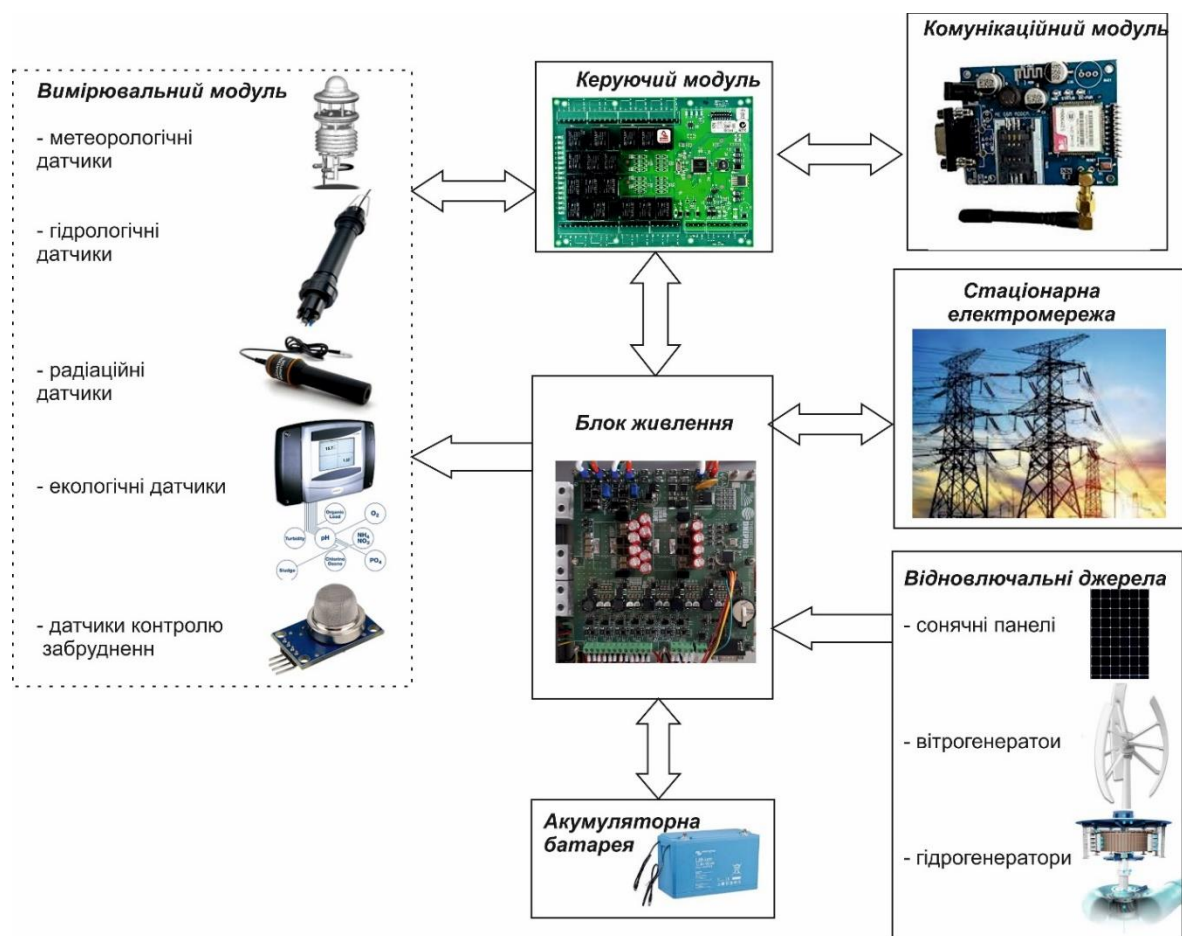


Рис. 3. Структурна схема станцій спостереження з комбінованим живленням

При роботі станцій спостереження з автономним або комбінованим живленням доцільно передбачити можливість управління живленням окремих споживачів у межах станції, щоб змінювати частоту вимірювань в залежності від запасів енергії в акумуляторах [34]. Для цього блок живлення потрібно виконати багатоканальним, забезпечивши можливість управління кожним каналом окремо.

Для того управління вихідними каналами в системі енергозабезпечення необхідно передбачити модуль управління та розгалужену систему моніторингу як електричних параметрів (струмів, напруг, ємності, опору), так і неелектричних (температури, відносної вологості, інтенсивності світла тощо).

Моніторинг струму в кожному електричному колі та напруги в контрольних точках дозволяють мати інформацію щодо реальних потужностей: споживання кожного каналу блоку живлення, генерації електроенергії від відновлювальних джерел; заряду-розряду акумуляторної батареї. Контроль поточного стану заряду акумуляторної батареї (її ємність) може бути використано для динамічного управління режимом роботи станції, дозволить уникати режимів глибокого розряду та перезаряду, що своєю чергою продовжить строк служби акумуляторів. Контроль опору вхідних/вихідних каналів дозволить контролювати цілісність електричних кіл, якість місць з'єднань. Збільшення опору може бути сигналом для оперативного обслуговування блоку живлення: очищення контактів, перевірки надійності підключення окремих модулів, тощо, що дозволить уникнути серйозним аваріям та тривалому виводу станції з роботи.

Надійність роботи електронного обладнання та акумуляторів значною мірою залежить від робочої температури даних пристроїв. На температуру пристрою буде впливати як температура навколишнього середовища, так і додатковий нагрів внаслідок протікання електричного струму. Для того щоб не допускати зниження надійності внаслідок перегріву в межах корпусу блока живлення, доцільно передбачити контроль температури та виконавчі механізми, що сприятимуть охолодженню: вентилятори у випадку повітряного охолодження та насоси при рідинному охолодженні. Також вентилятори у поєднанні з нагрівачами можуть використовуватись при підвищенні вологості всередині корпусу блока живлення. Підвищена вологість негативно впливає на провідники, підвищуючи ризик їх корозії, та зменшує діелектричну міцність ізоляції, підвищуючи ймовірність електричного пробоя.

Окремої уваги потребує контроль температури акумуляторів [35]. Практично всі типи акумуляторів забезпечують найбільшу ефективність перетворення енергії в діапазоні температур  $+10...+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  як зниження температури нижче  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , так і підвищення вище  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  негативно відображається на ємності акумулятора, знижуючи при цьому його ресурс. Тому питанню підтримання температури акумулятора у вищезазначених межах варто приділити значну увагу. Для зменшення впливу інших елементів блоку живлення акумулятори варто конструктивно розмістити в окремому блоці, забезпечивши термоізоляцію. Для нагрівання/охолодження доцільним вбачається використання елементів Пельтьє.

Для підключення/відключення споживачів станції спостереження модуль управління в залежності від поточного заряду акумуляторної батареї та даних системи моніторингу параметрів блоку живлення направляє відповідні керуючі сигнали на вихідні каскади напівпровідникового перетворювача.

Структурна схема блоку живлення представлена на рис. 4.

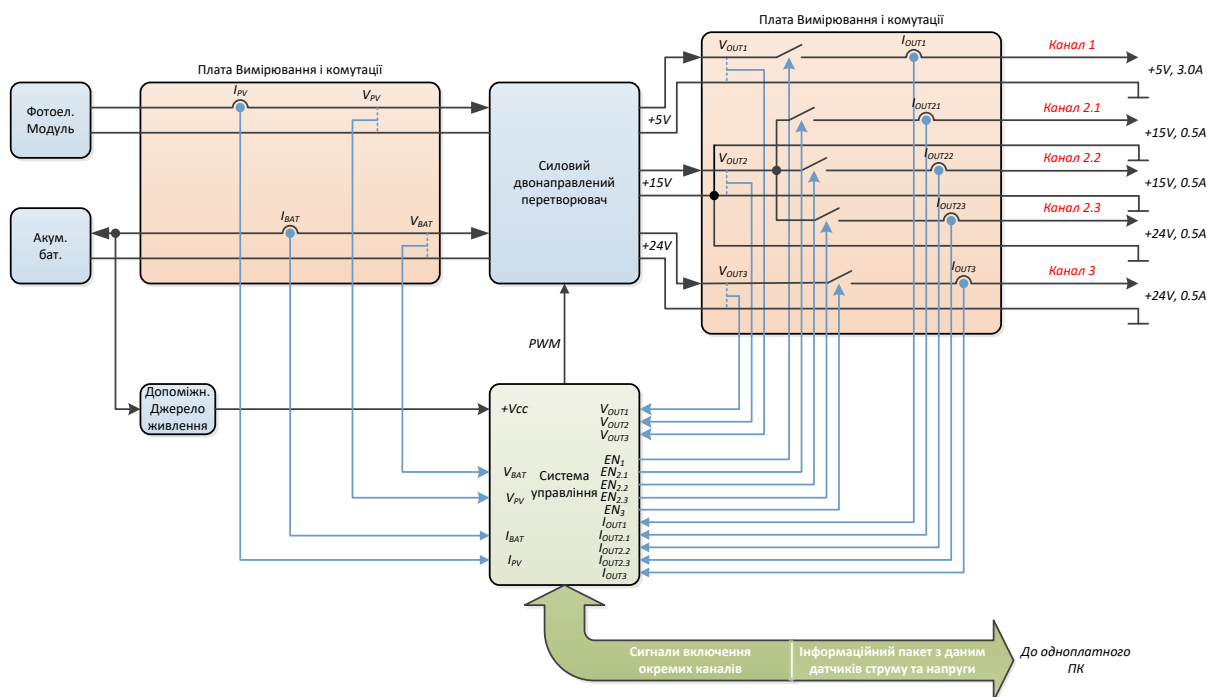


Рис. 4. Структурна схема системи живлення станції моніторингу з п'ятьма вихідними каналами

Для автономних та комбінованих станцій моніторингу надійність та ефективність роботи станції буде значною мірою визначатись надійною роботою акумуляторної батареї та коректністю вибору її номінальних параметрів.

Під час роботи станції акумуляторна батарея може перебувати в декількох станах:

Стан 1: Батарея повністю заряджена.

Батарея заряджена до максимуму, подальше накопичення енергії не відбувається. Сонячна енергія використовується для потреб станції на даний момент: для безперебійного живлення всіх елементів станції, а також, за потреби, для нагріву акумуляторних батарей, або шафи управління.

Стан 2: Акумуляторна батарея повністю розряджена.

При повній розрядці батареї станція вимикається через низький заряд акумуляторів. Для подовження строку служби акумуляторів не рекомендується вимикати станцію при повністю розрядженій батареї, бажано залишити близько 10% заряду, враховуючи затяжні серії похмурих днів в осінньо-зимовий період, коли протягом 5-10 діб може бути відсутня підзарядка батареї. Режим вимкненої станції триває до моменту, коли напруга на виході фотоелектричного перетворювача стане достатньою для початку зарядки акумулятора. У разі достатньої сонячної енергії станція моніторингу включається та починає працювати паралельно з процесом зарядження акумулятора (стан 3).

Для уникнення частих перервань роботи станції через нестабільну сонячну інсоляцію, рекомендується підключати електричне навантаження станції після досягнення акумулятором критично допустимого заряду (наприклад, 15 %).

Контроль за розподілом енергії між зарядкою акумулятора та живленням станції здійснюється контролером блоку живлення за заздалегідь встановленим алгоритмом.

Стан 3: Акумуляторна батарея частково розряджена.

Залишковий заряд акумулятора достатній для довготривалої роботи станції.

Станція працює в нормальному режимі, живлячись від акумулятора та фотоелектричного перетворювача.

Зарядка акумулятора може не відбуватися, якщо потужність від фотоелектричного перетворювача є меншою ніж сумарна потужність електричного навантаження станції.

При розрахунку накопичення енергії в акумуляторних батареях необхідно також враховувати ККД процесу заряду акумуляторних батарей (типове значення для свинцево-кислотного акумулятора –  $\eta_{зар} = 0,75$ ) та ККД самого зарядного пристрою (у сучасних умовах він може бути досить високим, навіть  $\eta_{ЗП} = 0,95$  і вище при використанні, наприклад, квазірезонансних перетворювачів зі спеціальним режимом роботи, наприклад, як це описано в [36]. Рекомендується використовувати значення ККД у діапазоні від 0,8 до 0,9 для більшості сучасних традиційних імпульсних зарядних пристроїв).

У [37] було показано, що перспективним бачиться застосування у складі автономних систем електроживлення літійових АКБ, проте їх широке застосування стримується високою вартістю. У [38] було зазначено, що для отримання максимального терміну використання АКБ і відсутності його зниження критично важливо витримувати усі умови експлуатації АКБ (температурний режим, глибина розряду/заряду, струм заряду, умови зберігання, транспортування, обслуговування).

Для забезпечення живлення станції тільки від акумуляторів протягом заданої кількості діб необхідна ємність акумуляторної батареї розраховується за виразом [25]:

$$Q_{AB} \geq \frac{24 \cdot N \cdot P}{U}, \quad (1)$$

де  $Q_{AB}$  – ємність акумуляторної батареї, А·год;

$P$  – максимальна потужність електроспоживання всіх елементів станції спостереження, Вт;

$N$  – кількість днів безперервної роботи тільки від батареї. Як показує аналіз існуючих статистичних даних метеоспостережень, та досвід експлуатації автоматизованої станції Theorems Dnipro [34], кількість днів без підзарядки для півночі України в період листопад-березень може сягати 10 діб. Тож, при виборі  $N$  доцільно спочатку проаналізувати дані метеоспостережень для району, у якому планується встановлення автономної станції спостережень. У випадку комбінованої структури системи енергозабезпечення станції перерва в електропостачанні від стаціонарної мережі внаслідок аварії, як правило, не перевищує 1-2 діб. Тому в цьому випадку ємність акумуляторної батареї можна обирати значно меншу;

$U$  – напруга акумуляторної батареї, В.

Максимальна кількість енергії, яку може зберігати акумуляторна батарея, знаходиться за формулою:

$$W_{\max} = \frac{U \cdot Q_{AB}}{1000}, \quad (2)$$

де  $W_{\max}$  – максимальна енергія акумулятора, кВт·год.

Для визначення добового залишку енергії в акумуляторі для кожного дня протягом року необхідно знайти різницю між енергією, виробленою сонячним фотоелектричним перетворювачем за добу, і споживанням енергії станцією за добу

$$\Delta W_i = W_i^{PV} - W_i, \quad (3)$$

де  $\Delta W_i$  – добовий баланс енергії за  $i$ -ту добу, кВт·год;

$W_i^{PV}$  – енергія, отримана від сонячної панелі в  $i$ -ту добу, кВт·год;

$W_i$  – витрата енергії за  $i$ -ту добу, кВт·год.

Зміна енергії в акумуляторі виконується в залежності від знака й модуля добового балансу.

Можливі такі варіанти:

1) добовий баланс додатний – акумулятор заряджається. Необхідно додати до поточного значення рівня енергії в акумуляторі модуль добового балансу енергії з урахуванням ефективності процесу заряду акумулятора.

$$W_3 = \Delta W_i \cdot \eta_{зар} \cdot \eta_{ЗП}, \quad (4)$$

де  $W_3$  – енергія заряду за  $i$ -ту добу, кВт·год;

$\Delta W_i$  – добовий баланс енергії за  $i$ -ту добу, кВт·год;

$\eta_{зар}$  – ККД процесу заряду акумулятора;

$\eta_{ЗП}$  – ККД зарядного пристрою.

Якщо сума більше, ніж  $W_{\max}$ , то це говорить про те, що в цей день акумулятор буде повністю заряджений;

2) добовий баланс дорівнює нулю – акумуляторна батарея перебуває в стані накопичення енергії (відбувається тільки саморозряд струмами витоку акумуляторної батареї та її зовнішніх ланцюгів);

3) добовий баланс від'ємний – акумуляторна батарея розряджається. Потрібно від поточного значення рівня енергії в модулі акумулятора відняти значення добового балансу енергії. Якщо в результаті отримуємо значення менше нуля, це означає, що акумулятор у цей день буде повністю розряджений і станція відключиться.

Розрахунок для кожного з наведених вище випадків наведено у виразі:

$$W_i^{AB} = \begin{cases} W_{i-1}^{AB} + W_3, & \text{якщо } \Delta W_i > 0 \text{ і } W_{i-1}^{AB} + W_3 < W_{\max}, \\ W_{\max}, & \text{якщо } \Delta W_i > 0 \text{ і } W_{i-1}^{AB} + W_3 \geq W_{\max}, \\ W_{i-1}^{AB}, & \text{якщо } \Delta W_i = 0, \\ W_{i-1}^{AB} - |\Delta W_i|, & \text{якщо } \Delta W_i < 0 \text{ і } W_{i-1}^{AB} - |\Delta W_i| > 0, \\ 0, & \text{якщо } \Delta W_i < 0 \text{ і } W_{i-1}^{AB} - |\Delta W_i| \leq 0, \end{cases} \quad (5)$$

де  $W_i^{AB}$  – енергія в акумуляторній батареї на кінець  $i$ -ої доби, кВт·год;

$\Delta W_i$  – добовий баланс енергії за  $i$ -ту добу, кВт·год;

$W_{i-1}^{AB}$  – енергія в акумуляторній батареї на кінець попередньої доби, кВт·год;

$W_{\max}$  – максимальна енергія в акумуляторній батареї, кВт·год.

Апробація описаних підходів щодо вибору ємності акумуляторної батареї та організації системи моніторингу була реалізована на діючій станції гідрометеорологічних спостережень Theorems Dnipro, у м. Любеч, Чернігівської області. Досвід експлуатації станції протягом 2020-2022 року показав справедливість описаних гіпотез. На жаль, воєнна агресія Російської Федерації зробила неможливими продовження експериментальних досліджень з системою енергозабезпечення станції на даному етапі. Проте після завершенню війни експериментальні дослідження з підвищення ефективності алгоритмів управління параметрами режимів роботи блока живлення будуть продовжені.

**Висновки.** У статті представлено огляд основних структурних схем станцій гідрометеорологічних спостережень. Розглянуто особливості використання кожної структурної схеми. Обґрунтовано необхідність впровадження системи моніторингу електричних та неелектричних параметрів блоку живлення автономної та комбінованої станції спостережень. Наведено розрахунок зміни енергії акумуляторної батареї, на основі якого можна вибрати номінальну ємність акумуляторної батареї, необхідну для надійної та безперебійної роботи станції.

### Список використаних джерел

1. Operative Control Parameters of Water Environment / V. Pohrebennyk, O. Korostynska, A. Mason, M. Cygnar // 9th International conference on developments in esystems engineering (dese). – Liverpool, 2016. – P. 335-340.
2. Remote Water Quality Monitoring System using Wireless Sensors / S. N. Haron, K. M. Mahamad, A. I. Aziz, M. Mehat // 8th WSEAS International Conference on Electronics (Hardware, February 2009). – Hardware : Cambridge, 2009. – P. 148-154.
3. An autonomous water monitoring and sampling system for small-sized ASV operations / F. Fornai, F. Bartaloni, G. Ferri, A. Manzi, F. Ciuchi, C. Laschi // 2012 Oceans. – Hampton Roads, 2012. – Pp. 1-6.
4. GPS Water Level Buoy for Hydrographic Survey Applications / J. L. Riley, B. R. Murray, O. A. Hauser, D. B. Wolcott, R. M. Heitsenrether, S. K. Gill // Final Report: Proof-of-Concept 2014/ NWLON-Comparison Project. – Silver Spring, MD (NOAA).
5. Measuring sea level with GPS- Equipped Buoys: A multi-instruments experiment at Aix island / G. André, M. B. Miguez, V. Ballu, L. Testut, G. Wöppelmann // The International Hydrographic Review. – 2013. – № 10.
6. Water Quality Monitoring based on Small Satellite Technology / N. Gallah, O. Bahri, N. Lazreg, A. Chaouch, K. Besbes // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2017. – Vol. 8, No. 3. – P. 357-362.
7. Joshi, A. A. Water Quality Monitoring System Using Zig-Bee and Solar Power Supply / A. A. Joshi // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2015. – Vol. 4, No. 10. – P. 8103-8109.

8. Yue, R. Novel Water Quality Monitoring System Solar Power Supply and Wireless Sensor Network / R. Yue, T. A. Ying // International Conference of Environmental Science and Engineering (Bali Island, Indonesia, 2012). – 2012. – Vol. 12, Part A. – P. 265-272.
9. GPRS-Based Low Energy Consumption Remote Terminal Unit for Aquaculture Water Quality Monitoring / D. Xu, D. Li, B. Fei, Y. Wang, F. A. Peng // Computer and Computing Technologies in Agriculture. – 2014. – VII. – P. 492-503.
10. Remote On-Line Automatic Monitoring System of Reservoir's Water Regimen Based on WSN and GPRS Network / W. Li, P. Pan, L. S. Tan, X. K. Luo // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 536, April. – P. 1223-1230.
11. Novel numerical and computational techniques for remote sensor based monitoring of freshwater quality / X. Zhu, Y. Yue, P. Wong, Y. Zhang, J. Meng // IEEE International Conference of Online Analysis and Computing Science (ICOACS) (Chongqing, 2016). – 2016. – P. 91-95.
12. Характеристики експлуатаційних параметрів систем моніторингу рівня води откритих водоемів / Я. І. Лепих, А. Л. Приступа, Ю. Я. Бунякова, В. І. Сантоній, Л. Н. Будіянська, В. І. Аверченков, Ю. В. Крышнев // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Шевченка. – Київ : ВІКНУ, 2013. – Вип. 43. – С. 300-308.
13. Сучасні автономні гідрометеорологічні вимірювальні станції : монографія / А. Л. Приступа, В. М. Безручко, О. А. Велигорський, А. С. Ревко, Ю. В. Кришньов. – Чернігів : Видавець Брагинець О. В., 2019. – 180 с.
14. Оптико-електронні системи ближньої локації : монографія / Я. І. Лепіх, В. І. Сантоній, Л. М. Будіянська та ін. ; за ред. Я. І. Лепіха. – Одеса : Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2019. – 294 с.
15. Погребенник, В. Д. Підвищення точності ультразвукових інформаційновимірювальних систем для експрес-контролю параметрів рідин / В. Д. Погребенник, А. В. Романюк // Матеріали науково-технічної конференції до 40- річчя ДП ДНДІ «Система». – Львів : ДП ДНДІ «Система», 2008. – С. 109-112.
16. Wu, F. Real-time performance of a self-powered environmental IoT sensor network system. Sensors / F. Wu, C. Rüdiger, M. R. Yuce. – 2017. – Vol. 17, No 2. – P. 282.
17. A real-time flood monitoring system based on GIS and hydrological model // Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT) : 2010 International Conference (IEEE) (Wuhan, 17-18 July 2010). – 2010. – Vol. 1. – P. 605-608.
18. A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT) / K. Gulati, R. S. K. Boddu, D. Kapila, S. L. Bangare, N. Chandnani, G. Saravanan // Materials Today : Proceedings. – 2022. – № 51. – P. 161-165.
19. Zhang, Y. Handling missing data in near real-time environmental monitoring / Y. Zhang, P. J. Thorburn // A system and a review of selected methods. Future Generation Computer Systems. – 2022. – Vol. 128. – P. 63-72.
20. Evaluation of a wireless sensor network with low cost and low energy consumption for fire detection and monitoring / X. Silvani, F. Morandini, E. Innocenti, S. Peres // Fire Technol. – 2015. – Vol. 51, № 4. – P. 971-993.
21. Безпека водокористування: фактори впливу та еколого-економічний механізм реалізації : монографія / І. І. Кичко, В. Г. Маргасова, В. В. Виговська, Ж. В. Дерій, А. Л. Приступа, А. В. Холдницька. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – 124 с.
22. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/pro-tsho/struktura/22-stantsiyi>.
23. Meteo-Hydrological Sensors within the Lake Maggiore Catchment: System Establishment, Functioning and Data Validation / M. Ciampittello, D. Manca, Cl. Dresti, S. Grisoni, A. Lami et al. // Sensors (Basel). – 2021. – № 21(24). DOI: 10.3390/s21248300.
24. Автоматичні станції метеоспостереження Viasala [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.vaisala.com/en/products/weather-environmental-sensors/automatic-weather-station-aws810-general>.

25. Autonomous Power Supply Development for Hydrometeorological Monitoring Station / A. Prystupa, V. Kazymyr, A. Zabašta, A. Revko, S. Stepenko, K. Novyk // 2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON) (Riga, 2022). – 2022. – Pp. 1-6. DOI: 10.1109/ENERGYCON53164.2022.9830499.
26. Guide to the Global Observing System, (WMO-No. 488) [Electronic resource]. – Geneva, 2010. – Access mode: [http://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=4236](http://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4236).
27. Explanatory circular on the WMO Quality Management Framework [Electronic resource]. – Access mode: [http://www.bom.gov.au/wmo/quality\\_management/docs/QMF-circ\\_en.pdf](http://www.bom.gov.au/wmo/quality_management/docs/QMF-circ_en.pdf).
28. Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8) [Electronic resource]. – Geneva, 2018. – Access mode: [https://community.wmo.int/activity-areas/imop/wmo-no\\_8](https://community.wmo.int/activity-areas/imop/wmo-no_8).
29. Настанова гідрометеорологічним станціям і поста́м : керів. документ 52.4.8.01-07. – Вип. 2, Ч. 1: Метеорологічні спостереження на постах. – Київ : Держметеорологслужба, 2007. – 288 с.
30. Методичні вказівки з автоматизованої обробки і контролю даних гідрометеорологічних спостережень. – Вип. 3: Метеорологічна інформація гідрометеорологічних станцій і постів. – Київ, 2014.
31. Проведення паралельних метеорологічних спостережень : керів. документ 74.90.14-02572508-000:2015 : метод. вказівки. – Київ, 2015.
32. Просторово-часовий контроль даних метеорологічних спостережень станцій : метод. рекомендації : Наказ УкрГМЦ від 16.02.2021 р. № НС-13/99. – Київ, 2021.
33. Настанова гідрометеорологічним станціям и поста́м. – Вип.: 1. Державна система гідрометеорологічних спостережень. Основні положення і нормативні документи. – Київ, 2019.
34. Optimization of Electricity Consumption for Autonomous Monitoring Station “THEOREMS Dnipro” / A. Prystupa, V. Marhasova, S. Stepenko, T. Kulko, B. Kulik, K. Novyk // 2022 IEEE 3<sup>rd</sup> KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – 2022. – Pp. 1-6. DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916347.
35. Clarifying the Temperature-Dependent Lithium Deposition/Stripping Process and the Evolution of Inactive Li in Lithium Metal Batteries / M. Tao, X. Chen, H. Lin, Y. Jin, P. Shan, D. Zhao, M. Gao, Z. Liang, Y. Yang // ACS Nano. – 2023. – № 17(23). – P. 24104-24114. DOI: 10.1021/acsnano.3c09120.
36. IEEE Recommended Practice for Installation and Maintenance of Lead-Acid Batteries for Photovoltaic (PV) Systems – Redline // IEEE Std 937-2019 (Revision of IEEE Std 937-2007). – P. 1-45.
37. Фесенко, А. П. Огляд та обґрунтування вибору акумуляторних батарей для автономної системи електроживлення на основі фотоелектричних перетворювачів [Електронний ресурс] / А. П. Фесенко, Р. Д. Єршов, С. А. Степенко // Технічні науки та технології. – 2021. – № 1(7). – С. 177-186. – Режим доступу: <http://tst.stu.cn.ua/article/view/105255>.
38. Захарченко, Д. Огляд та обґрунтування вибору накопичувачів електроенергії для роботи електроенергетичних об'єктів / Д. Захарченко, С. Степенко // Технічні науки та технології. – 2021. – № 4(22). – С. 198-209. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-198-209](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-198-209).

### References

1. Pohrebennyk, V., Korostynska, O., Mason, A. and Cygnar, M. (2016). Operative Control Parameters of Water Environment. *9th international conference on developments in esystems engineering (dese)* (pp. 335-340).
2. Haron, S.N., Mahamad, K.M., Aziz, A.I. and Mehat, M. (2009). Remote Water Quality Monitoring System using Wireless Sensors. *8th WSEAS International Conference on Electronics, Hardware, Wireless, and Optical Communications* (pp. 148-154). Cambridge, UK.
3. Fornai, F., Bartaloni, F., Ferri, G., Manzi, A., Ciuchi, F. and Laschi, C. (2012). *An autonomous water monitoring and sampling system for small-sized ASV operations* (pp. 1-6). Oceans, Hampton Roads, VA.
4. Riley, J.L., Murray, B.R., Hauser, O.A., Wolcott, D.B., Heitsenrether, R.M., Gill, S.K. (2014). GPS Water Level Buoy for Hydrographic Survey Applications. Final Report: Proof-of-Concept. NWLON-Comparison Project. Silver Spring, MD (NOAA).

5. André, G., Miguez, M.B., Ballu, V., Testut, L., Wöppelmann, G. (2013). Measuring sea level with GPS- Equipped Buoys: A multi-instruments experiment at Aix island. *The International Hydrographic Review*, No 10-2013.
6. Gallah, N., Bahri, O. B., Lazreg, N., Chaouch, A., Besbes, K. (2017). Water Quality Monitoring based on Small Satellite Technology. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 8(3), 357-362.
7. Joshi, A.A. (2015). Water Quality Monitoring System Using Zig-Bee and Solar Power Supply. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 4(10), 8103-8109.
8. Yue, R., Ying, T. (2012). A Novel Water Quality Monitoring System Solar Power Supply and Wireless Sensor Network. *International Conference of Environmental Science and Engineering*, 1(2), Part A, 265–272.
9. Xu, D., Li, D., Fei, B., Wang, Y., Peng, F. (2014). A GPRS-Based Low Energy Consumption Remote Terminal Unit for Aquaculture Water Quality Monitoring. *Computer and Computing Technologies in Agriculture*, VII, 492-503.
10. Li, W., Pan, P., Tan, L. S., Luo, X. K. (2014). Remote On-Line Automatic Monitoring System of Reservoir's Water Regimen Based on WSN and GPRS Network. *Applied Mechanics and Materials*, 536, 1223-1230.
11. Zhu, X., Yue, Y., Wong, P., Zhang, Y. and Meng, J. (2016). Novel numerical and computational techniques for remote sensor based monitoring of freshwater quality. *IEEE International Conference of Online Analysis and Computing Science (ICOACS)* (pp. 91-95).
12. Lepikh, Ya.I., Pristupa, A.L., Bunyakova, Yu.Ya., Santoniy, V.I., Budienskaya, L.N., Averchenkov, V.I., Kryshnev, Yu.V. (2013). Kharakterystyky ekspluatatsyonnykh parametrov system monytorynha urovnia vody otкрытыkh vodoemov [Characteristics of operational parameters of water level monitoring systems for open water bodies]. *Collection of scientific works of the Military Institute of Kyiv National University named after T. Shevchenko – Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu im. T. Shevchenka*, 43, 300-308.
13. Prystupa, A.L., Bezruchko, V.M., Velihorskyi, O.A., Revko, A.S., Kryshnov, Yu.V. (2019). *Suchasni avtonomni hidrometeorolohichni vymiriuvalni stantsii [Modern autonomous hydrometeorological measuring stations]*. Vydavets Brahynets O. V.
14. Lepikh, Ya.I., Santonii, V.I., Budienskaya, L.M., et al. (2019). *Optyko-elektronni systemy blyznoi lokatsii [Optoelectronic systems for short-range location]*. Odes. nats. un-t im. I. I. Mechnykova.
15. Pohrebennyk, V.D., Romaniuk, A.V. (2008). Pohrebennyk, V. D. Pidvyschennia tochnosti ultrazvukovykh informatsiinovykh system dlia ekspres-kontroliu parametrov ridyn [Improving the accuracy of ultrasonic information and measuring systems for rapid control of fluid parameters]. *Materialy naukovykh konferentsii do 40- richchia DP DNDI «Systema» – Materials of the scientific and technical conference for the 40th anniversary of DP NDI «Systema»* (pp. 109–112). DP DNDI «Systema».
16. Wu, F., Rüdiger, C., Yuce, M.R. (2017). Real-time performance of a self-powered environmental IoT sensor network system. *Sensors*, 17(2), 282.
17. A real-time flood monitoring system based on GIS and hydrological model (2010). Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT). *2010 International Conference (IEEE)*. Wuhan, 17-18 July 2010. Vol. 1. PP. 605-608.
18. Gulati, K., Boddu, R. S. K., Kapila, D., Bangare, S. L., Chandnani, N., & Saravanan, G. (2022). A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT). *Materials Today: Proceedings*, (51), 161–165.
19. Zhang, Y., Thorburn, P. J. (2022). Handling missing data in near real-time environmental monitoring: A system and a review of selected methods. *Future Generation Computer Systems*, 128, 63–72.
20. Silvani, X., Morandini, F., Innocenti, E., Peres, S. (2015). *Evaluation of a wireless sensor network with low cost and low energy consumption for fire detection and monitoring*. *Fire Technol*, 51(4), 971–993.



21. Kychko, I.I., Marhasova, V.H., Vyhovska, V.V., Derii, Zh.V., Prystupa, A.L., Kholodnytska, A. V. (2023). *Bezpeka vodokorystuvannia: faktory vplyvu ta ekoloho-ekonomichni mekhanizmy realizatsii [Safety of water use: factors of influence and ecological and economic mechanism of implementation]*. NU «Chernihivska politehnika».
22. Sreznovsky, B. (n.d.). *Tsentralna heofizychna observatoriia imeni Borysa Sreznovskoho [Structure CGO]*. <http://cgo-sreznovskyi.kyiv.ua/uk/pro-tsho/struktura/22-stantsiyyi>.
23. Ciampittiello, M., Manca, D., Dresti, Cl., Grisoni, S., Lami, A., et al. (2021). Meteorological Sensors within the Lake Maggiore Catchment: System Establishment, Functioning and Data Validation. *Sensors (Basel)*, 21(24). doi: 10.3390/s21248300.
24. Avtomatychni stantsii meteosposterezhennia Viasala [Viasala. Automatic weather observation stations]. (n.d.). <https://www.vaisala.com/en/products/weather-environmental-sensors/automatic-weather-station-aws810-general>
25. Prystupa, A., Kazymyr, V., Zabašta, A., Revko, A., Stepenko, S. and Novyk, K. (2022). Autonomous Power Supply Development for Hydrometeorological Monitoring Station. *2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON)*. (pp. 1-6). doi: 10.1109/ENERGYCON53164.2022.9830499.
26. Guide to the Global Observing System (WMO-No. 488). (2010). World Meteorological Organization. [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=4236](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4236).
27. Explanatory circular on the WMO Quality Management Framework. (n.d.). World Meteorological Organization. [http://www.bom.gov.au/wmo/quality\\_management/docs/QMF-circ\\_en.pdf](http://www.bom.gov.au/wmo/quality_management/docs/QMF-circ_en.pdf).
28. Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8). (2018). World Meteorological Organization. [https://community.wmo.int/activity-areas/imop/wmo-no\\_8](https://community.wmo.int/activity-areas/imop/wmo-no_8)
29. Nastanova hidrometeorolohichnym stantsiiam i postam: keriv. dokument 52.4.8.01-07 [KD 52.4.8.01-07 Instructions to hydrometeorological stations and posts], 2(1). Meteorological observations at posts. (2007).
30. Metodychni vkazivky z avtomatyzovanoi obrobky i kontroliu danykh hidrometeorolohichnykh sposterezhzen [Methodical guidelines for automated processing and control of hydrometeorological observation data]. Vol. 3 Meteorological information of hydrometeorological stations and posts. (2014).
31. Provedennia paralelnykh meteorolohichnykh sposterezhzen: keriv. dokument 74.90.14-02572508-000:2015 [KD 74.90.14-02572508-000:2015 Conducting parallel meteorological observations]. (2015).
32. Spatio-temporal control of meteorological station data [Prostorovo-chasovyi kontrol danykh meteorolohichnykh sposterezhzen stantsii], Order of UkrHMTs of February 16, 2021 № NS-13/99.
33. Nastanova hidrometeorolohichnym stantsiiam y postam. (2019). Vol.: 1. Derzhavna systema hidrometeorolohichnykh sposterezhzen. Osnovni polozhennia i normatyvni dokumenty [State System of Hydrometeorological Observations. Main provisions and regulatory documents].
34. Prystupa, A., Marhasova, V., Stepenko, S., Kulko, T., Kulik, B. and Novyk, K. (2022). Optimization of Electricity Consumption for Autonomous Monitoring Station “THEOREMS Dnipro”. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. (pp. 1-6). doi: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916347.
35. Tao, M., Chen, X., Lin, H., Jin, Y., Shan, P., Zhao, D., Gao, M., Liang, Z., and Yang, Y. (2023). Clarifying the Temperature-Dependent Lithium Deposition/Stripping Process and the Evolution of Inactive Li in Lithium Metal Batteries. *ACS Nano*, 17(23), 24104-24114. DOI: 10.1021/acsnano.3c09120.
36. IEEE Recommended Practice for Installation and Maintenance of Lead-Acid Batteries for Photovoltaic (PV) Systems – Redline. (2020). IEEE Std 937-2019 (Revision of IEEE Std 937-2007) – Redline. (pp. 1-45).
37. Fesenko, A. P., Yershov, R. D., Stepenko, S. A. (2021). Ohliad ta obruntuvannia vyboru akumuliatornykh batarei dlia avtonomnoi systemy elektrozhylennia na osnovi fotoelektrychnykh peretvoriuvachiv [Review and justification of the choice of batteries for an autonomous power supply system based on photovoltaic converters]. *Technical sciences and technologies – Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 1(7), 177–186. <http://tst.stu.cn.ua/article/view/105255>.

38. Zakharchenko, D., Stepenko, S. (2021). Review and justification of the choice of electricity storage devices for the operation of electric power facilities. *Technical sciences and technologies*, 4(22), 198–209. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-198-209](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-198-209).

Отримано 22.12.2023

UDC 621.32

**Anatoliy Prystupa<sup>1</sup>, Anatoliy Revko<sup>2</sup>, Victoria Margasova<sup>3</sup>, Kateryna Novyk<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies Department  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [anatoliy.prystupa@stu.cn.ua](mailto:anatoliy.prystupa@stu.cn.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9412-2698>

**ResearcherID:** [F-5507-2014](https://orcid.org/0000-0001-9412-2698). **Scopus Author ID:** [57190807222](https://orcid.org/0000-0001-9412-2698)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics Department  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [asrmeister@gmail.com](mailto:asrmeister@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6818-2961>

**ResearcherID:** [ABA-7094-2021](https://orcid.org/0000-0001-6818-2961). **Scopus Author ID:** [57188714850](https://orcid.org/0000-0001-6818-2961)

<sup>3</sup>Doctor of Economics, Professor, Vice-Rector for Research  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [viktoryamargasova@gmail.com](mailto:viktoryamargasova@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8582-2158>

**ResearcherID:** [D-3198-2015](https://orcid.org/0000-0001-8582-2158). **Scopus Author ID:** [57202906268](https://orcid.org/0000-0001-8582-2158)

<sup>4</sup>PhD student at the Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies Department  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [ekaterinanovik965@gmail.com](mailto:ekaterinanovik965@gmail.com). **Scopus Author ID:** [57848921200](https://orcid.org/0000-0001-8582-2158)

## **ENERGY SUPPLY SYSTEM FOR THE HYDROMETEOROLOGICAL OBSERVATION STATION**

*There are more and more tasks that require constant monitoring of certain parameters today. In particular, this concerns monitoring of environmental parameters, control over the state of water bodies, radiation monitoring, as well as solving security tasks of automated surveillance of a certain territory. The development of modern technologies makes it possible to use a variety of measuring equipment, video surveillance and communication equipment, and intelligent data processing and storage devices at monitoring stations. The efficiency of a monitoring station depends to a large extent on the reliability of the station's power supply system. Therefore, improving approaches to the design of the station's power supply system is an urgent task.*

*The issues of automated monitoring of hydrological, meteorological and environmental parameters have recently received increasing attention from both domestic and foreign scientists [1-13]. The development of renewable energy sources and semiconductor converters for its distribution among consumers within the monitoring station allows such stations to be mobile [2, 4, 6] or located in hard-to-reach places [3; 5; 8].*

*This paper presents the results of the authors' theoretical and experimental research into the peculiarities of creating a power supply system for the station, obtained in the course of the research project "THEOREMS-Dnipro. Transboundary Hydrometeorological and Environmental Monitoring System of Dnipro river", "Applied development of an organisational and economic mechanism for ensuring the environmental safety of water resources through automated monitoring", "Multi-agent system for the protection of critical infrastructure based on a swarm of multi-copter drones".*

*There is a large number of publications related to improving the accuracy of measuring equipment of observation stations [14-15], improving processing algorithms [16-17] and information transmission [18-20]. However, insufficient attention is paid to power supply systems.*

*However, the accuracy and reliability of the measured information and the reliability of the observation station will largely depend on the quality of the power supply for the station's equipment. In light of recent events related to the military aggression of the Russian Federation, hydrometeorological observation stations can be supplemented with video surveillance systems and become an important element in the system of ensuring the protection of certain territories. They can become even more functional if they are used as recharging stations for various types of drones. Such an expansion of the stations' functionality is not possible without a high-quality power supply system.*

*The purpose of the study is to analyse typical structural schemes of hydrometeorological observation stations, to investigate the operating modes of station equipment and their impact on the power supply system.*

*According to the type of power supply, hydrometeorological observation stations can be divided into three categories:*

*Stations with mains power supply is usually used for stationary devices that consume significant power.*

*Stations with autonomous power supply are usually powered by rechargeable batteries that are recharged from renewable energy sources.*

*The use of self-powered structures allows such stations to be mobile.*

*Combined power supply provides for the possibility of power supply both from batteries and from the stationary AC power grid.*

*When operating surveillance stations with autonomous or combined power supply, it is advisable to provide for the possibility of controlling the power supply of individual consumers within the station in order to change the frequency of measurements depending on the energy reserves in the batteries.*

*To control the output channels in the power supply system, it is necessary to provide a control module and an extensive monitoring system for both electrical parameters (currents, voltages, capacitance, resistance) and non-electrical parameters (temperature, relative humidity, light intensity, etc.).*

*For stand-alone and combined monitoring stations, the reliability and efficiency of the station will be largely determined by the reliable operation of the battery and the correct choice of its nominal parameters.*

*The charge-discharge modes of the battery are considered and the choice of its nominal capacity is substantiated.*

*The article presents an overview of the main structural schemes of hydrometeorological observation stations. The peculiarities of using each structural scheme are considered. The necessity of implementing a system for monitoring the electrical and non-electrical parameters of the power supply unit of an autonomous and combined observation station is substantiated. The calculation of changes in the energy of the battery is presented, on the basis of which it is possible to select the nominal capacity of the battery required for reliable and uninterrupted operation of the station.*

**Keywords:** *power supply system; power supply unit; battery; structural diagram; modeling.*

**Fig.:** 4. **References:** 38.

## РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-4(34)-236-242

УДК 528.4:332.3

**Сергій Нестеренко<sup>1</sup>, Юлія Радзінська<sup>2</sup>, Сергій Халіков<sup>3</sup>, Олександр Фролов<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

**E-mail:** [nesterenkosg34@gmail.com](mailto:nesterenkosg34@gmail.com). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5124-9728>

**ResearcherID:** [AAB-6270-2019](https://orcid.org/0000-0001-5124-9728). **SCOPUS Author ID:** [57195064409](https://orcid.org/0000-0001-5124-9728)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова (Харків, Україна)

**E-mail:** [radzinskayayb@gmail.com](mailto:radzinskayayb@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1661-7975>

**Researcher ID:** [AAK-8248-2020](https://orcid.org/0000-0002-1661-7975). **SCOPUS Author ID:** [57209792703](https://orcid.org/0000-0002-1661-7975)

<sup>3</sup>асистент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова (Харків, Україна)

**E-mail:** [serhii.khalikov@kname.edu.ua](mailto:serhii.khalikov@kname.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-7439-9864>

<sup>4</sup>магістр кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова (Харків, Україна)

**E-mail:** [oleksandr.frolov@kname.edu.ua](mailto:oleksandr.frolov@kname.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-6968-5714>

### ІНСТИТУЦІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ ОБ'ЄКТІВ ПІДЗЕМНОЇ НЕРУХОМОСТІ

*На сучасному етапі розвитку населених пунктів України дедалі актуальнішим стає питання використання підземного простору для зведення підземних об'єктів. Під час оцінювання підземної нерухомості необхідно враховувати різні аспекти, такі як геологічні та гідрогеологічні умови, ринкова кон'юнктура, технічний стан та інші, а також дотримуватися вимог законодавства та професійних стандартів. Також слід зазначити, що оцінка підземної нерухомості може відрізнятися від оцінки звичайної нерухомості. Оцінка підземної нерухомості також може включати оцінку ризиків та можливостей, пов'язаних з її використанням. Оцінювання об'єктів підземної нерухомості має певні інституційні особливості, кожна з яких потребує поглибленого дослідження та визначення відмінностей від наземної нерухомості.*

**Ключові слова:** підземна нерухомість; оцінка майна; земельна ділянка; нормативна база; геодезична експертиза. *Бібл.: 11.*

**Актуальність теми дослідження.** На сучасному етапі розвитку населених пунктів України все більш актуальним стає питання використання підземного простору для зведення підземних об'єктів [1]. Як показують попередні дослідження [2], об'єкти підземної нерухомості мають свої відмінності та інституційні особливості.

Оцінка об'єктів підземної нерухомості здійснюється відповідно до законодавства про оцінку майна в Україні, а саме:

- Закону України «Про оцінку майна, майнових прав та професійну оціночну діяльність» від № 2658-III 12.07.2001 [3];

- Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Методики оцінки майна» від 10.12.2003 № 1891 [4].

Згідно з цими нормативно-правовими актами оцінювання підземної нерухомості здійснюється на основі ринкових цін, що визначаються шляхом порівняння з аналогічними об'єктами нерухомості, а також з урахуванням фізичних, юридичних та економічних характеристик об'єкта.

Проте, важливим етапом оцінки підземних об'єктів є проведення геодезичної та гідрогеологічної експертизи, що дозволяє отримати повну інформацію про стан об'єкта та довкілля, у якому він розташований.

**Постановка проблеми.** Оцінка об'єктів підземної нерухомості, таких як тунелі, каналізаційні труби, підземні паркінги, стіни, підвали та інші, має свої особливості, пов'язані з їхнім місцезнаходженням, конструкцією та ступенем використання. Інституційні особливості оцінки об'єктів підземної нерухомості зазвичай пов'язані з правовими, технічними та іншими аспектами. До них належать:

- правові аспекти: оцінка об'єктів підземної нерухомості пов'язана з правовими аспектами, такими як право власності, право на користування землею, право на використання підземного простору та інші. Ці аспекти мають важливе значення для визначення вартості об'єкта, оскільки вони можуть впливати на можливості забезпечення його експлуатації та використання;

- технічні аспекти: оцінка об'єктів підземної нерухомості пов'язана з технічними аспектами, такими як розмір та конструкція об'єкта, ступінь зносу та потреба у ремонті та підтримці, тип систем вентиляції, освітлення, електроживлення, системи водопостачання та водовідведення, присутність пожежних систем та інших інженерних мереж;

- економічні аспекти: оцінка об'єктів підземної нерухомості пов'язана з економічними аспектами, такими як можливості забезпечення доходів від його експлуатації та використання, вартість землі в навколишньому районі, можливості розвитку та зростання вартості об'єкта в майбутньому, можливість продажу об'єкта та інші;

- місцезнаходження: оцінка об'єктів підземної нерухомості пов'язана з їхнім місцезнаходженням. Місце знаходження може впливати на вартість об'єкта через такі фактори, як доступність, близькість до центру міста, рівень забруднення, рівень шуму та інші;

- ризики: оцінка об'єктів підземної нерухомості пов'язана з ризиками, такими як можливість повені, землетрусу, пожежі, обвалення, відсутність вентиляції та інших. Ці ризики можуть впливати на вартість об'єкта та потребу в його страхуванні;

- методи оцінки: оцінка об'єктів підземної нерухомості може здійснюватися за допомогою різних методів, включаючи порівняльний, дохідний та витратний. Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження, які потрібно враховувати при оцінюванні об'єктів підземної нерухомості.

Загалом, оцінка об'єктів підземної нерухомості має свої особливості, пов'язані з правовими, технічними, економічними та іншими аспектами, які потрібно враховувати для визначення їхньої вартості.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оцінка об'єктів підземної нерухомості в Україні регулюється рядом законодавчих актів. Основними з них є:

- Закон України «Про оцінку майна, майнових прав та професійну оціночну діяльність в Україні», який регулює питання, пов'язані з професійною оцінкою майна, включаючи об'єкти підземної нерухомості [3];

- Закон України «Про містобудівну діяльність», який містить положення щодо правил використання території та встановлення меж земельних ділянок, включаючи ті, що містять об'єкти підземної нерухомості [5];

- Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», який визначає правила охорони природного середовища при будівництві та експлуатації об'єктів підземної нерухомості [6];

- Закон України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність», який містить положення щодо виконання робіт з геодезії та картографії, необхідних для оцінки об'єктів підземної нерухомості [7].

- Житловий кодекс України, який містить положення щодо визначення прав власності на об'єкти підземної нерухомості та їх використання [8];

- Цивільний кодекс України, який містить загальні положення про визнання права власності на нерухоме майно, включаючи об'єкти підземної нерухомості [9].

Відповідно до цих законодавчих актів, оцінка об'єктів підземної нерухомості повинна здійснюватися відповідно до вимог, що встановлені для професійної оціночної діяльності, з урахуванням особливостей таких об'єктів. Крім того, оцінка підземної нерухомості повинна проводитися з дотриманням вимог законодавства, що регулює земельні відносини, містобудівну діяльність та охорону навколишнього природного середовища.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Зокрема, під час оцінювання підземної нерухомості важливо враховувати такі фактори, як глибина розташування об'єкта, стан ґрунту та гідрогеологічні умови на місці, характер робіт з виїмки ґрунту та укладання тунелю або шахти, вартість будівництва та експлуатації об'єкта, а також його ринкову вартість на момент оцінки.

У разі потреби, для більш детальної регламентації процесу оцінювання об'єктів підземної нерухомості, можуть використовуватися інші нормативно-правові акти, зокрема, нормативні документи з геодезії та картографії, будівельні норми та правила, а також інші стандарти та рекомендації відповідних галузевих організацій.

Закон України «Про оцінку майна, майнових прав та професійну оціночну діяльність» [3] встановлює загальні принципи проведення оцінки будь-яких видів майна, включаючи підземну нерухомість. Згідно з цим Законом, оціночна діяльність повинна здійснюватися професійними оцінювачами, які мають необхідну кваліфікацію та ліцензії.

Окремо регулюється оцінка земельних ділянок, на яких розташовані об'єкти підземної нерухомості. Закон України «Про землеустрій» [10] містить вимоги до проведення оцінки земельної ділянки, зокрема, вказується, що оцінювання повинно проводитися з урахуванням природних, господарських та інших умов, що впливають на вартість земельної ділянки.

Крім того, існують ряд спеціалізованих нормативно-правових актів, що регулюють проведення оцінки підземних споруд, таких як шахти, тунелі, підземні комунікації тощо. Наприклад, ДБН В.1.1-25-2009 Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення [11], містять вимоги до оцінки стану підземних споруд та встановлення необхідних заходів з їх захисту від впливу гірських вод.

Варто також відзначити, що оцінка підземної нерухомості може здійснюватися за домовленістю між сторонами, які мають інтерес до такої процедури. Наприклад, у разі продажу підземного приміщення або його оренди можуть сторони домовитися про проведення оцінки, щоб встановити ринкову вартість об'єкта та узгодити ціну. У таких випадках оцінку можуть проводити незалежні експерти або спеціалізовані організації з відповідними ліцензіями та кваліфікацією.

Оцінювання підземної нерухомості може бути проведено як у межах окремої операції, так і у складі комплексного оцінювання майна підприємства. В останньому випадку оцінювання підземної нерухомості зазвичай проводиться як частина загальної оцінки майна підприємства, що передбачає аналіз ринкових умов, технічного стану об'єкта, місця розташування та інших факторів, які можуть впливати на вартість підземного приміщення.

Найчастіше підземні приміщення оцінюються з метою продажу або оренди, забезпечення кредиту або залучення інвесторів, страхування майна, податкових та бухгалтерських цілей. Вартість підземної нерухомості може суттєво варіюватися залежно від різних факторів, таких як місцезнаходження, технічний стан, попит та інші чинники, тому важливо проводити професійну оцінку згідно з вимогами законодавства.

**Метою статті** є дослідження особливостей оцінки об'єктів підземної нерухомості, які мають ряд інституційних особливостей, кожна з яких потребує поглибленого дослідження та визначення відмінностей від наземної нерухомості. Це стосується дослідження методів оцінки та інформаційного забезпечення оціночних процедур із дотриманням чинних законодавчих актів.

**Виклад основного матеріалу.** При оцінюванні підземної нерухомості важливо враховувати специфіку цього типу майна. Наприклад, підземні приміщення можуть мати обмежену освітленість, низьку вентиляцію, обмежену просторову доступність та інші технічні особливості, які можуть впливати на їх використання та вартість.

Також важливими факторами при оцінці підземної нерухомості є земельні та правові питання. Наприклад, в Україні існують обмеження на використання земельної ділянки під підземними приміщеннями, тому важливо перевірити правовий статус землі та наявність всіх необхідних дозволів та документів.

Законодавство України також встановлює вимоги до експертів, які здійснюють оцінку підземних приміщень [3; 5; 8]. Зокрема, експерти повинні мати відповідну кваліфікацію та ліцензії на здійснення оціночної діяльності, а також володіти необхідними знаннями у сфері геодезії, геології, будівництва та інших пов'язаних галузях. З огляду на зазначене, оцінювання підземної нерухомості є важливим етапом при здійсненні операцій із цим типом майна та повинна проводитись з урахуванням усіх факторів, які можуть впливати на вартість та використання підземних приміщень.

У деяких випадках оцінка підземної нерухомості може включати аналіз геологічних та гідрогеологічних умов місцевості, на якій знаходяться підземні приміщення. Це може вплинути на вартість об'єкта, оскільки рівень ґрунтових вод, хімічний склад ґрунту та інші фактори можуть впливати на можливість використання та технічний стан підземних приміщень. Оцінка підземної нерухомості також може включати аналіз ринкової кон'юнктури, тобто попиту та пропозиції на подібні об'єкти на ринку. Це може допомогти визначити оптимальну ціну для об'єкта та зробити рішення про його купівлю або продаж.

Крім того, важливим елементом оцінки підземної нерухомості є технічний аудит, який включає огляд стану інженерних мереж та комунікацій, систем вентиляції та освітлення, технічного обладнання та інших елементів, які можуть впливати на ефективність та безпеку використання об'єкта.

Не менш важливим етапом при оцінці підземної нерухомості є визначення мети та цілей оцінки. Це може бути визначення ринкової вартості об'єкта, розрахунок вартості для оподаткування, визначення вартості для забезпечення кредитів та інше. Отже, оцінка підземної нерухомості є складним процесом, який включає в себе аналіз різних факторів, таких як геологічні та гідрогеологічні умови, ринкова кон'юнктура, технічний стан та інші.

У деяких випадках оцінка підземної нерухомості може здійснюватися в межах інших процесів, таких як проектування будівель або реконструкція наявних приміщень. У таких випадках оцінка може здійснюватися для визначення технічних та економічних параметрів проекту.

В Україні оцінка підземної нерухомості регулюється законодавством, таким як Закон України «Про оцінку майна, майнових прав та професійну оціночну діяльність в Україні» [3] та «Правила оцінки майна», затверджені наказом Міністерства юстиції України від 10 лютого 2012 року № 234/5 [4].

Законодавство визначає вимоги до професійної діяльності оцінювачів, що включають у себе вимоги до кваліфікації, досвіду та професійної етики. Також законодавство встановлює вимоги до змісту та форми оціночних звітів.

**Висновки.** Отже, при оцінці підземної нерухомості необхідно враховувати різні аспекти, такі як геологічні та гідрогеологічні умови, ринкова кон'юнктура, технічний стан та інші, а також дотримуватися вимог законодавства та професійних стандартів. Також слід зазначити, що оцінка підземної нерухомості може відрізнятися від оцінки звичайної нерухомості. Наприклад, оцінка підземного приміщення може включати в себе оцінку його придатності для різних цілей (наприклад, для зберігання товарів, як промислове приміщення або як підземний гараж), оцінку доступу до нього та можливість його використання.

Оцінка підземної нерухомості також може включати оцінку ризиків та можливостей, пов'язаних з її використанням. Наприклад, підземні приміщення можуть бути більш схильні до затоплення або відновлюватися після природних катаклізмів, що може вплинути на їх придатність для різних цілей.

Таким чином, оцінка об'єктів підземної нерухомості має ряд інституційних особливостей, кожна з яких потребує поглибленого дослідження та визначення відмінностей від наземної нерухомості. Це стосується методів оцінки, а також інформаційного забезпечення оціночної процедури з дотриманням діючих правових вимог.

### Список використаних джерел

1. Petrakovska, O. Urban planning in private property conditions in Ukraine / O. Petrakovska, A. Lizunova // *International Academic Group On Planning, Law And Property Rights : Third Conference*. – Aalborg, 2009. – P. 11-13.
2. The research of the impact of environmental factors on the use of underground real estate / K. Mamonov, S. Nesterenko, V. Frolov, V. Troyan // *European Association of Geoscientists & Engineers : Conference Proceedings, International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2020»*. – 2020. – Vol. 2020. – P. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20205739>.
3. Про оцінку майна, майнових прав та професійну оціночну діяльність [Електронний ресурс] : Закон України від № 2658-III 12.07.2001. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2658-14#Text>.
4. Про затвердження Методики оцінки майна [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України. від 10 грудня 2003 р. № 1891. – Режим доступу: <https://ips.ligazakon.net/document/view/КР031891?an=1058>.
5. Про регулювання містобудівної діяльності [Електронний ресурс] : Закон України від 17.02.2011 № 3038-VI. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text>.
6. Про охорону навколишнього природного середовища [Електронний ресурс] : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>.
7. Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність [Електронний ресурс] : Закон України від 23.12.1998 № 353-XIV. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text>.
8. Житловий кодекс України № 5464-X від 30.06.1983 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5464-10#Text>.
9. Цивільний кодекс України № 435-IV від 16.01.2003 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15#Text>.
10. Про землеустрій [Електронний ресурс] : Закон України від 22.05.2003 р. № 858-IV. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#Text>.
11. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення : ДБН В.1.1-25-2009. [Електронний ресурс]. – [Чинний від 2009—12—02]. – Київ : Мінжитлокомунгосп України, 2009. – (Державні Будівельні Норми). – Режим доступу: [https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=25686](https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25686).

### References

1. Petrakovska, O., Lizunova, A. (2009). Urban planning in private property conditions in Ukraine. *International Academic Group On Planning, Law And Property Rights. Third Conference*. Aalborg, Denmark.



2. Mamonov, K., Nesterenko, S., Frolov, V., Troyan, V. (2020). The research of the impact of environmental factors on the use of underground real estate. *Conference Proceedings, International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2020»* (PP. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.

3. Pro otsinku maina, mainovykh prav ta profesiinu otsinochnu diialnist [On the Valuation of Property, Property Rights and Professional Appraisal Activity], Law of Ukraine № 4805-VI (2013). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2658-14#Text>.

4. Pro zatverdzhennia Metodyky otsinky maina [On approval of the Property Valuation Methodology], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 1891 (10.12.2003). <https://ips.ligazakon.net/document/view/KP031891?an=1058>.

5. Pro rehuliuвання mistobudivnoi diialnosti [On the regulation of town planning activities], Law of Ukraine № 3038-VI (17.02.2011). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text>.

6. Pro okhoronu navkolnyshnoho pryrodnoho seredovyscha [On Environmental Protection], Law of Ukraine від № 1264-XII (25.06.1991). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>.

7. Pro topografo-heodezychnu i kartografichnu diialnist [About topographic, geodetic and mapping activities], Law of Ukraine № 353-XIV (23.12.1998) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text>.

8. Zhytlovyi kodeks Ukrainy [Housing Code of Ukraine] № 5464-X (30.06.1983). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5464-10#Text>.

9. Tsyvilnyi kodeks Ukrainy [Civil Code of Ukraine] № 435-IV (16.01.2003). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15#Text>.

10. Pro zemleustrii [On Land Management], Law of Ukraine № 858-IV (22.05.2003). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#Text>.

11. Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Inzhenernyi zakhyst terytorii ta sporud vid pidtoplennia ta zatoplennia. (2009) (Ukraine). DBN V.1.1-25-2009. *Derzhavni Budivelni Normy*. [Protection against hazardous geological processes, harmful operational impacts, and fire. Engineering protection of territories and structures against flooding and inundation. (2009) (Ukraine). DBN V.1.1-25-2009. *State Construction Standards*.] [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=25686](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25686).

Отримано 17.10.2023

UDC 528.4:332.3

**Serhii Nesterenko<sup>1</sup>, Yuliia Radzinska<sup>2</sup>, Serhii Khalikov<sup>3</sup>, Alexander Frolov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD in of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems  
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)  
E-mail: [nesterenkosg34@gmail.com](mailto:nesterenkosg34@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5124-9728>  
ResearcherID: [AAB-6270-2019](https://orcid.org/0000-0001-5124-9728). SCOPUS Author ID: [57195064409](https://orcid.org/0000-0001-5124-9728)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems  
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)  
E-mail: [radzinskayayb@gmail.com](mailto:radzinskayayb@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1661-7975>  
Researcher ID: [AAK-8248-2020](https://orcid.org/0000-0002-1661-7975). SCOPUS Author ID: [57209792703](https://orcid.org/0000-0002-1661-7975)

<sup>3</sup>Assistant of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems  
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)  
E-mail: [serhii.khalikov@kname.edu.ua](mailto:serhii.khalikov@kname.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7439-9864>

<sup>4</sup>Magister of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems  
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)  
E-mail: [oleksandr.frolov@kname.edu.ua](mailto:oleksandr.frolov@kname.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6968-5714>

## INSTITUTIONAL PECULIARITIES OF UNDERGROUND REAL ESTATE VALUATION

*At the current stage of development of Ukrainian settlements, the use of underground space for the construction of underground facilities is becoming increasingly relevant. When evaluating underground real estate, it is necessary to take into account various aspects, such as geological and hydrogeological conditions, market conditions, technical condition, etc., as well as to comply with the requirements of the law and professional standards.*

*To summarize, the valuation of underground real estate has a number of peculiarities related to legal, technical, economic and other aspects that need to be taken into account to determine its value.*

*The purpose of the article is to study the specifics of valuation of underground real estate, which has a number of institutional features, each of which requires in-depth research and determination of differences from above-ground real estate. This concerns the study of valuation methods and information support for valuation procedures in compliance with applicable laws and regulations.*

*When valuing underground real estate, it is important to take into account the specifics of this type of property. For example, underground premises may have limited lighting, poor ventilation, limited spatial accessibility and other technical features that may affect their use and value. Land and legal issues are also important factors in the valuation of underground real estate. Ukrainian legislation sets out requirements for experts who carry out the valuation of underground premises. Based on the above, the valuation of underground real estate is an important stage in transactions with this type of property and should be carried out taking into account all factors that may affect the value and use of underground premises. It should also be noted that the valuation of underground real estate may differ from the valuation of ordinary real estate. The valuation of underground real estate may also include an assessment of the risks and opportunities associated with its use.*

*Thus, the valuation of underground real estate has a number of institutional features, each of which requires in-depth research and identification of differences from above-ground real estate. This applies to valuation methods, as well as information support for the valuation procedure in compliance with applicable legal requirements.*

**Keywords:** *underground real estate; property evaluation; land plot; regulatory framework; geodetic expertise.*

*References: 11.*

**Євгенія Петрикова<sup>1</sup>, Наталія Амеліна<sup>2</sup>, Алла Майстренко<sup>3</sup>, Оксана Бердник<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів  
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)

E-mail: [petrikovakisi@gmail.com](mailto:petrikovakisi@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6781-0954>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів  
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)

E-mail: [navd1@ukr.net](mailto:navd1@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3076-8120>

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів  
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)

E-mail: [al-mais@meta.ua](mailto:al-mais@meta.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1152-995X>

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів  
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)

E-mail: [kсениarezник87@gmail.com](mailto:kсениarezник87@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5321-3518>

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОБАВОК НА ОТРИМАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ У ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ШПАЛ

Сьогодні характерною особливістю сучасної будівельної технології є широке застосування хімічних добавок для досягнення необхідних властивостей бетону, зниження витрат матеріальних і енергетичних ресурсів при виробництві цього матеріалу та при використанні його для виробництва конструкцій і виробів.

Встановлено, що перспективним напрямом зниження енергоємності збірного залізобетону є застосування низькотемпературних режимів теплової обробки й врахування теплоти гідратації цементу. Для досягнення поставлених цілей було розглянуто можливість застосування добавок Sika Paveg HC-1, Nitkal S45 і форміату кальцію в технології виробництва залізобетонних шпал.

Розглянуто дослідження добавок на міцнісні характеристики бетонів, що тверднули при різних температурних режимах. Наведено результати досліджень впливу порядку введення добавок при виготовленні бетонної суміші на міцнісні характеристики бетонів. З врахуванням того, що лабораторні і промислові умови виробництва бетонних сумішей і бетонів мають певні відмінності, розглянуто вплив добавок в лабораторних і промислових умовах.

Грамотне використання цементів в технології виробництва призводить до економії енергоресурсів, тому було визначено комплексний вплив добавок і в'язучих, що містять мінеральні добавки.

**Ключові слова:** хімічні добавки; міцнісні характеристики бетону; технологія виробництва залізобетонних шпал; енергозберігаючі технології; низькотемпературний режим теплової обробки; теплота гідратації цементу.

Рис.: 8. Бібл.: 17.

**Актуальність теми дослідження.** Останнім часом, особливо у зв'язку зі зростанням цін на енергоресурси (нафту і газ), дедалі більшої актуальності для підприємств набуває розвиток енергозберігаючих технологій, які дозволять ефективно використовувати матеріальні ресурси і, відповідно, знизити собівартість продукції та інші операційні витрати, що в свою чергу підвищить прибутковість підприємств. Отже, для сучасного виробництва бетонних і залізобетонних виробів питання максимально можливого зниження енерговитрат виходить на передній план.

Майже на кожному виробництві є реальні резерви економії енергії [1; 2]. Якщо виявити ці резерви й найбільш раціонально організувати технологічні процеси то споживання енергії можна скоротити принаймні в 1,5 раза.

До енергозберігаючих технологій належать:

- застосування високоміцних цементів;
- ведення хімічних добавок;
- зниження температури і тривалості нагрівання;
- нагрівання бетону електричним струмом та у середовищі продуктів згорання природного газу;
- застосування безобігрівних методів тощо.

При цьому економія ресурсів у жодному випадку не повинна погіршувати якості та зменшувати довговічність виробів і конструкцій.

Бетон, що застосовують для виробництва збірних залізобетонних конструкцій і виробів, вимагає налагодженого виробничого процесу й ретельно підбраного складу бетонної суміші з постійною оптимізацією і корегуванням в процесі виробництва.

**Постановка проблеми.** На сьогодні характерною особливістю сучасної будівельної технології є широке застосування різноманітних хімічних добавок для досягнення необхідних властивостей як бетонної суміші, так і бетону, та зниження матеріальних витрат і енергетичних ресурсів при виробництві бетону й при використанні його для виробництва залізобетонних конструкцій і виробів. Перспективним напрямом зниження енергоємності збірного залізобетону є застосування низькотемпературних режимів теплової обробки та врахування теплоти гідратації цементу в процесі прогрівання виробів.

Отже, пошук добавок, які б забезпечили зниження енерговитрат в технології виробництва залізобетонних шпал без зниження показників якості продукції (в тому числі без корозійного впливу на арматурний дріт) з одночасним отриманням високої ранньої міцності є нагрілим завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відповідно до ДСТУ Б В.2.6-209:2016 [3] передаточна міцність бетону, в віці 1 доби, повинна бути рівною 32 МПа (326 кгс/см<sup>2</sup>). Для отримання необхідної передаточної міцності в заданому віці в технології виробництва шпал здійснюють прискорення тверднення шляхом пропарювання виробів в камерах тверднення. До 2000 років тепло-волога обробка відбувалась за температур ізотермічного витримання 80–90 °С. З 2000-х при помітному зростанні вартості енергоносіїв, що суттєво підвищило собівартість виробництва шпал, підприємства-виробники почали переходити на зниження температури ТВО виробів до майже 50 °С. Це призвело до припинення двозмінної роботи підприємств: при двозмінній роботі підприємства бетон має набрати передаточну міцність (не менше ніж 32 МПа) через 8 годин; при однозмінній – через 24 години.

Аналіз технології бетону [1; 2; 4-9] демонструє, що для отримання високої ранньої міцності бетону, окрім тепло-вологої обробки, можливо використання кількох способів: використання швидкотверднучих в'язучих або рядових цементів, які піддавали додатковому помелу, зокрема мокрому; способами підвищення кінцевої міцності (проектної, міцності бетону у віці 28 діб); використання добавок – прискорювачів тужавлення і тверднення. Використання швидкотверднучих в'язучих в умовах заводів по виробництву залізобетонних шпал непридатне, зважаючи на сувору регламентацію застосовуваного цементу; а помел технологічно забезпечити складно (при цьому є потреба в додаткових дослідженнях впливу помелу в'язучого на тріщиностійкість шпал [4; 7]). Другий спосіб може бути забезпечений: зниженням водоцементного відношення за рахунок зниження витрати води та застосування інтенсивних способів ущільнення, що і так застосовується в технології виробництва шпал або за рахунок збільшення витрати цементу (однак це підвищить собівартість продукції); також зниження водоцементного відношення можливо при зниженні витрати води і введення добавок-суперпластифікаторів; застосуванням мінеральних мікродобавок (наприклад мікрокремнезема [10; 11], метакаоліна [12; 13], кальциту [14]; застосуванням бетону оптимального складу тощо.

Використання високоефективних добавок, що прискорюють тверднення [2; 5; 6; 8] є не тільки способом отримання високої ранньої міцності бетону, а й одним із перспективних напрямів ресурсо- та енергозбереження в технології збірного залізобетону.

Дослідження з прискорення твердіння бетону шпал різними способами, у т. ч. комплексними хімічними добавками, що містили пластифікатори та прискорювачі твердіння [15] з різними компонентами [16] проводились з 1960-х рр. Було виконано дослідження спрямовані на зменшення температури і тривалості ТВО шпал без зниження їх тріщино-

стійкості та на основі проведених робіт здійснено розроблення складу бетону [5; 6]. Підвищення ранньої міцності бетону було отримано призначенням його оптимального складу ( $\alpha_{opt}$ ,  $\mu_{opt}$ ) з одночасним застосуванням добавок суперпластифікатора – сульфонафталфінформальдегіду С-3 і нітрату та хлориду кальцію в якості прискорювачів. Однак нітрат а, в ще більшому ступені хлорид кальцію можуть агресивно впливати на сталеву арматуру, особливо коли вона представлена попередньо-напруженим сталевим дротом діаметром 3 мм. Проведені дослідження [17] встановили що в разі обмеженої кількості нітрату і хлориду кальцію (до 1 % від кількості в'язучого за масою) вони не мають агресивного впливу на сталеву арматуру через хімічне зв'язування у гідронітроалюмінати та гідрохлоралюмінати кальцію. У разі передозування цих добавок відзначається агресивний вплив на сталеву арматуру, що сформувало обмеження для використання прискорювачів – електролітів.

З врахуванням особливостей армування шпал та технології їх виробництва, складних умов їх експлуатації в державних нормативних документах на них – ГОСТах, ДСТУ Б В.2.6-57:2008 застосування хімічних добавок не дозволялось. У розробленому ДСТУ Б В.2.6-209:2016 використання добавок дозволяється, при цьому застосування прискорювачів – електролітів не допущене. Відповідно підвищення ранньої міцності бетону, наприклад, добавками неелектролітами, є досить актуальним завданням. Особливу цікавість викликає можливість отримання безпропарювальних і малообігрівних режимів тверднення шпал (мінімальна тепловолісна обробка або природне тверднення) [5; 6].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** На сьогодні характерною особливістю сучасної будівельної технології є широке застосування різноманітних хімічних добавок для досягнення необхідних властивостей, як бетонної суміші, так і бетону, та зниження матеріальних витрат і енергетичних ресурсів при виробництві бетону й при використанні його для виробництва залізобетонних конструкцій і виробів. Перспективним напрямом зниження енергоємності збірного залізобетону є застосування низькотемпературних режимів теплової обробки та врахування теплоти гідратації цементу в процесі прогрівання виробів.

Таким чином, пошук добавок, які б забезпечили зниження енерговитрат в технології виробництва залізобетонних шпал без зниження показників якості продукції (в тому числі без корозійного впливу на арматурний дріт) з одночасним отриманням високої ранньої міцності, є назрілим завданням.

**Мета статті** – дослідження впливу добавок на можливості отримання низькотемпературних та безпропарювальних режимів тверднення в технології виробництва шпал.

**Виклад основного матеріалу.** Коростенський завод залізобетонних шпал, заснований у 1958 році, спеціалізується на випуску попередньо напружених залізобетонних шпал для залізничної колії 1520 мм типів як С-56-2, ШС-1у, Ш-1-1; брусків для стрілочних переводів типу БС 48 М 1/11; шпал для залізничної суміщеної колії 1520 та 1435 мм. Заводом виробляється не тільки продукція для магістральних залізниць, але й для їх об'їзду. Потужність заводу складає 111,7 тис. м<sup>3</sup> на рік.

На заводі прийнята агрегатно-поточна схема виробництва, при якій основним технологічним обладнанням на технологічній лінії є силова металева 10-ти гніздова форма, яка за допомогою роликів конвеєрів переміщується від одного технологічного посту на інший з різним циклом перебування на них. Основними технологічними операціями виробництва залізобетонних шпал є: очищення та змащування форми; створення та вкладання арматурного пакету, який складається з 44 високо-міцних дротин діаметром 3 мм; попереднє напруження арматурного пакета та установка розподільних діафрагм і пустотоутворювачів; укладання жорсткої бетонної суміші та її віброущільнення; часткове негайне розпалублення виробів шляхом вилучення пустотоутворювачів та розподільних діафрагм;

тверднення, яке передбачає тепло-вологу обробка в ямних пропарювальних камерах; передача попереднього напружування на затверділий бетон; розрізання арматури між шпалами та складування готових виробів.

Сировинні матеріали, які використовують при виробництві продукції:

- високоміцний дрiт діаметром 3 мм;
- пісок кварцовий Мкр. – 2,5-3,25 ПАТ «Ігнатпільський піщаний кар'єр»;
- щебінь – ТДВ «Коростенський щебзавод», фракції 5-20 мм;
- цемент ПЦ ІІ А/Ш-500 ПАТ «Волинь-цемент», м. Здолбунів.

На Коростенському заводі залізобетонних шпал використовують бетон складу: цемент – 440-460 кг/м<sup>3</sup>, пісок – 642-670 кг/м<sup>3</sup>, щебінь – 1188-1222 кг/м<sup>3</sup>, вода – 117-130 л/м<sup>3</sup>. Особливістю бетонної суміші є стабільність свіжовідформованих виробів після часткового негайного розпалублення.

Відповідно до чинного нормативного документа [3] клас бетону за міцністю на стиск (у віці 28 діб) не нижче С32/40(В40), передаточна міцність бетону (у віці 1 доби) повинна бути рівною 32 МПа (326 кгс/см<sup>2</sup>).

З урахуванням отримання якісної продукції, при виробництві якої буде використано низькотемпературний режим теплової обробки й те, що шпали є попередньо напруженими конструкціями, були обрані для подальших досліджень такі добавки:

- Sika Paveg HC-1, що являє собою суміш поверхнево-активних речовин;
- Nitkal S45 – водний розчин нітрату кальцію;
- фарміат кальцію, у вигляді сухої речовини.

У процесі експериментів досліджували міцності характеристики бетону у віці 1 і 28 діб.

Випробування міцності бетону при стисненні проводили в лабораторії Київського національного університету будівництва і архітектури (КНУБА) і Коростенського заводу залізобетонних шпал за допомогою гідравлічного пресу на зразках-кубах із довжиною ребра 100 мм.

Бетонні зразки відповідного складу проходили теплову обробку в камерах ямного типу за температурним режимом, який використовується на Коростенському заводі залізобетонних шпал. На заводі тривалість попереднього витримання виробів становить 1 годину, при цьому умови витримання – при температурно-вологих умовах формувального цеху. Підвищення температури від 20 до 80 °С відбувається протягом 3 годин, ізотермічне витримання триває 4 години.

На першому етапі досліджень визначали вплив введення добавок різних видів і їх дозувань на міцнісні характеристики бетонів, які тверднули в нормальних умовах (20 ± 2) °С та бетонів, які піддавали тепло-вологій обробці за режимом тверднення, що прийнятий на підприємстві (рис. 1-3). Зразки виготовляли з бетонної суміші з жорсткістю Ж3 (25-29 с). Добавки вводили в кількостях, % від маси в'язучого; Nitkal S45 – 0,5; 1; 1,5; фарміат кальцію – 3 і 4; Sika Paveg HC-1 – 0,2; 0,35 і 0,5. Дозування добавок приймали відповідно з рекомендаціями виробників.

Аналіз наведених на рис. 1-3 даних, демонструє, що введення добавок Nitkal S45 і Sika Paveg HC-1 підвищує міцнісні характеристики бетонів, які тверднули в різних умовах. При цьому спостерігається більше підвищення міцнісних характеристик бетонів, які тверднули в природних умовах, в той же час міцність бетонів, які піддавали тепло-вологій обробці, характеризується зменшенням міцнісних показників у порівнянні з контрольним складом, що не містить добавок. Отримані результати дозволили зробити припущення, що введення добавок Nitkal S45 і Sika Paveg HC-1 дозволить отримати бетони з необхідними механічними характеристиками в віці 1 і 28 діб при більш низьких температурах тепло-вологої обробки.

Введення добавки формиату кальцію також дозволяє отримати бетони з необхідною міцністю в контрольні терміни (в віці 1 і 28 діб). Міцнісні характеристики бетонів з добавкою у віці 1 доби становлять 38,64-50,99 МПа, залежно від умов тверднення, тобто більше 32 МПа (необхідна передаточна міцність бетону шпал в віці однієї доби). Однак рівень показників міцності бетонів із добавкою формиату кальцію і контрольного бездобавочного складу дуже близькі. Необхідно відмітити, що ведення формиату кальцію до бетонної суміші призводить до різкого збільшення водопотреби й занадто ускладнює процес ущільнення. Враховуючи все вищенаведене, подальше дослідження бетонів із добавкою формиату кальцію було прийнято недоцільним.

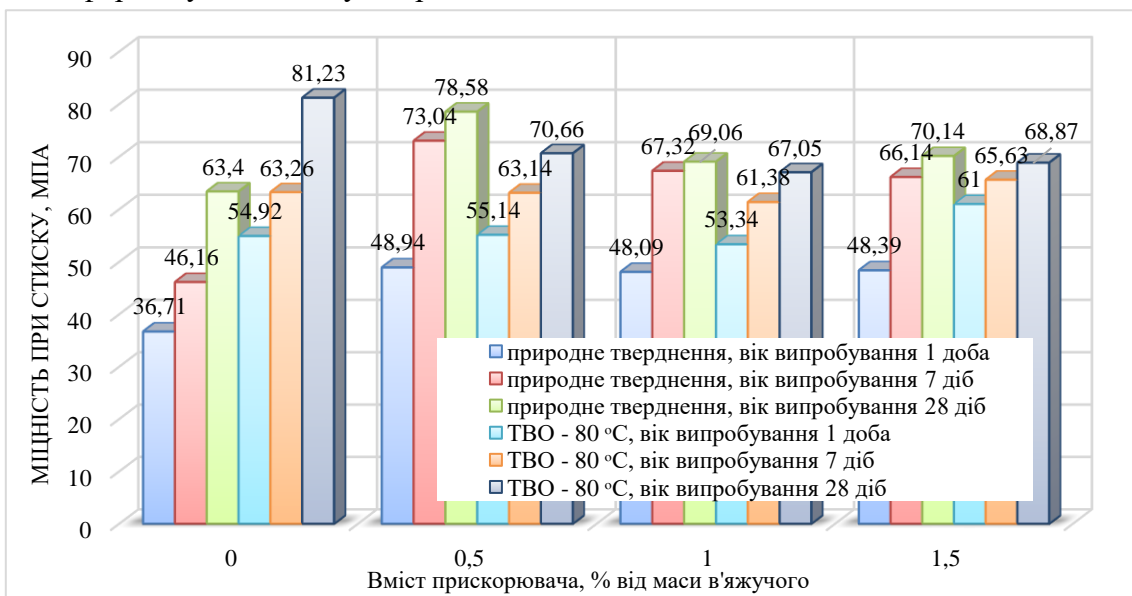


Рис. 1. Вплив добавки Nitkal S45 на механічні характеристики бетонів

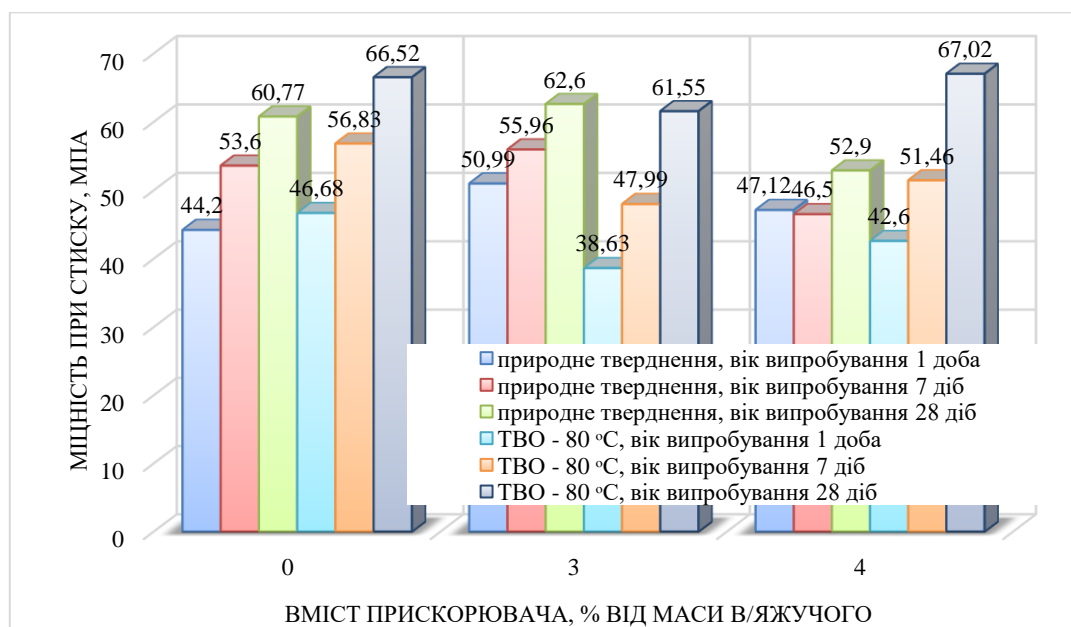


Рис. 2. Вплив формиату кальцію на механічні характеристики бетонів

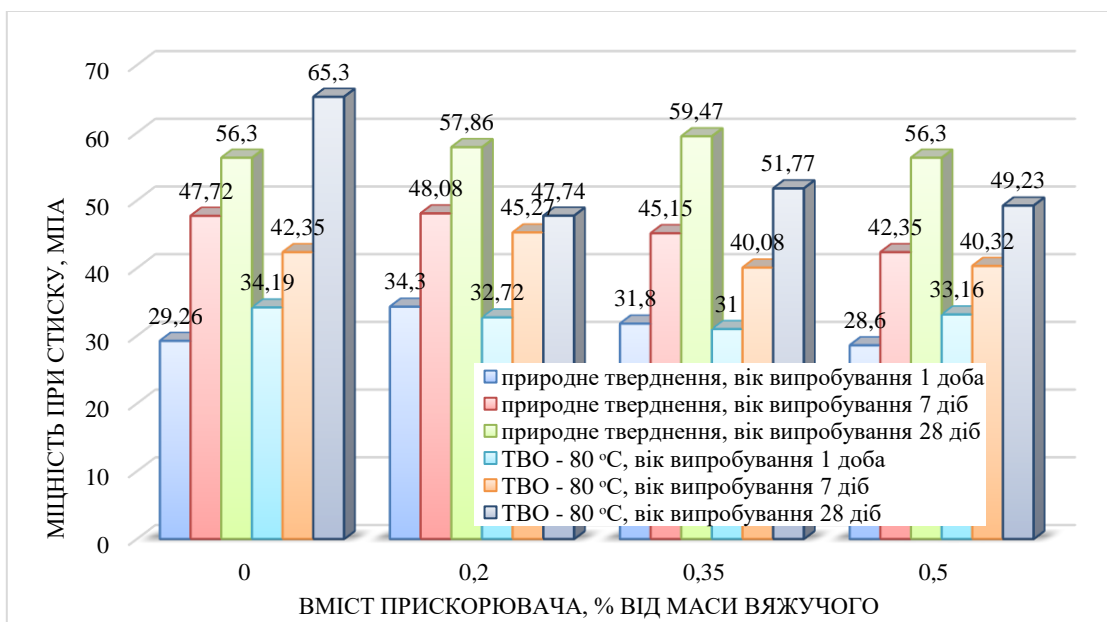


Рис. 3. Вплив добавки Sika Paveg HC-1 на механічні характеристики бетонів

Наступним кроком досліджень було визначення можливості отримання бетонів із добавками Nitkal S45 і Sika Paveg HC-1, які мають необхідні міцнісні характеристики в контрольному віці, і тверднуть при низькотемпературних режимах теплової обробки.

На Коростенського заводу залізобетонних шпал бетонна суміш характеризується жорсткістю Ж-1 (8-11 с). Жорсткість бетонної суміші вимірюють за допомогою приладу Красного безпосередньо на посту формування і умовах лабораторії, з відібраної на посту формування бетонної суміші. З врахуванням необхідного показника жорсткості бетонної суміші, були скореговані відповідним чином рецептури.

Бетонні зразки з добавками Nitkal S45 і Sika Paveg HC-1 та контрольні бездобавочні піддавали тепло-вологій обробці з максимальною температурою ізотермічного витримування – 50 °C. У дослідженнях використовували режим: попереднє витримування виробів –1 година, підвищення температури від 20 до 50 °C протягом 3 годин, ізотермічне витримування – 4 години.

Результати досліджень впливу добавок та їх дозування на міцнісні характеристики бетонів, що тверднули при низько температурних режимах наведено на рис. 4.

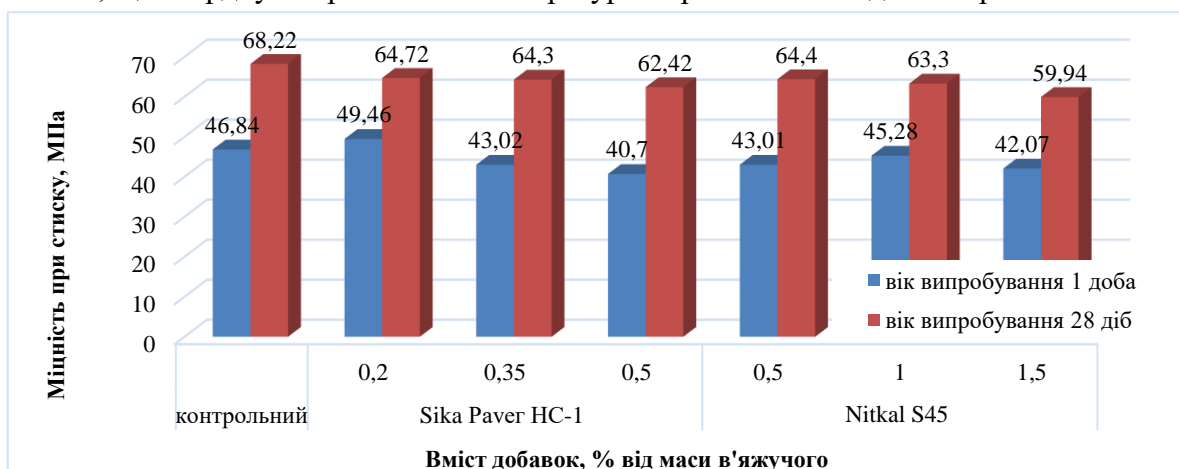


Рис. 4. Вплив добавок і їх дозування на міцнісні характеристики бетону, який тверднув при температурі ізотермічного витримування 50 °C



У результаті дослідження встановлено принципову можливість зниження температури пропарювання до  $50^{\circ}\text{C}$  та оптимальне дозування добавок. Отриманні дані демонструють, що міцнісні показники всіх рецептур близькі й знаходяться в полі допуску, а контрольний склад, який застосовується на підприємстві, показав трохи кращий результат в контрольному віці 28 діб. У віці 1 доби всі зразки продемонстрували міцність при стиску вище 32 МПа.

Встановлено, що зразки бетону, які містять добавку Sika Paver HC-1 в кількості 0,2 % характеризуються найбільшою міцністю в віці 1 доби (49,46 МПа) і 28 діб. Збільшення дозування добавки Sika Paver HC-1 призводить до зниження міцності як у віці 1 доби, так і у віці 28 діб. При цьому зниження в віці 28 діб не досить значне – при введенні 0,5 % добавки становить 2,3 МПа. Результати дослідження впливу дозування добавки Nitkal S45 на міцнісні показники продемонстрували, що доцільним є введення добавки в кількості 0,5 % від маси в'язучого. Подальше збільшення дозування добавки призводить до зниження міцнісних характеристик у віці 28 діб, хоч і дає деякий приріст міцнісних показників у віці 1 доби при збільшенні вмісту добавки до 1 %.

Наступним етапом дослідження було встановлення можливості скорочення тривалості тепло-вологої обробки, яка здійснюється при температурі ізотермічного витримування  $50^{\circ}\text{C}$ . Були заформовані зразки бетону з оптимальною кількістю добавок (Nitkal S45 – 0,5 %, Sika Paver HC-1 – 0,2 % від маси в'язучого) розміром  $100\times 100\times 100$  мм, які помістили в камеру тверднення, і піддавали пропарюванню при температурі  $50^{\circ}\text{C}$ . Терміни випробування становили 2, 4, 6 і 8 годин та 1 і 28 діб. Результати досліджень наведено на рис. 5.

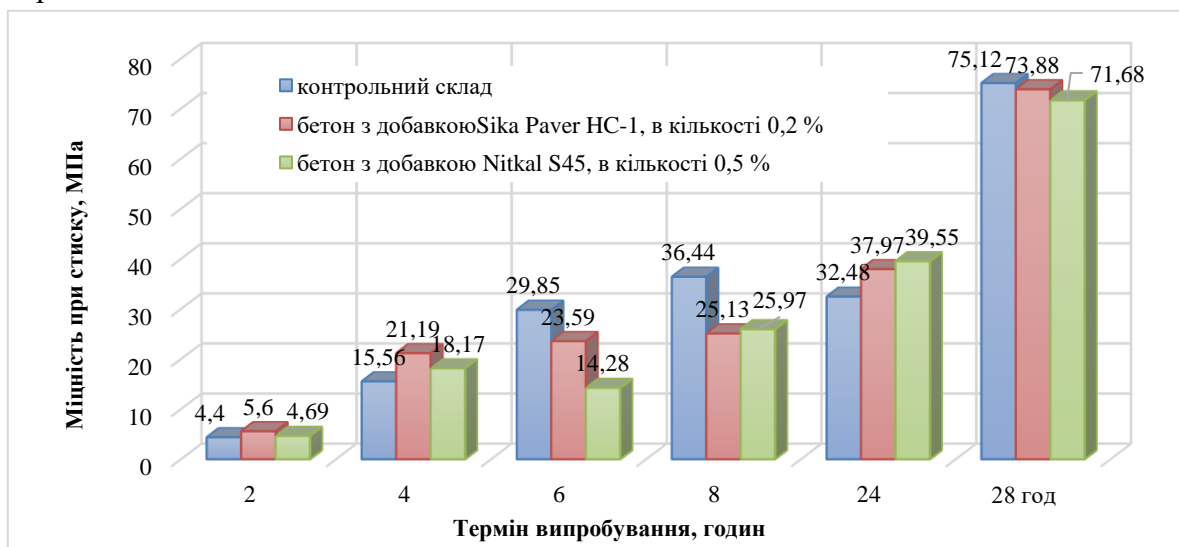


Рис. 5. Вплив тривалості теплової обробки ( $50^{\circ}\text{C}$ ) на механічні властивості бетонів з добавками

Аналіз результату досліджень зразків вказують на недоцільність зменшення тривалість пропарювання. Так зменшення тривалості теплової обробки призводить до отримання бетонів із недостатньою передавальною міцністю на стиск, у віці раніше 1 доби.

Було розглянуто можливість скорочення тривалості тепло-вологої обробки (при температурі ізотермічного витримування  $50^{\circ}\text{C}$ ) при збільшенні дозування добавки Nitkal S45 до 1,0 %. Результати досліджень (рис. 6) вказують на можливість зменшення тривалості тепло-вологої обробки для бетонів з розглянутою рецептурою. Так міцність при стиску бетону з добавкою, що тверднув протягом 8 годин при  $50^{\circ}\text{C}$  становить 41,08 МПа.

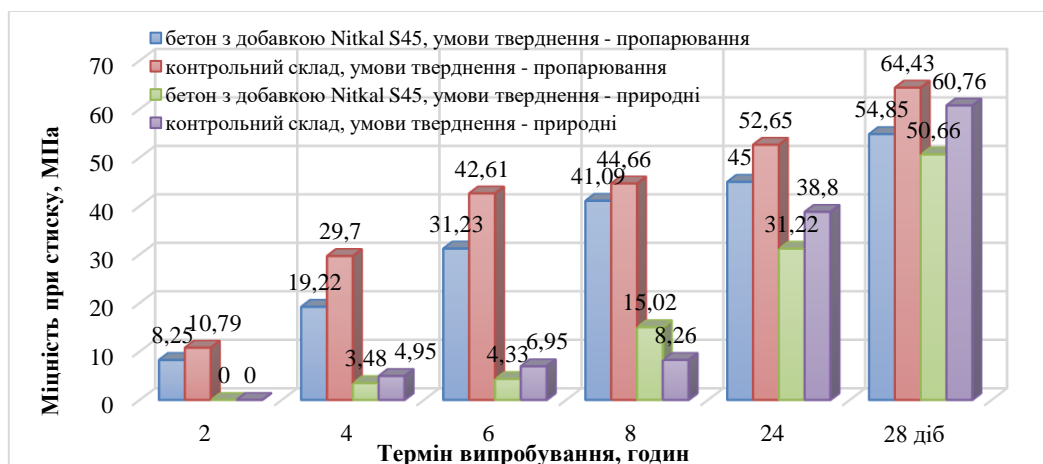


Рис. 6. Вплив тривалості тепло-вологої обробки на механічні властивості бетонів з добавкою Nitkal S45 в кількості 1,0 % від маси цементу

Отримання бетонних сумішей і бетонів в лабораторних умовах і безпосередньо на виробництві має певні відмінності. Тому для встановлення можливості зниження температури пропарювання проводили дослідження безпосередньо в умовах виробництва. Були заформовані зразки-куби зі стороною 10 см із бетонних сумішей, які містили у своєму складі добавки Nitkal S45 і Sika Paver HC-1. Для контрольного складу були заформовані зразки з бетонної суміші, яку використовують для виробництва шпал на Коростенському заводі залізобетонних шпал. Відбір бетонної суміші для контрольних зразків здійснювали безпосередньо з поста формування лінії виробництва шпал.

Частину зразків розміщували в ямній камер, що встановлена на лінії, і вони тверднули при температурі ізотермічного прогрівання – 80 °С разом з залізобетонними шпалами за прийнятим на підприємстві режимом. Другу частину зразків помістили в пропарювальну камеру й піддавала тепло-вологій обробці при температурі ізотермічного прогрівання 50 °С.

Аналіз результатів дослідження міцнісних характеристик бетонів в віці 1 і 28 діб, що тверднули при різних температурах, наведених на рис. 7, ще раз підтверджує можливість зниження температури пропарювання до 50 °С для бетонів, що містять добавки Nitkal S45 і Sika Paver HC-1. Порівняння міцнісних характеристик бетонів, що тверднули в різних умовах вказує на доцільність використання таких добавок виключно при використанні низькотемпературних режимів тверднення.

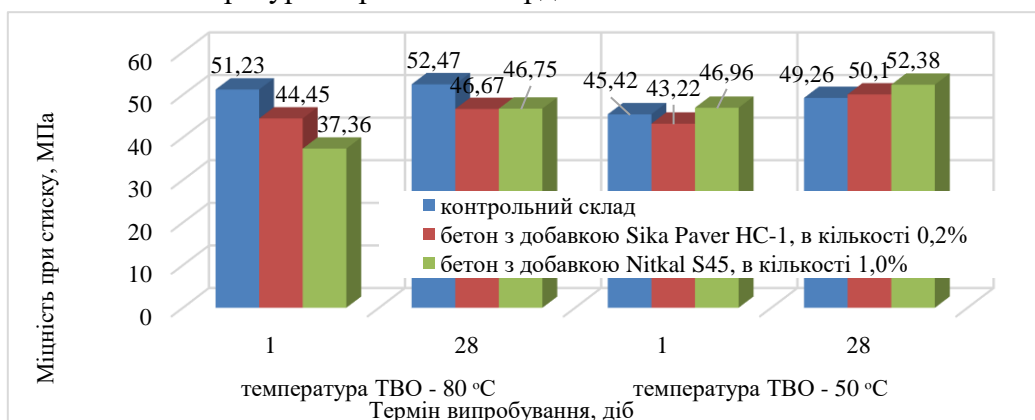


Рис. 7. Вплив температури тепло-вологої обробки на міцнісні характеристики

На властивості бетону впливає багато параметрів, в тому числі і порядок введення компонентів в бетонну суміш. В умовах підприємства було розглянуто вплив порядку

введення добавок на міцнісні характеристики бетонів (рис. 8): добавку вводили разом із водою зачинення та після часткового перемішування компонентів суміші. Аналіз отриманих даних вказує, що більш повний ефект від використання добавок досягається при введенні їх разом із водою.

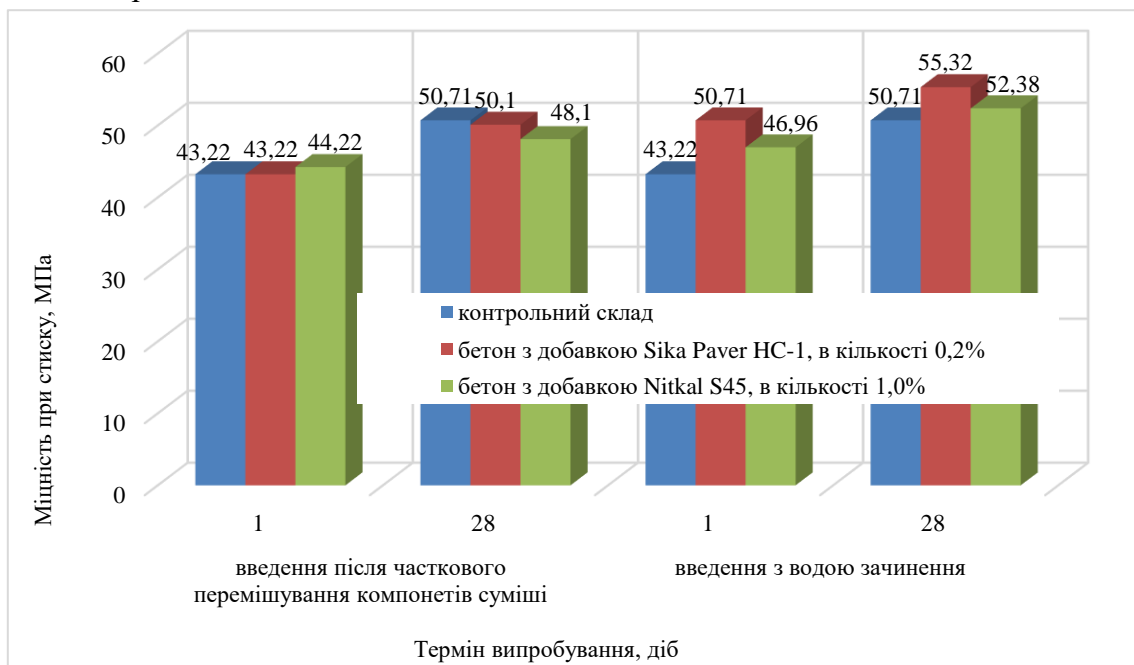


Рис. 8. Дослідження впливу порядку введення добавок на міцнісні характеристики

Враховуючі отримані результати було заформовано одну десятимісну форму контрольним бездобавочним складом і яка пропарювалась при температурі ізотермічного прогрівання  $50^{\circ}\text{C}$ . Тривалість попереднього витримування становила 1 годину, умови витримування – при температурно-вологісних умовах формувального цеху; підвищення температури від  $20$  до  $50^{\circ}\text{C}$  – протягом 3 годин; ізотермічне витримування – 4 години. Перед тим як передавати напругу на бетон були випробуванні контрольні зразки, які тверднули разом з виробами та перевірена міцність бетону неруйнівними методами контролю. Отримані результати підтвердили можливість зниження температури пропарювання з забезпеченням необхідних міцнісних характеристик. Передбачено тверднення виробів на складі підприємства до досягнення віку 28 діб з подальшим випробуванням міцності, тріщиностійкості і водопоглинання.

**Висновки.** Аналіз отриманих результатів досліджень демонструє, що зниження температури пропарювання до  $50^{\circ}\text{C}$  в цілому дозволяє отримати бетони з необхідними механічними характеристиками. Бетон контрольного складу характеризується міцнісними показниками, що відповідають вимогам чинного нормативного документу, при цьому передаточна міцність забезпечується з досить великим запасом –  $45\text{ МПа}$  ( $450\text{ кгс/см}^2$ ). Найкращі показники продемонстрував бетон з добавкою Sika Paver HC-1, міцність у віці: 1 доби –  $46,96\text{ МПа}$ , 28 діб –  $52,38\text{ МПа}$ . Однак приріст міцності, у порівнянні з контрольним складом досить незначний. Тому при оцінюванні доцільності введення добавки необхідно порівнювати технічний ефект, що досягається, з необхідними додатковими затратами. Ефективність будь яких технічних рішень, в тому числі й введення хімічних добавок в бетон повинна визначатись економічним ефектом і коефіцієнтом ефективності затрат. Останній являє собою відношення економічного ефекту до витрат, необхідних для його отримання.

Необхідно відмітити, що використані добавки не забезпечили в повній мірі необхідний і очікуваний ефект. Це пов'язано, ймовірно, з тим, що модифікатори імпортного виробництва створюються з врахуванням того, що цементи мають фіксовані характеристики. Вітчизняні цементи, на жаль, такою стабільністю не відрізняються і добавка може «повести» себе непередбачувано.

Результати проведених досліджень запропоновані як базова основа для розробки рекомендацій з подальшого розгляду і впровадження енергозберігаючих технологій на підприємстві.

### Список використаних джерел

1. Конструкційні матеріали нового покоління та технології їх упровадження в будівництво / Р. Ф. Рунова, В. І. Гоц, І. І. Назаренко та ін. – Київ, 2008 – 360 с.
2. Рунова, Р. Ф. Склади бетону з хімічними та мінеральними добавками зі зниженими витратами цементу для виробництва залізобетонних шпал / Р. Ф. Рунова, В. В. Троян, Н. О. Сова // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті : обрані праці 5-ї міжнар. наук.-тех. конф. з буд. матеріалів, конструкцій та споруд. – Харків, 2015. – С. 73-77.
3. ДСТУ Б В.2.6-209:2016 Шпали залізобетонні попередньо напружені для залізниць колії 1520 і 1435 мм. Технічні умови – Київ : Мінрегіонбуд України, 2016 – 43 с.
4. Волянський, О. А. Технологія бетонних і залізобетонних конструкцій / О. А. Волянський. – Т. 1: Технологія бетону. – Київ : Вища школа, 1994. – 271 с.
5. Склади бетону з добавками суперпластифікаторами і прискорювачами тверднення та роздільним дозуванням фракцій заповнювачів для виробництва залізобетонних шпал без пропарювання / А. А. Пługін, О. В. Романенко, А. І. Бабій, О. А. Калінін, О. А. Пługін // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті : обрані праці 5-ї міжнар. наук.-тех. конф. з буд. матеріалів, конструкцій та споруд. – Харків, 2015. – С. 62-72.
6. Романенко, О. В. Особливошвидкотверднучий безпропарювальний бетон для виробництва залізобетонних шпал без тепловологої обробки : дис... к. т. н. : 05.23.05 / УкрГАЗТ. – Харків, 2012. – 241 с.
7. Основи теорії тверднення, міцності, руйнування і довговічності портландцементів, бетону і конструкцій з них : монографія в 3-х т. / А. Н. Пługін, А. А. Пługін і ін.; під ред. А. Н. Пługіна. – Київ : Наук. думка. – Т. 1. – 2011. – 331 с.; Т. 2. – 2012. – 224 с.; Т. 3. – 2012. – 288 с.
8. Троян В. В. Модифіковані бетони для залізничних шпал підвищеної довговічності / В. В. Троян, Н. О. Сова, О. О. Стеценко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – Вип. 62. – С. 182-184.
9. Хімічні і мінеральні добавки в бетони / під ред. А. В. Ушерова-Маршака. – Харків : Колорит, 2005. – 280 с.
10. Investigations on Nanosilica Blended Cements / S. Harsh, A. K. Arora, M. M. Ali, M. Vasudeva // Cementing a sustainable future : XIII ICCS International Congress on the Chemistry of Cement (Madrid, 3-8 July 2011). – 059. – 7 p.
11. Tobón, J. I. Evaluation of Compressive Strength and Durability on Portland Cement blended with Nanosilica / J. I. Tobón, O. J. Restrepo // Cementing a sustainable future : XIII ICCS International Congress on the Chemistry of Cement (Madrid, 3-8 July 2011). – 081. – 7 p.
12. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах / Л. Й. Дворкін, Н. В. Лушникова, Р. Ф. Рунова, В. В. Троян. – Київ : КНУБА, 2007. – 216 с.
13. Monitoring the Hydration of Mortar containing Metakaolin using Electrical Impedance Spectroscopy / I. C.Fita, J. M.Cruz, J. Payá et al. // Cementing a sustainable future : XIII ICCS International Congress on the Chemistry of Cement (Madrid, 3-8 July 2011). – 185. – 7 p.
14. Nocuń-Wczelik, W. Effect of finely dispersed limestone additives of different origin on cement hydration kinetics and cement hardening / W. Nocuń-Wczelik, G. Łój // Cementing a sustainable future : XIII ICCS International Congress on the Chemistry of Cement (Madrid, 3-8 July 2011). – 128. – 7 p.
15. Мчедлов-Петросян, О. П. Основы и методы ускорения твердения бетона. Железобетонные шпалы / О. П. Мчедлов-Петросян, А. В. Ушеров-Маршак, Л. К. Колесниченко. – Труды ХИ-ИТа. – 1966. – Вып. 86. – С. 18-30.

16. Гасан, Ю. Г. Комплексные добавки – интенсификаторы твердения бетона. Интенсификация производства сборного железобетона / Ю. Г. Гасан, А. П. Кутах // Межвузовский сборник научных трудов / ХИИТ. – 1986. – С. 28-30.

17. Plugin, A. A. Bonding Calcium Chloride and Calcium Nitrate into Stable Hydration Portland Cement Products: Stability Conditions of Calcium Hydrochloraluminates and Calcium Hydronitroaluminates / A. A. Plugin, R. F. Runova // International Journal of Engineering Research in Africa. – 2018. – № 36 – P. 69-73. DOI: 10.4028/www.scientific.net/JERA.36.69.

### References

1. Runova, R.F., Gots, V.I., Nazarenko, I.I. (2008). *Konstruktivni materialy novogo pokolinnya ta tehnologii ih uprovdzhenya v budivninstvo [Construction materials of a new generation and technologies of their implementation in construction]*.

2. Runova, R.F., Troyan, V.V., Sova, N.O. (2015). Sklady betonu z hivichnimy ta mineralnimy dobavkamy zi znyzhenymy vitraty cementu dlya vyrobnytva zalizobetonnyh shpal [Concrete compositions with chemical and mineral additives with reduced cement consumption for the production of reinforced concrete sleepers]. *Obrani praci 5 mizhnarodnoi naukovo-tehnichnoi konferencii z budivnyh materialiv, konstrukcii ta sporud "Problemy nadiinosti ta dovgovichnosti inzhenernyh sporud i budivel na zaliznychnomu transporti" – Problems of reliability and durability of engineering structures and of buildings on railway transport: selected works of the 5th international science and technology conf. from the building materials, structures and buildings* (pp. 73-77).

3. Minregionbud Ukrainy [Ministry of Regional Construction of Ukraine]. (2016). DSTU B V.2.6-209:2016. Shpaly zalizobetonni napruzheni dlia zaliznins kolii 1520 i 1435 mm. Technichni umovy [Pre-stressed reinforced concrete sleepers for 1520 and 1435 mm gauge railways. Technical conditions].

4. Volansky, O.A. (1994). *Tehnologia betonnyh i zalizobetonnyh konstrukcii. T.I. Tehnologia betonu [Technology of concrete and reinforced concrete structures]*.

5. Plugin, A.A., Romanenko, O.V., Babii, A.I., Kalinin, O.A., Plugin, O.A. (2015). Sklady betonu z dobavkamy superplastifikatoramy I pryskoruvachamy tvrdnennia ta rozdilnym dozuvanniam frakcii zapovnuvachiv dlia vyrobnytva zalizobetonnyh shpal bez preparuvannia [Compositions of concrete with additives of superplasticizers and hardening accelerators and separate dosing of aggregate fractions for the production of reinforced concrete sleepers without steaming]. *Obrani praci 5 mizhnarodnoi naukovo-tehnichnoi konferencii z budivnyh materialiv, konstrukcii I sporud "Problemy nadiinosti ta dovgovichnosti inzhenernyh sporud I budivel na zaliznychnomu transporti" – Problems of reliability and durability of engineering structures and buildings on railway transport: selected papers of the 5th International science and technology conf. from the building materials, structures and buildings* (pp. 62-72).

6. Romanenko, O.V. (2012). *Osobluvozhvidkotverdnichii bezproparuvalni beton dlia virobnytvyf zalizobetonnyh shpal bez teplovologo obrobki [Ultra-quick-hardening non-evaporating concrete for the production of reinforced concrete sleepers without heat-moisture treatment]* [PhD dissertation; UkrGAZT].

7. Plugin, A.N. (Ed.), Plugin, A.A. (2011-2012). *Osnovu teorii tvrdnennia, micnosti, ryinyvannia betony i konstrukcii z nix [Fundamentals of the theory of hardening, strength, destruction and durability of Portland cement, concrete and structures made of them]* (Vol. 1–3). Nayk. dymka.

8. Troyan, V.V., Sova, N.O., Stecenko, O.O. (2016). Modifikovani betony dlya zaliznychnykh shpal pidvicheno dovgovichnosti [Modified concrete for railway sleepers of increased durability]. *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytva ta arhitekturi – Bulletin of the Odessa State Academy of Construction and Architecture*, 62, 182-184.

9. Usharov-Marshak, A.V. (Ed.). *Himichni i minerfni dobaky v betony [Chemical and mineral additives in concrete]*. Kolorit, 2005.

10. Harsh, S., Arora, A.K., Ali, M.M., Vasudeva, M. (3–8 July 2011). Investigations on Nanosilica Blended Cements. *Cementing a sustainable future: XIII ICCI International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid*, 059.

11. Tobón, J.I., Restrepo O.J. (3–8 July 2011). Evaluation of Compressive Strength and Durability on Portland Cement blended with Nanosilica. *Cementing a sustainable future: XIII ICCI International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid*, 081.

12. Dvorkin, L.I., Lyshnikova, N.V., Runova, R.F., Troyan V.V. (2007). *Metakaolin v bydivelnykh rozchynakh i betonakh [Metakaolin in household materials and concretes]*. KNYBA.

13. Fita, I.C., Cruz, J.M., Payá, J. et al. (3–8 July 2011). Monitoring the Hydration of Mortar containing Metakaolin using Electrical Impedance Spectroscopy. *Cementing a sustainable future: XIII ICCI International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid*, 185.

14. Nocuń-Wczelik, W., Łój, G. (3–8 July 2011). Effect of finely dispersed limestone additives of different origin on cement hydration kinetics and cement hardening. *Cementing a sustainable future: XIII ICCI International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid*, 128.

15. Mchedlov-Petrosian, O.P., Ushero-v-Marshak, A.V., Kolesnichenko, L.K. (1966). Osnovy i metody iskorenia tverdenia betona. Zalizobetonni shpaly [Fundamentals and methods for accelerating concrete hardening. Reinforced concrete sleepers]. *Trydu HIIT – Proceedings of KHIIT*, 86, 18-30.

16. Gasan, U.G., Kytakh, A.P. (1986). Kompleksnue dobavki – intensifikatoru tverdenia betona [Complex additives - intensifiers of concrete hardening. Intensification of the production of precast reinforced concrete]. *Mezvyz. zb. nauch. tr. HIIT – Interuniversity collection of scientific papers KHIIT* (pp. 28-30).

17. Plugin, A.A., Runova, R.F. (2018). Bonding Calcium Chloride and Calcium Nitrate into Stable Hydration Portland Cement Products: Stability Conditions of Calcium Hydrochloraluminates and Calcium Hydronitroaluminates. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 36, 69-73. DOI:10.4028/www.scientific.net/JERA.36.69.

Отримано 19.10.2023

UDC 624.012.3

***Yevgenia Petrikova<sup>1</sup>, Natalia Amelina<sup>2</sup>, Alla Maistrenko<sup>3</sup>, Oksana Berdnyk<sup>4</sup>***

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Assistant Professor,

Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [petrikovakisi@gmail.com](mailto:petrikovakisi@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6781-0954>

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Assistant Professor,

Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [navd1@ukr.net](mailto:nավd1@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3076-8120>

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Assistant Professor,

Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [al-mais@meta.ua](mailto:al-mais@meta.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1152-995X>

<sup>4</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Scientific Research Institute for Binders and Materials

Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [kseniareznik87@gmail.com](mailto:kseniareznik87@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5321-3518>

## **STUDYING THE INFLUENCE OF ADDITIVES ON OBTAINING LOW TEMPERATURE REGIMES IN THE PRODUCTION TECHNOLOGY OF REINFORCED CONCRETE SLEEPERS**

*Today the characteristic feature of modern building technology is the wide use of chemical additives to achieve the required properties of concrete, reducing the material consumption and energy resources in the production of this material and when using it for the production of constructions and products.*

*It was found that perspective direction for reducing energy intensity of the precast reinforced concrete is using of the low temperature regimes of thermal treatment and taking into account the heat of cement hydration. To achieve the set goal the possibility of using additives such as Sika Pavez HC-1, Nitkal S45 and calcium formate in sleeper technology was considered.*

*The influence of additives on the strength characteristics of concretes, which hardened under different temperature conditions, was considered.*

*Results of the researches on the effect of introduction additives in the production of concrete mixture on the strength characteristics of concretes are presented.*

*Taking into account the fact that laboratory and industrial conditions of concrete mixes and concretes have certain differences, the influence of additives is considered in laboratory and industrial conditions.*

*Competent use of cements in production technology leads to energy saving, therefore, the complex effect of additives and binders that contain mineral additives was determined.*

**Keywords:** *chemical additives, strength characteristics of concretes, sleeper technology, energy saving technologies, low temperature heat treatment, heat of cement hydration.*

*Fig.: 8. References: 17.*

**Володимир Стадніков<sup>1</sup>, Наталія Ліхва<sup>2</sup>, Олена Константінова<sup>3</sup>, Анатолій Колосюк<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри геодезії та землеустрою  
Одеська державна академія будівництва і архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: [stadnikov\\_ht@odaba.edu.ua](mailto:stadnikov_ht@odaba.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2479-9780>

<sup>2</sup>старший викладач кафедри геодезії та землеустрою

Одеська державна академія будівництва і архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: [likhva\\_n@odaba.edu.ua](mailto:likhva_n@odaba.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6656-5766>

<sup>3</sup>кандидат економічних наук, доцент кафедри геодезії та землеустрою

Одеська державна академія будівництва і архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: [ztk.conference@odaba.edu.ua](mailto:ztk.conference@odaba.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9336-9215>

<sup>4</sup>кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії та землеустрою

Одеська державна академія будівництва і архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: [kaa@odaba.edu.ua](mailto:kaa@odaba.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7220-4772>

## ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ СТВОРЕННІ (ОНОВЛЕННІ) ЦИФРОВИХ ТОПОГРАФІЧНИХ КАРТ МАСШТАБУ 1:25000

*Мета цієї роботи – дослідження актуальної методології створення цифрової версії номенклатурного аркуша масштабу 1:25000 на основі аерокосмічних даних із застосуванням сучасного програмного забезпечення для формування єдиної Бази топографічних даних масштабу 1:25000. Автори досліджують процеси створення (оновлення) цифрових топографічних карт масштабу 1:50000, щоб сформувати єдину базу даних топографічних карт масштабу 1:25000. Результати дослідження підтверджують, що використання геоінформаційних технологій і автоматизації процесів може забезпечити актуальну базу топографічних даних, яка важлива для різних сфер, покращуючи планування та реалізацію проектів. У створеній базі топографічних даних масштабу 1:25000 враховуються функціональні можливості поетапної векторизації, критерії відбору, правила топологічних відносин та автоматизований контроль якості з використанням сучасних геоінформаційних технологій.*

**Ключові слова:** база топографічних даних; топографічна карта; цифрова карта; геоінформаційні технології; ArcGIS; оновлення топографічних карт; номенклатурний аркуш; аерофотознімання місцевості; векторизація; геообробка.

Рис.: 4. Бібл.: 17.

**Актуальність теми дослідження.** Одним із пріоритетних напрямів розвитку сфери топографо-геодезичної і картографічної діяльності в Україні є створення, оновлення, зберігання та використання широким колом користувачів картографічної продукції.

Незважаючи на прийняття низки нормативно-правових актів, в Україні фактично відсутні актуальні державні топографічні карти у повному масштабному ряді оскільки роботи із загальнодержавного топографічного картографування території всієї країни довго не здійснювали. Станом на сьогодні переважна більшість топографічних карт всього масштабного ряду катастрофічно застаріла, не відповідає актуальному стану місцевості та потребує термінового оновлення. За статистикою лише 29,7 % топографічних карт було створено та оновлено в період 1991-2023 рр., тоді як 70,3 % карт було створено ще за часів СРСР та не підлягало оновленню взагалі. Загальні засади створення та оновлення топографічних карт та планів в Україні передбачають приведення їх змісту у відповідність до сучасного стану місцевості та вимог діючих нормативно-правових актів на основі актуальних матеріалів аерофотозйомки чи космічної зйомки не рідше ніж раз на 5 років [1]. Слід зазначити, що зазначена картографічна продукція є важливим ресурсом для різних галузей, включаючи містобудування, землеустрій та навігацію.

**Постановка проблеми.** Розробленням та застосуванням практичних методологічних підходів до створення цифрових топографічних карт займаються провідні картографи та ГІС-інженери України в складі науково-дослідних інститутів та компаній з надання картографічних послуг, таких як Науково-дослідний інститут геодезії і картографії, ТОВ «Геонікс», ТОВ «Архізем» тощо.

Для забезпечення умов уніфікації підходів до створення топографічних карт в Україні розроблено систему нормативно-правових актів. Насамперед при дослідженні використовуються Закон України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність», Закон України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних», Класифікатор інформації, яка відображається на топографічних картах масштабів 1:10000, 1:25000, 1:50000, 1:100000, 1:200000, 1:500000, 1:1000000, Основні положення створення та оновлення топографічних карт масштабів 1:10000, 1:25000, 1:50000, 1:100000, 1:200000, 1:500000, 1:1000000, Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку загальнодержавного топографічного і тематичного картографування», що визначають склад, зміст, порядок створення топографічних карт та перелік відповідної атрибутивної інформації [2-6].

Основою дослідження є аналіз можливостей застосування теоретичних та практичних підходів до покращення топографічних карт, вибору методів векторизації, застосування інструментів швидкого редагування та геообробки даних, забезпечення здійснення системи перевірок номенклатурного аркуша та автоматичного контролю і оцінки якості векторизації шляхом використання геоінформаційних технологій програмного забезпечення ArcGIS.

**Метою** дослідження є аналіз та оцінка ефективності використання геоінформаційних систем (ГІС) у процесах створення та оновлення цифрових топографічних карт масштабу 1:25000.

**Виклад основного матеріалу.** Розроблена база топографічних даних масштабу 1:25000 інтегрує процеси послідовної векторизації топографічних елементів, використовуючи визначені критерії відбору та правила топологічних взаємозв'язків об'єктів у цифрових топографічних картах. Також вона обладнана системою автоматичного контролю якості оновлення цифрових топографічних карт, що базується на сучасних геоінформаційних технологіях.

Актуалізовані цифрові топографічні карти масштабу 1:25000 слугують фундаментом для розробки уніфікованої Бази топографічних даних цього масштабу. У процесі їх створення чи оновлення важливо дотримуватися принципів уніфікації та однозначності при ідентифікації топографічних об'єктів, а також застосувати правила топологічних взаємин між об'єктами. Важливо забезпечити узгодженість характеристик та топонімів, відображених на цих картах, з іншими топографічними картами різних масштабів, зокрема з Основною топографічною картою масштабу 1:50000, розробленою в межах українсько-норвезького проєкту «Карти для ефективного управління земельними ресурсами в Україні» [7].

Процес створення (оновлення) цифрових топографічних карт масштабу 1:25000 включає наступні ключові етапи [6, 8]:

1. Збір референтних, додаткових даних та матеріалів.
2. Обробка та підготовка референтних, додаткових даних і матеріалів.
3. Розробка еталонної моделі цифрових топографічних карт масштабу 1:25000.
4. Векторизація (оновлення) цифрових топографічних карт масштабу 1:25000 згідно з установленою методологією.
5. Збирання довідкових, додаткових даних і матеріалів.
6. Підготовка довідкових, додаткових даних і матеріалів.
7. Створення еталонної моделі цифрових топографічних карт масштабу 1:25000.
8. Векторизація (оновлення) цифрових топографічних карт масштабу 1:25000 відповідно до визначеної методології.
9. Багаторівнева система перевірок якості векторизації, перегляд картографічними редакторами, виправлення помилок.
10. Оцінка точності кожного номенклатурного аркуша масштабу 1:25000.



11. Зведення суміжних номенклатурних аркушів, створення єдиної бази даних.

12. Передача бази даних до Державної служби України з питань геодезії, картографії та кадастру для подальшого використання та друку тиражних відбитків.

Практичне виконання робіт з оновлення топографічних карт базується на онові таких матеріалів, як: база геоданих у форматі \*.gdb; прив'язаний тиражний відбиток карти масштабу 1:25000 у форматі \*.tif 1970-1990 рр. ортофотоплан на територію знімання у форматі \*.tif 2006-2012 рр. тиражний відбиток масштабу 1:50000 (проект «Карти для сприяння належному управлінню землями в Україні») 2022-2023 рр., актуальний космоснімок у форматі \*.tif; 2023 р., довідкові матеріали: база даних (географічні назви), схема залізниць, автодороги України, «Умовні знаки для топографічних карт масштабів 1:25000 - 1:100000», умовні скорочення, які вживаються на топографічних картах масштабу 1:25000 тощо [9]. Графічне представлення вихідних даних в розрізі проведеного дослідження наведено на рис. 1.

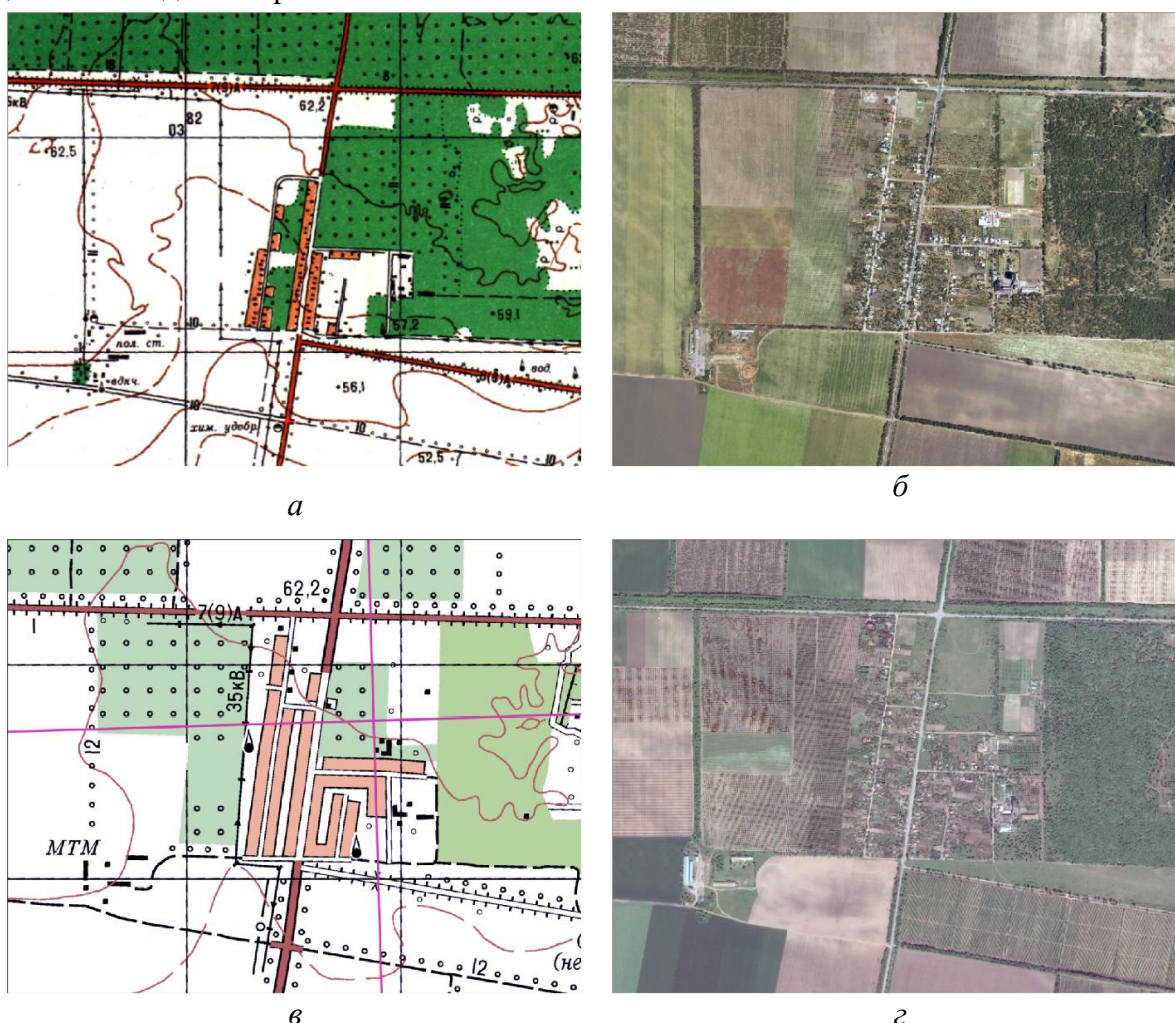


Рис. 1. Фрагменти вихідних матеріалів у розрізі проведеного дослідження:  
 а – прив'язаний тиражний відбиток карти масштабу 1:25000 1970-1990 рр.,  
 б – ортофотоплан на територію знімання 2006-2012 рр., в – тиражний відбиток масштабу 1:50000 2022-2023 рр., г – актуальний космоснімок 2023 р. [10]

Відповідно до нормативних вимог при створенні топографічних карт масштабу 1:25000 допустимі максимальні похибки у плановому положенні об'єктів становлять: для твердих контурів 0,12 мм на карті (3м на місцевості), для нечітких контурів 1 мм на карті

(25 м на місцевості). Особливості пошарового оновлення елементів на топографічній карті включають ряд важливих аспектів, що стосуються різних шарів інформації. Будівлі, які були повністю або частково зруйновані, вже не підлягають векторизації.

Нові житлові будинки або житлові масиви потребують додаткової векторизації для їх відображення на карті. При векторизації будівель враховується їхня просторова локалізація, розрізняючи точкові та полігональні будівлі. Полігональні об'єкти відображаються, якщо будь-яка сторона будівлі перевищує розмір точкового умовного знаку на величину похибки, тобто 3 метри. Квартали векторизують заново з урахуванням змін у забудові. При цьому промислові та соціально-культурні об'єкти не враховуються [11].

Межі населених пунктів редагуються відповідно до актуальної форми всіх кварталів та вулиць, які входять до територіального складу населених пунктів. Назви населених пунктів оновлюються відповідно до актуальної україномовної бази географічних назв. Місцеположення, тип автомобільних доріг, тип покриття та ширина покриття дешифруються згідно з аерофотозніманням місцевості. Класи та номери автодоріг міжнародного/державного/регіонального значення додаються відповідно до актуальної бази даних «Автодороги України». Форма та місцерозташування елементів гідрографії редагуються з урахуванням часових змін на основі аерофотознімання місцевості. Назви замінюються відповідно до актуальної україномовної бази географічних назв. Виділення полігональних, лінійних та точкових елементів рослинності відбувається на основі актуального використання території з дотриманням правил генералізації інформації на топографічних картах [12]. Місцеположення та конструктивні особливості промислових, сільськогосподарських та соціально-культурних об'єктів дешифруються згідно з аерофотозніманням місцевості, а функціональне використання визначається на основі актуальних довідкових даних. Підписи додаються на карту.

Форми рельєфу переносяться з тиражного відбитку попередніх років та актуалізуються на основі аерофотознімання місцевості. Горизонталі топологічно узгоджуються з іншими формами рельєфу та елементами гідрографії. Додатково наносяться промоїни, яри та обриви за результатами дешифрування. Зазначені особливості пошарового оновлення елементів на топографічній карті є важливими для забезпечення актуальності та точності геопросторових даних. Вони дозволяють враховувати зміни, які відбуваються в реальному світі та забезпечують користувачів актуальною та достовірною інформацією на топографічних картах. Під час процесу пошарової векторизації елементів на топографічній карті, широко використовуються функціональні можливості програмного забезпечення ArcGIS для виконання редагування та геообробки даних. Наприклад для спрощення побудови полігонального шару вулиць виконують наступні кроки: векторизація осьової лінії вулиці, послідовне застосування функцій, які включають в себе операції Буферизації (Buffer), з визначенням ширини буферу в залежності від типу вулиці, об'єднання буферів (Merge) та перетворення мультиоб'єктів у простий (MultipartToSinglepart). Отримані полігони піддаються редагуванню за допомогою інструменту Reshape Feature з метою відображення вулиць відповідно до фасадів будівель в міських населених пунктах, а також вздовж переднього краю присадибних ділянок, переважно в сільських населених пунктах [11, 13].

Для ефективної векторизації полігонального шару квартали застосовують наступні кроки: векторизація направляючої лінії вздовж контуру шару вулиць, створення полігонального шару кварталів шляхом відбиття буферів потрібної ширини або шляхом використання інструменту Trace із зазначенням відповідного відступу (параметр Offset).

Точкові будівлі орієнтуються відповідно до їх розташування на місцевості за допомогою інструмента швидкого копіювання Copy Feature.

При векторизації ліній електропередач, стовпи в вершинах створюють за допомогою функції `FeatureVerticesToPoints` та орієнтують їх відносно ліній ЛЕП.

Усі інші точкові, лінійні та полігональні об'єкти, які підлягають відображенню на топографічній карті, векторизують з використанням функцій ручного збору, `Trace (Ofset)`, `Reshape Feature` з врахуванням умов генералізації та топологічної узгодженості елементів векторизації.

У програмному середовищі ArcGIS існує низка особливостей, пов'язаних із використанням правил топології, які допомагають у забезпеченні якості та коректності векторизації просторових об'єктів. Правила топології можуть бути застосовані до просторових об'єктів того самого класу або до відношень між просторовими об'єктами різних класів, що дозволяє визначати зв'язки та взаємодії між різними видами геоданих, враховують топографічний код кожного просторового об'єкта. та можуть враховувати атрибутивні дані просторових класів [14].

На додаток до вищезазначених особливостей, існують різноманітні види топологічних відношень, які можуть бути послідовно використані для всіх необхідних шарів векторизації, наприклад в ArcGIS основними видами таких топологічних відношень є [10, 15]:

1. Розміри мають перевищувати кластерний поріг.
2. Не можуть перекриватися.
3. Не можуть мати порожнеч.
4. Не повинні перекриватися з іншими.
5. Мають бути покриті об'єктами з іншого класу.
6. Повинні бути відокремлені.
7. Не повинні перекриватися самі з собою.
8. Не повинні перетинатися самі з собою.
9. Повинні бути в межах інших об'єктів.
10. Межі мають бути в межах інших об'єктів.
11. Не повинні містити вільно висячих вузлів.

Застосування цих правил дозволяє ефективно контролювати процес створення, оновлення та редагування просторових об'єктів, забезпечуючи врахування топологічних характеристик, а також атрибутів просторових класів.

Фрагмент оновленого номенклатурного аркуша з використанням наведеної методології векторизації із забезпеченням умов топологічної узгодженості просторових об'єктів наведено на рис. 2.



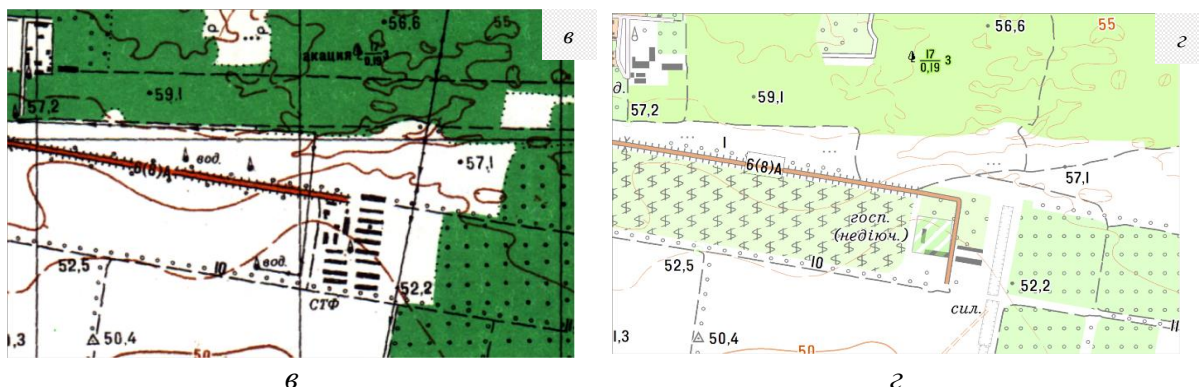


Рис. 2. Фрагменти оновленого номенклатурного аркуша:  
 а, в – прив’язаний тиражний відбиток карти масштабу 1:25000 1970-1990 рр.,  
 б, г – цифровий топографічний план масштабу 1:25000 2023 р. [10]

Якість оновлених цифрових топографічних карт масштабу 1:25000 перевіряється в декілька етапів картографом та картографічним редактором, використовуючи програмне забезпечення ArcGIS [16].

Перший етап передбачає візуальний самоконтроль картографа на номенклатурному аркуші. Під час цього етапу проводиться перегляд усіх базових растрових матеріалів. Також перевіряється повнота та правильність заповнення атрибутивної інформації відповідно до Класифікатора. Другий етап включає автоматичний контроль основних помилок векторизації на номенклатурному аркуші шляхом створення системи топологічних відношень між шарами топографічної інформації. Після усунення всіх помилок топології номенклатурний аркуш передається на перевірку картографічному редактору [17].

Третій етап виконує картографічний редактор, який проводить візуальний та автоматичний контроль якості номенклатурного аркуша, включаючи перевірку всіх елементів змісту та оформлення для забезпечення однотипності кодування та векторизації об’єктів (рис. 3).

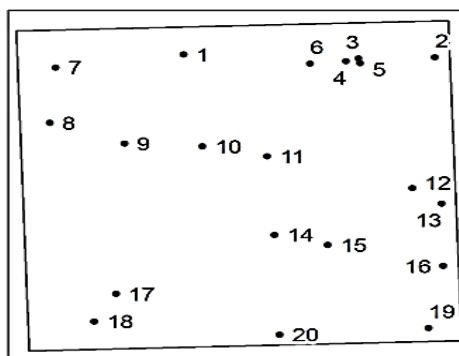
| 3. Перегляд по атрибутивним таблицям (УМОВА: перегляд кожного елементу в кожній таблиці), в якості підложки космоснімок, всі умовні скорочення без пробілів |                               |                                                  |                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1_point                                                                                                                                                     | Пункт ДГМ                     | Місцерозташування                                | на кургані/інший випадок +анотація висоти                                                                                             |
|                                                                                                                                                             | Позначки висот                | Місцерозташування, абсолютна висота              | біля орієнтиру (на перехрестях, на трубах, на опорах)/на кургані + якщо поруч з перехрестями та елементами векторизації - перемістити |
|                                                                                                                                                             | Пункти нівелірної мережі      | Місцерозташування, абсолютна висота              |                                                                                                                                       |
|                                                                                                                                                             | Позначки висот +горизонталі   |                                                  | узгодження горизонталей та позначок висот поруч                                                                                       |
| 23_point                                                                                                                                                    | Курган                        | походження, відносна висота                      | умовний знак (не горб)                                                                                                                |
|                                                                                                                                                             | Бергштрихи                    |                                                  | наявність по 25000, на потовщених горизонталях - потовщені                                                                            |
| 31_point                                                                                                                                                    | Водосховище                   | Умовні скорочення                                |                                                                                                                                       |
| 33_point                                                                                                                                                    |                               |                                                  |                                                                                                                                       |
| 34_point                                                                                                                                                    | Колодязі                      | стан, умовні скорочення за наявності             | +анотація                                                                                                                             |
|                                                                                                                                                             |                               |                                                  |                                                                                                                                       |
| 35_point                                                                                                                                                    | Характеристика рік та каналів | шприна+глибина+характер ґрунту+умовні скорочення | +анотація                                                                                                                             |
| 36_point                                                                                                                                                    | Уріз води                     | Абсолютна висота                                 | +анотація                                                                                                                             |
| 42_point                                                                                                                                                    | Окремі двори                  |                                                  | Перегляд актуальності по космо та необхідності                                                                                        |
|                                                                                                                                                             | Будівлі зруйновані            | умовне скорочення руйни                          | Переглянути актуальність по космо+додати анотацію вручну                                                                              |
|                                                                                                                                                             | Будівлі пільнозабутовані      |                                                  | Можна комплексно перевірити при перевірці кварталів                                                                                   |

Рис. 3. Фрагмент таблиці контролю поширової векторизації номенклатурного аркуша масштабу 1:25000

Джерело: сформовано авторами.

На четвертому етапі, після усунення всіх зауважень, картограф проводить оцінку точності векторизації номенклатурного аркуша, за результатами складає звіт (рис. 4).

## Оцінка точності оновленої цифрової топографічної карти



| № п/п                                                                               | Xцтк       | Yцтк      | Xорг       | Yорг      | $\Delta X_i$ | $\Delta Y_i$ | $\Delta X^2_i$ | $\Delta Y^2_i$ | Похибка |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------|------------|-----------|--------------|--------------|----------------|----------------|---------|
| 1                                                                                   | 5207213.15 | 684244.59 | 5207212.84 | 684244.74 | 0.31         | -0.15        | 0.1            | 0.02           | 0.35    |
| 2                                                                                   | 5207137.68 | 689777.19 | 5207138.17 | 689776.98 | -0.49        | 0.21         | 0.24           | 0.04           | 0.53    |
| 3                                                                                   | 5207104.34 | 688088.44 | 5207104.8  | 688089.99 | -0.46        | -1.55        | 0.21           | 2.4            | 1.62    |
| 4                                                                                   | 5207027.46 | 687814.82 | 5207026.91 | 687814.82 | 0.55         | 0.0          | 0.3            | 0.0            | 0.55    |
| 5                                                                                   | 5206969.01 | 688125.71 | 5206968.49 | 688126.4  | 0.52         | -0.69        | 0.27           | 0.48           | 0.87    |
| 6                                                                                   | 5206958.25 | 687022.26 | 5206957.48 | 687023.4  | 0.77         | -1.14        | 0.59           | 1.3            | 1.37    |
| 7                                                                                   | 5206843.11 | 681431.26 | 5206843.54 | 681432.49 | -0.43        | -1.23        | 0.18           | 1.51           | 1.3     |
| 8                                                                                   | 5205240.9  | 681297.15 | 5205242.61 | 681297.22 | -1.71        | -0.07        | 2.92           | 0.0            | 1.71    |
| 9                                                                                   | 5204644.45 | 682942.96 | 5204643.54 | 682942.26 | 0.91         | 0.7          | 0.83           | 0.49           | 1.15    |
| 10                                                                                  | 5204562.39 | 684661.54 | 5204562.76 | 684661.52 | -0.37        | 0.02         | 0.14           | 0.0            | 0.37    |
| 11                                                                                  | 5204271.2  | 686086.01 | 5204270.3  | 686085.43 | 0.9          | 0.58         | 0.81           | 0.34           | 1.07    |
| 12                                                                                  | 5203356.63 | 689273.17 | 5203356.45 | 689271.94 | 0.18         | 1.23         | 0.03           | 1.51           | 1.24    |
| 13                                                                                  | 5202911.12 | 689915.95 | 5202910.15 | 689916.36 | 0.97         | -0.41        | 0.94           | 0.17           | 1.05    |
| 14                                                                                  | 5202003.08 | 686242.23 | 5202002.72 | 686242.52 | 0.36         | -0.29        | 0.13           | 0.08           | 0.46    |
| 15                                                                                  | 5201714.88 | 687415.09 | 5201713.8  | 687414.89 | 1.08         | 0.2          | 1.17           | 0.04           | 1.1     |
| 16                                                                                  | 5201098.8  | 689959.63 | 5201100.27 | 689961.16 | -1.47        | -1.53        | 2.16           | 2.34           | 2.12    |
| 17                                                                                  | 5200301.33 | 682755.55 | 5200299.76 | 682755.35 | 1.57         | 0.2          | 2.46           | 0.04           | 1.58    |
| 18                                                                                  | 5199497.68 | 682280.55 | 5199498.07 | 682281.16 | -0.39        | -0.61        | 0.15           | 0.37           | 0.72    |
| 19                                                                                  | 5199310.06 | 689638.59 | 5199307.96 | 689638.07 | 2.1          | 0.52         | 4.41           | 0.27           | 2.16    |
| 20                                                                                  | 5199119.18 | 686359.84 | 5199118.54 | 686360.73 | 0.64         | -0.89        | 0.41           | 0.79           | 1.1     |
| $\Sigma$                                                                            |            |           |            |           | 5.54         | -4.9         | 18.45          | 12.19          | 22.42   |
|                                                                                     |            |           |            |           | $M_x =$      | 0.96         | $m$            |                |         |
|                                                                                     |            |           |            |           | $M_y =$      | 0.78         | $m$            |                |         |
| Середня квадратична похибка положень контрольних точок цифрової топографічної карти |            |           |            |           | $M_s =$      | 1.24         | $m$            |                |         |

Рис. 4. Звіт з проведення оцінки точності векторизації номенклатурного аркуша масштабу 1:25000

Джерело: сформовано авторами.

Готові оновлені топографічні карти підлягають зведенню по суміжних номенклатурних аркушах, в результаті якого формується єдина база топографічних даних масштабу 1:25000.

В подальшому база топографічних даних передається для використання до Державної служби України з питань геодезії, картографії та кадастру для подальшого використання.

**Висновки.** У ході дослідження аналізу підлягали можливості застосування теоретичних та практичних підходів для оновлення топографічних карт, вибір методів векторизації та застосування інструментів обробки геоінформаційних даних. Зокрема, було розглянуто систему перевірок та автоматичного контролю якості векторизації з використанням програмного забезпечення ArcGIS.

Авторами представлено практичний приклад оновлення топографічної карти масштабу 1:25000 за допомогою геоінформаційних технологій, що базується на даних аерофотознімання та космічного знімання місцевості.

Дослідження також охопило методологічні особливості процесу векторизації, рівень деталізації та повноту атрибутивної інформації, а також питання топологічної узгодженості та консистентності даних.

В результаті можна зробити висновок, що використання геоінформаційних технологій та автоматизації процесів може сприяти створенню актуальної бази топографічних даних масштабу 1:25000 та її подальшому використанню для потреб різних галузей.

**Список використаних джерел**

1. Лазоренко-Гевель, Н. Особливості створення (оновлення) цифрових топографічних карт для формування основної державної топографічної карти / Н. Лазоренко-Гевель, Ю. Карпінський, Д. Кінь // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2021. – № 1(41). – С. 113-122.
2. Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність [Електронний ресурс] : Закон України від 23.12.1998 року № 353-XIV. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text>.
3. Про національну інфраструктуру геопросторових даних [Електронний ресурс] : Закон України від 13.04. 2020 р. № 554-IX. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text>.
4. Класифікатор інформації, яка відображається на топографічних картах масштабів 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1000 000 [Електронний ресурс] : затв. нач. Гол. управ. геодез., картограф. та кадастру при Кабінеті Міністрів України 1998 р. і погодж. з нач. Центр. топограф. управ. Ген. штабу ЗСУ. – Режим доступу: [https://nvkarta.com/project/library/uploads/geography/map-standart/\[standards\]\[topography\]\[1998\]-klyasyfikator-topografichnoi-informatsii-10000.pdf](https://nvkarta.com/project/library/uploads/geography/map-standart/[standards][topography][1998]-klyasyfikator-topografichnoi-informatsii-10000.pdf).
5. Про затвердження Порядку загальнодержавного топографічного і тематичного картографування [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України від 04.09.2013 р. № 661. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/661-2013-%D0%BF#Text>.
6. Геофізичний моніторинг [Електронний ресурс] / Інститут геофізики НАН України. – Режим доступу: <http://www.igph.kiev.ua/ukr/geomon.html>.
7. Розробка методики створення і оновлення картографічної основи з використанням космічних знімків від супутників «SUPER VIEW-1» / С. Вертегел, В. Вишняков, В. Гуреля, С. Сластін, О. Піскун, С. Харченко, В. Мороз // Екологічна безпека та природокористування. – 2022. – № 41(1). – С. 89–101. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.89-101>.
8. Македон, В. В. Факторні складові цифровізації глобальної економіки та макроекономічних систем країн світу / В. В. Македон, А. В. Чабаненко // Ефективна економіка. – 2022. – № 1. DOI: 10.32702/2307-2105-2022.1.11.
9. Chabaniuk V. Critical properties of modern geographic information systems for territory management / V. Chabaniuk, K. Polyvach // Cybernetics and Computer Engineering. – 2020. – № 3(201). – P. 5-32. DOI:10.15407/kvt201.03.005.
10. ArcGIS Desktop 10.8.x system requirements. System Requirements Documentation [Electronic resource]. – Access mode: <https://desktop.arcgis.com/en/system-requirements/latest/arcgis-desktop-system-requirements.htm>.
11. Геоінформаційні системи і бази даних : монографія / В. І. Зацерковний, В. Г. Бурачек, О. О. Железняк А. О. Терещенко. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2014. – 492 с.
12. Ішук, О. О. Просторовий аналіз і моделювання в ГІС : навч. посіб. 142 Фотограмметрія, геоінформаційні системи та картографія / О. О. Ішук, М. М. Коржнев, О. Є. Кошляков ; за ред. Д. М. Гродзинського. – Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2003. – 200 с.
13. Македон, В. В. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств / В. В. Македон, О. О. Байлова // Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки». – 2023. – Вип. 47. – С. 16-26. DOI: 10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3.
14. Карпінський, Ю. О. Системна модель топографічного картографування в національній інфраструктурі геопросторових даних в Україні / Ю. О. Карпінський, Н. Лазоренко-Гевель // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2020. – Вип. 92. – С. 24-36.
15. Стадніков, В. Сучасні технології геопросторового аналізу під час планування міської території / В. Стадніков, Н. Ліхва, О. Константинова // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2023. – № 45. – С. 135-145.
16. Villanueva, J. K. S. Optimization of ground control point (GCP) configuration for unmanned aerial vehicle (UAV) survey using structure from motion (SfM) / J. K. S. Villanueva, A. C. Blanco // The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2019. – № 42. – Pp. 167-174. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-167-2019.

17. Interferometric phasereconstruction based on probability generative model / Y. Wang, K. Zhang, F. Gong, J. Mu, S. Liu // *Toward efficient analysis of high-dimensional SAR stacks. Remote Sensing.* – 2021. – №13(12). – P. 2369. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13122369>.

### References

1. Lazorenko-Hevel, N., Karpinskyi, Y., Kin, D. (2021). Osoblyvosti stvorennia (onovlennia) tsyfrovyykh topografichnykh kart dlia formuvannia osnovnoi derzhavnoi topografichnoi karty [Features of creating (updating) digital topographic maps for the formation of the main state topographic map. *Modern achievements of geodetic science and production, I (41)*, 113-122.

2. Pro topografo-heodezychnu i kartografichnu diialnist [On topographical, geodetic and cartographic activities], Law of Ukraine № 353-XIV (December 23, 1998).

3. Pro natsionalnu infrastrukturu heoprosorovykh danykh [On the National Infrastructure of Geospatial], Law of Ukraine № 554-IX (April 13, 2020).

4. Classifier of information displayed on topographic maps of scales 1:10,000, 1:25,000, 1:50,000, 1:100,000, 1:200,000, 1:500,000, 1:1000,000 [Klasyfikator informatsii, yaka vidobrazhaetsia na topografichnykh kartakh masshtabiv 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1000 000], approved by Head of the Main Department of Geodesy, Cartography and Cadastre under the Cabinet of Ministers of Ukraine in 1998 and later. with the head of the Central Topographic Department of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine.

5. Pro zatverdzhennia Poriadku zahalnoderzhavnoho topografichnoho i tematychnoho kartografuvannia [On approval of the Procedure for nationwide topographic and thematic mapping], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 661 (September 4, 2013).

6. *Institut heofizyky NAN Ukrainy [Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine]*. (n.d.). Heofizychnyi monitorynh [Geophysical monitoring]. <http://www.igph.kiev.ua/ukr/geomon.html>.

7. Vertegel, S., Vyshnyakov, V., Gurelia, V., Slastin, S., Piskun, O., Kharchenko, S., & Moroz, V. (2022). Rozrobka metodyky stvorennia i onovlennia kartografichnoi osnovy z vykorystanniam kosmichnykh znmkiv vid suputnykiv «SUPER VIEW-1» [Development of the methodology for creating and updating the cartographic base using space images from the "SUPER VIEW-1" satellites]. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia – Environmental Security and Nature Management*, 41(1), 89–101. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.89-101>.

8. Makedon, V., Chabanenko, A. (2022). Faktorni skladovi tsyfrovizatsii hlobalnoi ekonomiky ta makroekonomichnykh system krain svitu [Factor components of digitalization of the global economy and macroeconomic systems of countries]. *Efektivna ekonomika – Effective economics*, 1. DOI: 10.32702/2307-2105-2022.1.11.

9. Chabaniuk, V., Polyvach, K. (2020). Critical properties of modern geographic information systems for territory management. *Cybernetics and Computer Engineering*, 3(201), 5–32. DOI:10.15407/kvt201.03.005.

10. ArcGIS Desktop 10.8.x system requirements. System Requirements Documentation. (2022). <https://desktop.arcgis.com/en/system-requirements/latest/arcgis-desktop-system-requirements.htm>.

11. Zatserkovny, V.I., Burachek, V.G., Zheleznyak, O.O., Tereshchenko, A.O. (2014). *Heoinformatsiini systemy i bazy danykh [Geoinformation systems and databases]*. NSU named after M. Gogol.

12. Ishchuk, O.O., Korzhnev, M.M., Koshlyakov, O.E., Grodzinsky D. M. (Ed.). (2003). *Spatial analysis and modeling in GIS: training. 142 Photogrammetry, geoinformation systems and cartography manual [shchuk, O. O. Prostorovyi analiz i modeliuвання v HIS: navch. posib. 142 Fotogrammetriia, heoinformatsiini systemy ta kartografiia]*. Kyiv University Publishing and Printing Center.

13. Makedon, V.V., Bailova, O.O. (2023). Planuvannia i orhanizatsiia vprovadzhennia tsyfrovyykh tekhnologii v diialnist promyslovykh pidpriemstv [Planning and organizing the implementation of digital technologies in the activities of industrial enterprises]. *Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnoho universytetu. Serii «Ekonomiczni nauky» – Scientific Bulletin of Kherson State University. Series "Economic Sciences"*, 47, 16-26. DOI: 10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3.

14. Karpinskyi, Yu.O., Lazorenko-Hevel, N. (2020). Systemna model topografichnoho kartografuvannia v natsionalnii infrastrukturi heoprosorovykh danykh v Ukraini [System model of topographic mapping in the national infrastructure of geospatial data in Ukraine]. *Heodeziia, kartografiia i aerofotoznmannia – Geodesy, cartography and aerial photography*, 92, 24–36.

15. Stadnikov, V., Lihva, N., Konstantinova, O. (2023). Suchasni tekhnolohii heoprostorovoho analizu pid chas planuvannya miskoi terytorii [Modern technologies of geospatial analysis during urban planning]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Modern achievements of geodetic science and production*, 1(45), 135-145.

16. Villanueva, J.K.S., Blanco, A.C. (2019). Optimization of ground control point (GCP) configuration for unmanned aerial vehicle (UAV) survey using structure from motion (SFM). *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 167–174. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-167-2019.

17. Wang, Y., Zhang, K., Gong, F., Mu, J., Liu, S. (2021). Interferometric phase reconstruction based on probability generative model: Toward efficient analysis of high-dimensional SAR stacks. *Remote Sensing*, 13(12), 2369. <https://doi.org/10.3390/rs13122369>.

Отримано 28.10.2023

UDC 528.489

**Volodymyr Stadnikov<sup>1</sup>, Nataliia Likhva<sup>2</sup>, Olena Konstantinova<sup>3</sup>, Anatolii Kolosiuk<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Geodesy and Land Management  
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine)

**E-mail:** [stadnikov\\_ht@odaba.edu.ua](mailto:stadnikov_ht@odaba.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2479-9780>

<sup>2</sup>Senior Lecturer at the Department of Geodesy and Land Management

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine)

**E-mail:** [likhva\\_n@odaba.edu.ua](mailto:likhva_n@odaba.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6656-5766>

<sup>3</sup>PhD in Economics, Associate Professor of the Department of Geodesy and Land Management

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine)

**E-mail:** [ztk.conference@odaba.edu.ua](mailto:ztk.conference@odaba.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9336-9215>

<sup>4</sup>PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geodesy and Land Management

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine)

**E-mail:** [kaa@odaba.edu.ua](mailto:kaa@odaba.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7220-4772>

## **EXPERIENCE IN USING GIS TECHNOLOGIES IN CREATING (UPDATING) DIGITAL TOPOGRAPHIC MAPS ON A SCALE OF 1:25000**

*The purpose of this work is to research the actual methodology of creating a digital version of the nomenclature sheet on a scale of 1:25000 based on aerospace data using modern software for the formation of a single database of topographic data on a scale of 1:25000. The basis of the study is the analysis of the possibilities of applying theoretical and practical approaches to the updating of topographic maps, the selection of vectorization methods, the use of tools for quick editing and geoprocessing of data, ensuring the implementation of a system of checks of the nomenclature sheet and automatic control and assessment of the quality of vectorization by using geoinformation technologies of the ArcGIS software. The article discusses the importance of research aimed at creating and updating electronic topographic maps of Ukraine. The authors investigate the processes of creating (updating) digital topographic maps on a scale of 1:50000 in order to form a single database of topographic maps on a scale of 1:25000. The key stages of creating (updating) electronic topographic maps on a scale of 1:25000 for Ukraine are described. Using the ArcGIS program, a practical example of updating a topographic map of scale 1:25000 was developed, based on the application of geoinformation technologies, the use of scanned paper maps, recent aerial photographs and satellite images. Methodological aspects of vectorization, detailing, completeness of attributive information, topological consistency and consistency of data, as well as features of automated quality control of updated electronic topographic maps are analyzed. The results of the study confirm that the use of geoinformation technologies and process automation can provide an up-to-date topographic data base that is important for various fields, improving project planning and implementation. The created base of topographic data on a scale of 1:25000 takes into account the functionality of step-by-step vectorization, selection criteria, rules of topological relationships, and automated quality control using modern geoinformation technologies.*

**Key words:** Topographic database; topographic map; digital map; geo-information technologies; ArcGIS; updating of topographic maps; nomenclature sheet; aerial photography of the area; vectorization; geoprocessing.

Fig.: 4. References: 17.



**Олександр Тадєєв**

кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії та картографії

Національний університет водного господарства та природокористування (Рівне, Україна)

E-mail: [o.a.tadyeyev@nuwm.edu.ua](mailto:o.a.tadyeyev@nuwm.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4566-0160>, ResearcherID: B-6081-2019**ПЕРСПЕКТИВИ ОЦІНЮВАННЯ ТРИВИМІРНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗЕМЛІ  
ЗА ДАНИМИ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ**

Представлена в статті інформація є науково-методичного характеру. Пропонується метод оцінювання деформації Землі з позицій теорії перетворень образів ріманового простору в формі складних диффеоморфних многовидів. Зокрема, використано властивості дотичного евклідового простору, який параметризований декартовою системою координат. Такий вибір обґрунтовано її тотожністю з системою ITRS, у якій реалізується моніторинг координат методом GNSS. Розроблений метод забезпечує пряме використання координат у системі ITRS і моделювання деформації топографічної поверхні Землі у тривимірному просторі з метою оцінювання тензорів і пов'язаних з ними інваріантів деформації.

**Ключові слова:** GNSS; ITRS; деформація; метричний тензор; диффеоморфні многовиди; гомеоморфізм.

Рис.: 2. Бібл.: 22.

**Актуальність теми дослідження.** Дослідження деформації Землі посідає чільне місце серед завдань, які у рамках міждисциплінарної співпраці покликані вирішувати широке коло наук про Землю. Мету і зміст досліджень проблеми на геодезичній основі визначено резолюціями комісії 3 «Обертання Землі та геодинаміка» Міжнародної асоціації геодезії IAG (International Association of Geodesy). Акцентовано на необхідності розроблення методів моделювання та аналізу деформацій на теоретичному рівні з їх практичним втіленням у вивчення генезису та інтерпретацію геодинамічних явищ різних масштабів. Як основне джерело вихідних даних для вирішення проблеми рекомендовано використовувати результати моніторингу координат методом GNSS (Global Navigation Satellite System) [1].

**Постановка проблеми.** Впровадження у геодезичну практику супутникових навігаційних технологій, котрі реалізовані в мережах станцій GNSS, забезпечує безперервний моніторинг їх координат у системі ITRS (International Terrestrial Reference System). Накопичення просторово-часового спектра й точності таких даних спроможне збільшити ефективність вирішення задач сучасної геодинаміки. Однак їх масове застосування для потреб деформаційного аналізу посвідчило необхідність переосмислення традиційних теоретичних підходів і розроблення новітніх методів вирішення задач. Найбільшою мірою це стосується розроблення методів оцінювання тривимірних деформацій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найпростіше вирішення проблеми шляхом прямого використання координат у системі ITRS досягається методом скінченних елементів у рамках тривимірного симплекса (тетраедра) на основі лінійної моделі деформації. Метод і раніше використовувався у дослідницькій практиці, якщо вдавалось сумістити пункти класичних планових і висотних геодезичних мереж. За такого підходу оцінюється тривимірний тензор Ейлера-Лагранжа першого роду. Інваріанти деформації, які є наслідком тензора, забезпечують інтерпретацію явища щодо барицентру симплекса [2; 3], але не до геодезичної референцної чи, тим більше, топографічної поверхні, на якій проводяться безпосередні виміри методом GNSS. Така особливість методу має очевидний позитив хіба що при оцінюванні локальних лінійних деформацій земної кори в умовах значного пересіченого рельєфу.

Оригінальний за змістом напрямок досліджень започатковано у дослідженнях [4]. Запропонований метод ґрунтується на гіпотезі сферичності Землі й використовує вхідними даними координати GNSS-станцій у локальній сферичній системі  $\lambda, \varphi, r$ . Автори свідомо

нехтують вертикальними рухами Землі й визначають компоненти двовимірного тензора деформації, який належить до частини відповідної локальної сферичної поверхні Землі. На таких умовах тензор є носієм виключно горизонтальної складової деформації. Третя координата  $r$  фіксує вектор обертання локальної поверхні навколо умовного полюсу. Його пов'язують із жорсткими обертаннями Землі навколо вектора Ейлера. Метод використано при оцінюванні локальних та регіональних деформацій, наприклад, у дослідженнях [5; 6]. Варто виокремити наступний важливий аспект застосування методу. Беручи до уваги поєднання закладеної у нього гіпотези сферичності Землі з тектонічною теорією взаємних переміщень літосферних плит, використанням методу досягається аналіз деформаційних процесів у межах літосферних плит у тектонічних кінематичних моделях Землі типу GSRM (Global Strain Rate Model) [7]. Автори вважають, що метод забезпечує оцінювання тривимірного тензора, однак з погляду класичної теорії він не виражає просторових деформацій.

Просторові координати GNSS-станцій у системі ITRS отримано вимірами безпосередньо на топографічній поверхні. Вони забезпечують її описування як криволінійної поверхні, вбудованої у тривимірний простір. Це викликало закономірну потребу розроблення методів вирішення проблеми, які спроможні оцінити відповідні тривимірні тензори й пов'язані з ними інваріанти, віднесені до топографічної поверхні.

Перші результати досліджень у такому напрямі викладено у працях [8; 9; 10]. Основою досліджень стало диференціальне подання поверхонь у теорії пластин та оболонок механіки суцільного середовища. Розв'язки на цій основі можна досягнути засобами зовнішнього або внутрішнього моделювання деформацій, як це подано авторами праці [9]. Зовнішнє моделювання деформацій передбачає пряме використання координат у системі ITRS і моделювання деформації топографічної поверхні у тривимірному просторі з наступним оцінюванням тривимірних тензорів і пов'язаних з ними інваріантів, які віднесені до цієї поверхні. Унаслідок складних диференціальних формулювань, на думку авторів праці [9], такий підхід не знайшов практичного застосування. Натомість використано засоби внутрішнього моделювання. Їх суть зводиться до оцінювання деформації топографічної поверхні роздільно у горизонтальній і вертикальній складових. Оцінки горизонтальних деформацій одержано моделюванням змін метрики градуйованої поверхні з використанням тензора деформації Ейлера-Лагранжа першого роду. Оцінювання вертикальних деформацій досягається за посередництва пов'язаних інваріантів тензора обертання і тензора Ейлера-Лагранжа другого роду. Вирішення завдань деформаційного аналізу в геодинаміці на основі внутрішнього моделювання до цього часу широко застосовується в дослідній практиці. Деякі результати прикладних досліджень представлено, наприклад, у працях [11; 12; 13; 14; 15].

Однак залишається щонайменше сумнівною аргументація авторів обраного підходу щодо віднесення тензорів до топографічної поверхні. Достатньо розкрити зміст терміну «внутрішнє моделювання деформацій земної поверхні як градуйованої двовимірної криволінійної поверхні» [9]. Градуйоване описування будь-якої поверхні зумовлює необхідність її параметризації з наступним розділенням на скінченні елементи. З геометричної точки зору топографічна поверхня надзвичайно складна і не підлягає параметризації доступними методами навіть з використанням моделі у формі геоїда. З метою досягнення розв'язків, як це подано, наприклад, у працях [11; 16], як параметризовану поверхню автори використовували еліпсоїд. Градуйоване подання еліпсоїда досягається шляхом його розділення на трикутники [16] або чотирикутники [11]. Таким чином, обчислені на такій основі тензори з їх інваріантами потрібно відносити до барицентрів цих фігур на еліпсоїді, але не до топографічної поверхні.

Використовувані методи розв'язання проблеми мають ще одну властивість, яка гранично звужує їх потенційні можливості щодо адекватного оцінювання деформації – вони спроможні передати тільки лінійну складову деформації. Адже означені тензори – це лінеаризовані форми подання реальних полів деформації. Навіть якщо описувати поля зміщень тими чи іншими нелінійними функціями, вони однаково підлягатимуть лінеаризації і у підсумку тензор виражатиме лише лінійні закономірності деформації.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз показує, що використовувані теоретична основа й методи оцінювання деформацій в умовах земної кори мають недостатній ступінь відповідності потенційному інформаційному ресурсу GNSS-даних. Головні аргументації такого висновку наступні.

1. Усі дослідження ґрунтуються на математичній теорії пружності, використовують найпростішу модель лінійно-однорідної нескінченно малої деформації суцільного середовища й реалізуються методом скінченних елементів. Використовувана модель здатна передавати лише афінні перетворення координат вершин скінченних елементів, що зумовлює оцінювання виключно лінійної складової деформації. Нелінійні моделі деформації в дослідницькій практиці не використовуються.

2. Поділ території на скінченні елементи в умовах земної кори здебільшого реалізується формально. Це зумовлює ризики втрати адекватності лінійної моделі реальній деформації і ставить під сумнів достовірність результатів опрацювання даних.

3. Числові оцінки деформації відносяться до модельних поверхонь чи барицентрів скінченних елементів, але не до топографічної поверхні, на якій проявляються досліджувані процеси й доступний їх прямий моніторинг методом GNSS.

4. Використовувані методи не забезпечують оцінювання тривимірних деформацій планетарного масштабу.

**Мета дослідження.** Констатовані аргументації стали мотивацією для пошуку узагальнюючого теоретичного підходу і розроблення методу вирішення проблеми оцінювання тривимірних деформацій, який не обтяжений переліченими недоліками.

**Виклад основного матеріалу. Обґрунтування теоретичного підходу.** Обґрунтуємо вирішення проблеми з точки зору теорії перетворення образів ріманового простору в формі складних диффеоморфних многовидів [17]. Диффеоморфні многовиди – це пара не-ізотропних многовидів однакової розмірності, які зазнають взаємно однозначного і неперервно диференційованого (гомеоморфного) перетворення. Нехай складний многовид – це тривимірний евклідовий простір  $E_3$ , котрий дотичний до всякої точки ріманового простору в формі локальних ортонормованих координатних базисів у декартовій системі. Такий вибір обумовлений тим, що система координат, у якій здійснюється їх моніторинг методом GNSS, є частковим випадком декартової. Визначальну гіпотезу сформулюємо як таку, що перетворення простору мають геофізичне походження і ототожнюються з деформацією.

Перетворення (або відображення) простору – це процес, суть якого полягає у тому, що всякій точці  $M$  простору встановлюється у відповідність точка  $M'$ ;  $M'$  – це відображення  $M$ . Таке відображення завжди буде однозначним, якщо точці  $M$  відповідає одна і лише одна точка  $M'$ . Сукупність  $N$  точок  $M_i$  ( $i = 1, N$ ) якоїсь частини або навіть всього простору, котрі зазнають перетворення, формують відображену область  $\Delta$ . Сукупність точок  $M'_i$  формують область відображення  $\Delta'$ . Допустимо, в просторі  $E_3$  визначено систему координат  $x, y, z$ . Якщо  $\Delta$  неперервна і замкнена, то її повністю визначають точки  $M_i(x_i, y_i, z_i)$ . Якщо внаслідок однозначного відображення  $\Delta$  трансформувалась у  $\Delta'$  і остання залишилась неперервною і замкненою, то її повністю визначають точки  $M'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$ .

У викладеній постановці проблеми загальна теорія не накладає жодних обмежень на розміри чи геометричну форму областей  $\Delta$  і  $\Delta'$ . Це є підставою вважати областю  $\Delta$  топографічну поверхню безвідносно до її масштабу – Землю в цілому або її частину. Тоді можна допустити наступне: точки  $M_i$  – це GNSS-станції, які розміщені на топографічній поверхні, а їх положення задають координати  $x_i = X_i^1$ ,  $y_i = X_i^2$ ,  $z_i = X_i^3$  як такі, що узгоджуються з умовами параметризації Землі системою ITRS.

Якщо координати  $x'_i = X_i'^1$ ,  $y'_i = X_i'^2$ ,  $z'_i = X_i'^3$  задають положення точок  $M'_i$ , які є відображенням  $M_i$ , то трансформацію  $\Delta$  у  $\Delta'$  завжди можна описати рівняннями тієї чи іншої аналітичної форми:

$$\left. \begin{aligned} X'^1 &= u(X^1, X^2, X^3) \\ X'^2 &= v(X^1, X^2, X^3) \\ X'^3 &= w(X^1, X^2, X^3) \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Теорія перетворення образів ріманового простору накладає на базисні функції (1) умови гомеоморфізму – однозначність, неперервність і диференційованість. Але не висуває жодних умов до їх аналітичних форм. Отже, це розкриває перспективу передавати перетворення якими завгодно гладкими або кусково-гладкими функціями, котрі підлягають визначенню за змінами координат  $X_i'^k - X_i^k$  ( $k = \overline{1,3}$ ), і у підсумку виражати деформації нелінійного характеру.

Беручи до уваги останні аргументації, для визначення базисних функцій доцільно використати властивості загальних гармонічних поліномів степені  $n$

$$u_n(x, y, z) = \sum_{p+q+r=n} a_{pqr} x^p y^q z^r. \quad (2)$$

Гармонічні поліноми (2) з  $2n+1$  незалежними коефіцієнтами називають кульовими функціями. Якщо гармонічний поліном  $u$  є сумою незалежних однорідних поліномів  $u_0 + u_1 + \dots + u_n$ , де  $u_i$  має степінь  $i$ , то кожна складова суми – це гармонічний поліном. Тоді  $u$  – це ряд гармонічних поліномів (або ряд кульових функцій). Його легко побудувати, враховуючи, що завжди залишаються незалежними коефіцієнти з індексами  $p+q = n$  і  $p+q+1 = n$ . У розрізі вирішуваного завдання розклад (2) в ряд кульових функцій зводиться до найкращого наближення заданої сукупності емпіричних значень координат шляхом лінійної комбінації системи трьох осцилюючих функцій. Підвищуючи степінь кожної з них, зростає детальність покриття емпіричних даних і підвищується точність апроксимації. Побудова функціональної моделі (1) на такій основі може бути реалізована методом найменших квадратів. Тоді разом з визначенням емпіричних формул розкривається можливість оцінювання ступеня наближення розв'язку до строгого з точки зору умов гомеоморфізму. Отримана на таких засадах система трьох емпіричних формул формує функціональну модель деформації.

На початковий момент часу  $t_0$  система координат  $x_i = X_i^1$ ,  $y_i = X_i^2$ ,  $z_i = X_i^3$  області  $\Delta$  є декартова прямокутна. Метрику області визначає лінійний елемент  $ds$ :

$$ds^2 = \delta_{ij} dX^i dX^j. \quad (3)$$

Ортогональність осей координат зумовлює метричні коефіцієнти  $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$ .

Для відображення  $ds'$  лінійного елемента  $ds$ , яке відповідає перетвореній області  $\Delta'$  на момент часу  $t_1 = t_0 + dt$ ,

$$ds'^2 = e_{ij}dX^i dX^j. \quad (4)$$

Метричні коефіцієнти  $e_{ij}$  генерують симетричну матрицю, яку називають метричним двовалентним коваріантним тензором перетворення (деформації) простору:

$$e_{ij} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{12} & e_{22} & e_{23} \\ e_{13} & e_{23} & e_{33} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Алгоритм розкриття коефіцієнтів тензора (5) такий:

$$\begin{aligned} e_{11} &= \left(\frac{\partial u}{\partial X^1}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial X^1}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial X^1}\right)^2; & e_{22} &= \left(\frac{\partial u}{\partial X^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial X^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial X^2}\right)^2; \\ e_{33} &= \left(\frac{\partial u}{\partial X^3}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial X^3}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial X^3}\right)^2; & e_{12} &= \frac{\partial u}{\partial X^1} \frac{\partial u}{\partial X^2} + \frac{\partial v}{\partial X^1} \frac{\partial v}{\partial X^2} + \frac{\partial w}{\partial X^1} \frac{\partial w}{\partial X^2}; \\ e_{23} &= \frac{\partial u}{\partial X^2} \frac{\partial u}{\partial X^3} + \frac{\partial v}{\partial X^2} \frac{\partial v}{\partial X^3} + \frac{\partial w}{\partial X^2} \frac{\partial w}{\partial X^3}; & e_{13} &= \frac{\partial u}{\partial X^1} \frac{\partial u}{\partial X^3} + \frac{\partial v}{\partial X^1} \frac{\partial v}{\partial X^3} + \frac{\partial w}{\partial X^1} \frac{\partial w}{\partial X^3}. \end{aligned}$$

Беручи до уваги визначальну гіпотезу щодо геофізичного походження зміни метричних властивостей простору, тензор (5) необхідно визнати тензором деформації. Будучи носієм інформації про зміни метричних властивостей простору, тензор спроможний передавати ознаки цих змін за допомогою характеристик деформації з різним геометричним змістом.

**Результати розв'язків.** Аналітичне вираження характеристик деформації одержано застосуванням методів проєктивно-диференціальної геометрії і прийомів описування змін ріманової метрики в дотичному просторі. Взято до уваги, що міра деформації виражається різницею або відношенням метричних форм (3) і (4) [17]. Слідуючи усталеній практиці деформаційного аналізу, характеристики поділено на три групи.

**1. Головні лінійні деформації** – це характеристики зміни форми області  $\Delta$  у заданому напрямі. Таку ознаку деформації виражає коефіцієнт розширення  $\mu$  – він є наслідком відношення  $ds'/ds$ . Для різних напрямів, які задають полярні геоцентричні координати  $(\lambda, \varphi)$ , одержано наступне [18]:

1) коефіцієнт розширення області  $\Delta$  у довільно заданому напрямі

$$\begin{aligned} \mu^2 &= e_{11} \cos^2 \varphi \cos^2 \lambda + e_{22} \cos^2 \varphi \sin^2 \lambda + \\ &+ e_{33} \sin^2 \varphi + e_{12} \cos^2 \varphi \sin 2\lambda + e_{23} \sin 2\varphi \sin \lambda + e_{13} \sin 2\varphi \cos \lambda; \end{aligned} \quad (6)$$

2) коефіцієнти розширення у напрямках осей координат

$$\mu_1^2 = e_{11}, \quad \mu_2^2 = e_{22}, \quad \mu_3^2 = e_{33}; \quad (7)$$

3) коефіцієнти екстремальних розширень у головних ортогональних напрямках у проєкціях на координатні площини, як їх показано на рис. 1:

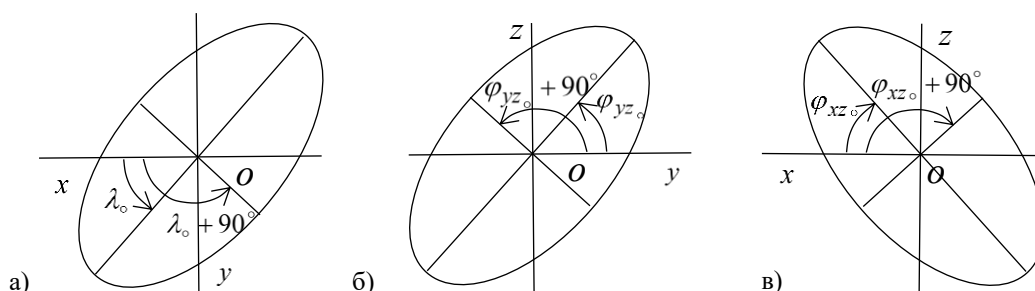


Рис. 1. Напрями екстремальних розширень у проєкціях на координатні площини [18]

- $\lambda_0$  і  $\lambda_0 + 90^\circ$  на площині  $X^1OX^2$  ( $xOy$ , рис. 1, а):

$$\begin{aligned} \mu_{12\max}^2 &= \frac{1}{2} \left( e_{11} + e_{22} + \sqrt{(e_{11} - e_{22})^2 + 4e_{12}^2} \right), \\ \mu_{12\min}^2 &= \frac{1}{2} \left( e_{11} + e_{22} - \sqrt{(e_{11} - e_{22})^2 + 4e_{12}^2} \right), \end{aligned} \tag{8}$$

де  $tg 2\lambda_0 = \frac{2e_{12}}{e_{11} - e_{22}}$ ;

- $\varphi_{23_0}$  і  $\varphi_{23_0} + 90^\circ$  на площині  $X^2OX^3$  ( $yOz$ , рис. 1, б):

$$\begin{aligned} \mu_{23\max}^2 &= \frac{1}{2} \left( e_{22} + e_{33} + \sqrt{(e_{22} - e_{33})^2 + 4e_{23}^2} \right), \\ \mu_{23\min}^2 &= \frac{1}{2} \left( e_{22} + e_{33} - \sqrt{(e_{22} - e_{33})^2 + 4e_{23}^2} \right), \end{aligned} \tag{9}$$

де  $tg 2\varphi_{23_0} = \frac{2e_{23}}{e_{22} - e_{33}}$ ;

- $\varphi_{13_0}$  і  $\varphi_{13_0} + 90^\circ$  на площині  $X^1OX^3$  ( $xOz$ , рис. 1, в):

$$\begin{aligned} \mu_{13\max}^2 &= \frac{1}{2} \left( e_{11} + e_{33} + \sqrt{(e_{11} - e_{33})^2 + 4e_{13}^2} \right), \\ \mu_{13\min}^2 &= \frac{1}{2} \left( e_{11} + e_{33} - \sqrt{(e_{11} - e_{33})^2 + 4e_{13}^2} \right), \end{aligned} \tag{10}$$

де  $tg 2\varphi_{13_0} = \frac{2e_{13}}{e_{11} - e_{33}}$ ;

4) коефіцієнти екстремальних розширень ( $\mu_{12\min}^2, \mu_{\max}^2, \mu_{\min}^2$ ), які у просторі задає тріада головних ортогональних напрямів ( $\lambda_0 + 90^\circ, \varphi_0, \varphi_0 + 90^\circ$ ):

$$\mu_{\max}^2 = \frac{1}{4} (e_{11} + e_{22} + 2e_{33} + \gamma_{12}^{(m)} + \gamma), \quad \mu_{\min}^2 = \frac{1}{4} (e_{11} + e_{22} + 2e_{33} + \gamma_{12}^{(m)} - \gamma), \tag{11}$$

де 
$$\gamma = \sqrt{\left(e_{11} + e_{22} - 2e_{33} + \gamma_{12}^{(m)}\right)^2 + 4\left(2e_{23}\sqrt{\frac{\gamma_{12}^{(m)} - \gamma_{12}^{(1)}}{2\gamma_{12}^{(m)}}} + 2e_{13}\sqrt{\frac{\gamma_{12}^{(m)} + \gamma_{12}^{(1)}}{2\gamma_{12}^{(m)}}}\right)^2}; \gamma_{12}^{(m)} = \sqrt{\left(\gamma_{12}^{(1)}\right)^2 + \left(\gamma_{12}^{(2)}\right)^2}$$

максимальний зсув у площині  $X^1OX^2$  ( $xOy$ );  $\gamma_{12}^{(1)} = e_{11} - e_{22}$  і  $\gamma_{12}^{(2)} = 2e_{12}$  – його

компоненти; 
$$tg 2\varphi_0 = 2 \frac{2e_{23}\sqrt{\frac{\gamma_{12}^{(m)} - \gamma_{12}^{(1)}}{2\gamma_{12}^{(m)}}} + 2e_{13}\sqrt{\frac{\gamma_{12}^{(m)} + \gamma_{12}^{(1)}}{2\gamma_{12}^{(m)}}}}{e_{11} + e_{22} - 2e_{33} + \gamma_{12}^{(m)}}.$$

**2. Дилатація** – це характеристика зміни об’єму області  $\Delta$ . У практиці деформаційного аналізу для оцінювання дилатації використовують коефіцієнти абсолютного  $\theta_{abs}$  або відносного  $\theta_{rel}$  об’ємного розширення. Аналітичне вираження  $\theta_{abs}$  і  $\theta_{rel}$  досягається складанням різних співвідношень елементів об’єму  $dV = \sqrt{\delta} dX^1 dX^2 dX^3$  області  $\Delta$  і  $dV' = \sqrt{e} dX^1 dX^2 dX^3$  області  $\Delta'$ . Зокрема, характеристикою абсолютного об’ємного розширення є інваріант  $\theta_{abs} = \frac{dV'}{dV} = \sqrt{e}$ , де  $e = \det e_{ij}$  – це детермінант тензора  $e_{ij}$ :

$$\theta_{abs}^2 = e_{11}e_{22}e_{33} + 2e_{12}e_{13}e_{23} - e_{11}e_{23}^2 - e_{22}e_{13}^2 - e_{33}e_{12}^2. \tag{12}$$

Характеристика відносного об’ємного розширення є наслідком відношення 
$$\theta_{rel}^2 = \frac{dV'^2 - dV^2}{dV^2}:$$

$$\theta_{rel}^2 = I_1 - I_2 + I_3 - 1. \tag{13}$$

З трьох інваріантів  $I_1 = e_{11} + e_{22} + e_{33}$ ,  $I_2 = e_{11}e_{22} + e_{11}e_{33} + e_{22}e_{33} - e_{12}^2 - e_{13}^2 - e_{23}^2$  та  $I_3 = e_{11}e_{22}e_{33} + 2e_{12}e_{13}e_{23} - e_{11}e_{23}^2 - e_{22}e_{13}^2 - e_{33}e_{12}^2$  останній асоціюється з абсолютним коефіцієнтом об’ємного розширення (12). Подані тут узагальнені вираження дилатації використовують в задачах нелінійної теорії деформації [17].

Еквівалентні щодо (12) та (13) вираження для  $\theta_{abs}$  і  $\theta_{rel}$  одержано як результат добутку рівнянь для коефіцієнтів екстремальних розширень  $(\mu_{12\min}^2, \mu_{\max}^2, \mu_{\min}^2)$ , які відповідають тріаді головних ортогональних напрямів  $(\lambda_0 + 90^\circ, \varphi_0, \varphi_0 + 90^\circ)$  [19]:

$$\theta_{abs}^2 = e_{11}e_{22}e_{33} - e_{33}e_{12}^2 + \frac{1}{2\gamma_{12}^{(m)}} \left( 2e_{12}e_{13}e_{23} \left( \gamma_{12}^{(m)} - e_{11} - e_{22} \right) - e_{11}e_{23}^2 \left( \gamma_{12}^{(m)} - e_{11} \right) - e_{22}e_{13}^2 \left( \gamma_{12}^{(m)} - e_{22} \right) + \left( e_{13}^2 + e_{23}^2 \right) \left( 2e_{12}^2 - e_{11}e_{22} \right) \right); \tag{14}$$

$$\theta_{rel}^2 = e_{11} + e_{22} + e_{33} - e_{11}e_{22} - e_{11}e_{33} - e_{22}e_{33} + e_{12}^2 + e_{11}e_{22}e_{33} - e_{33}e_{12}^2 + \frac{1}{2\gamma_{12}^{(m)}} \left( 2e_{12}e_{13}e_{23} \left( \gamma_{12}^{(m)} + 2 - e_{11} - e_{22} \right) - e_{11}e_{23}^2 \left( \gamma_{12}^{(m)} + 1 - e_{11} \right) - e_{22}e_{13}^2 \left( \gamma_{12}^{(m)} + 1 - e_{22} \right) + e_{13}^2 \left( \gamma_{12}^{(m)} + e_{11} (1 - e_{22}) + 2e_{12}^2 \right) + e_{23}^2 \left( \gamma_{12}^{(m)} + e_{22} (1 - e_{11}) + 2e_{12}^2 \right) \right) - 1. \tag{15}$$

Результати розв’язків (12), (13) чи, рівною мірою (14), (15), придатні для оцінювання дилатації будь-якого характеру, як це спроможна передати гомеоморфна модель (1).

Для оцінювання дилатації з точки зору лінійної моделі теорії пружності беруть до уваги нескінченно малі центроафінні перетворення просторових тіл. Наслідком лінійного перетворення координат є детермінант, який ототожнюється виключно з інваріантом  $I_1 = e_{11} + e_{22} + e_{33}$ . Саме інваріант  $I_1$  використовують для оцінювання дилатації в геодинаміці. Такий підхід спроможний забезпечити лише локальну лінійну апроксимацію априорі невідомої фактичної деформації. Спроба використати для побудови функціональної моделі ті чи інші нелінійні базисні функції жодним чином не забезпечує очікуваного ефекту. Нелінійні функції все одно підлягають лінеаризації. Адже у детерміністичних відношеннях «функція-тензор» на такій основі присутня не функція, яка передає деформацію, а її локальна лінійна апроксимація у нескінченно малому масштабі.

**3. Жорсткі обертання Землі** можуть проявлятися сумісно з головними лінійними деформаціями та дилатацією. Їх аналітичне вираження ґрунтується на змінах в системі параметризації простору в частині порушення ортогональності осей координат – на момент часу  $t_1$  система  $X^i$  може набути властивостей косокутної декартової. Підтвердити або, рівною мірою, спростувати таку гіпотезу можна на основі наступних незаперечних геометричних аргументацій.

Довжини проєкцій лінійного елемента  $ds$  на осі координат системи  $E_3$  з метрикою, яку закладено у тензор  $g_{ij}$ , виражають добутки  $ds^{(i)} = \sqrt{g_{ii}}dX^i$ . Вони є прямим наслідком квадратичної форми  $ds^2 = g_{ij}dX^i dX^j$ . Значення індексу  $i$  в проєкції  $ds^{(i)}$  ідентифікує її належність осі  $X^i$ . Кути  $\eta_{ij}$  між парами проєкцій  $ds^{(i)}$  та  $ds^{(j)}$ , як це ілюструє рис. 2, виражає відношення [17]

$$\cos\eta_{ij} = \frac{g_{ij}}{\sqrt{g_{ii}g_{jj}}}. \tag{16}$$

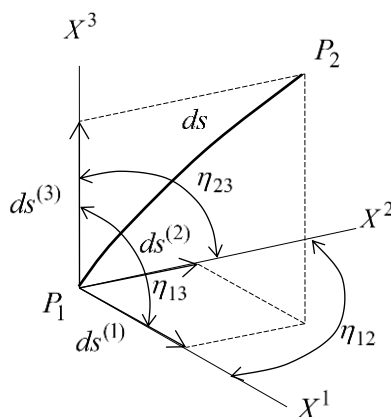


Рис. 2. Кути між проєкціями дуги  $ds$  на осі координат [20]

У початковому стані на момент часу  $t_0$  система координат прямокутна, тому метричні коефіцієнти  $g_{ij} = \delta_{ij}$  і  $\eta_{ij}^{(0)} = 90^\circ$ . Якщо на момент часу  $t_1$  у просторі відбулись перетворення такого ступеня, що це призвело до зміни його метрики, то  $g_{ij} = e_{ij}$ . Якщо  $e_{ij} \neq 0$ , то з формули (16) слідує, що  $\eta_{ij}^{(1)} \neq 90^\circ$ . Отже, кути  $\eta_{ij}^{(1)}$  слід інтерпретувати як абсолютні міри косокутної системи координат:



$$\cos \eta_{ij}^{(1)} = \frac{e_{ij}}{\mu_i \mu_j}. \quad (17)$$

Тоді кути  $\varepsilon_{ij}^{(1)} = 90^\circ - \eta_{ij}^{(1)}$  виражають зміну прямого кута між парною проєкцій лінійного елемента  $ds$  на осі координат відносно початкового стану на момент  $t_0$ :

$$\sin \varepsilon_{ij}^{(1)} = \frac{e_{ij}}{\mu_i \mu_j}. \quad (18)$$

Отже, з погляду тензорного аналізу,  $\varepsilon_{ij}^{(1)}$  – це характеристики кутових спотворень ортогональної системи координат [17].

У статті [20] подано результати аналітичного вираження кутів  $\eta_{ij}^{(1)}$  і  $\varepsilon_{ij}^{(1)}$  у відношенні проєкцій лінійного елемента  $ds$  на координатні площини. Розв'язки ґрунтуються на вираженні взаємозв'язків диференціалів проєкцій пари осей координат на окремій площині станом на момент  $t_1$  у системі координат цієї площини станом на момент  $t_0$ . Одержано еквівалентні щодо (17), (18) аналітичні вираження кутів:

$$\operatorname{tg} \eta_{ij}^{(1)} = \frac{\sqrt{e}}{e_{ij}}; \quad (19)$$

$$\operatorname{ctg} \varepsilon_{ij}^{(1)} = \frac{\sqrt{e}}{e_{ij}}, \quad (20)$$

де  $e$  – детермінант тензора (5).

Система параметризації будь-якої області простору завжди пов'язана з її станом. В умовах Землі неможливо вибрати систему координат, яка була б жорстко пов'язана з тілом планети і залишалась незмінною, коли остання деформується. Саме такою є система ITRS – вона жорстко прив'язана до Землі й зазнає трансформацій, які по мірі суттєвого вираження деформацій планети враховуються у формі реалізацій ITRF (International Terrestrial Reference Frame) [21; 22]. Виходячи з таких умов, потрібно констатувати наступне: кути  $\varepsilon_{ij}^{(1)}$  – це параметри, які разом з кутовими спотвореннями системи координат характеризують жорстке обертання Землі у напрямках між парами координатних осей  $X^i X^j$  протягом періоду  $dt$ . Одержані формули враховують нелінійні ефекти деформації, наскільки їх спроможна передати функціональна модель (1) за посередництва тензора (5).

**Висновки.** Проблема оцінювання тривимірних деформацій Землі за GNSS-даними розглянута з позицій теорії перетворень образів ріманового простору в формі складних диффеоморфних многовидів. Зокрема, використано властивості дотичного евклідового простору з його параметризацією прямокутною декартовою системою координат. Саме така система параметризації закладена в основу ITRS, у якій реалізовується моніторинг координат методом GNSS. Використаний теоретичний підхід забезпечує пряме використання координат у системі ITRS і моделювання деформації топографічної поверхні Землі у тривимірному просторі з наступним оцінюванням тривимірних тензорів і пов'язаних з ними інваріантів, які віднесені до цієї поверхні. Одержано робочі формули для оцінювання головних лінійних деформацій, дилатації та жорсткого обертання Землі. Сформульовані положення, алгоритм побудови функціональної моделі на засадах гомеоморфізму перетворень і одержані робочі формули в сукупності утворюють метод оцінювання тривимірних деформацій Землі. Метод узагальнено для оцінювання нелінійних деформацій.

**Список використаних джерел**

1. IAG (International Association of Geodesy). Commission 3 – Earth Rotation and Geodynamics [Electronic resource]. – Access mode: [http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/handbook\\_2012/333\\_Commission\\_3.pdf](http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/handbook_2012/333_Commission_3.pdf).
2. Kiamehr, R. Analysis of surface deformation patterns using 3D finite element method: A case study in the Skane area, Sweden / R. Kiamehr, L.E. Sjoberg // *Journal of Geodynamics*. – 2005. – № 39(4). – P. 403-412. DOI: [doi.org/10.1016/j.jog.2005.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.03.001).
3. Pietrantonio, G. Three-dimensional strain tensor estimation by GPS observations: methodological aspects and geophysical applications / G. Pietrantonio, F. Riguzzi // *Journal of Geodynamics*. – 2004. – № 38(1). – P. 1-18. DOI: [doi.org/10.1016/j.jog.2004.02.021](https://doi.org/10.1016/j.jog.2004.02.021).
4. Savage, J. C. Strain accumulation and rotation in the Eastern California Shear Zone / J. C. Savage, W. Gan, J. L. Svarc // *Journal of Geophysical Research*. – 2001. – № 106(B10). – Pp. 21995-22007. DOI: [doi.org/10.1029/2000JB000127](https://doi.org/10.1029/2000JB000127).
5. Hammond, W.C. Crustal deformation across the Sierra Nevada, northern Walker Lane, Basin and Range transition, western United States measured with GPS, 2000-2004. / W.C. Hammond, W. Thatcher // *Journal of Geophysical Research*. – 2007. – № 112 (B5), B05411. DOI: [10.1029/2006JB004625](https://doi.org/10.1029/2006JB004625).
6. Kremer, C. Geodetic constraints on contemporary deformation in the northern Walker Lane: 2. Velocity and strain rate tensor analysis / C. Kremer, G. Blewitt, W.C. Hammond // *Late Cenozoic structure and evolution of the Great Basin – Sierra Nevada transition* / eds. J. S. Oldow, P. H. Cashman. – 2009. – Vol. 447. – P. 17-31. DOI: [10.1130/2009.2447\(02\)](https://doi.org/10.1130/2009.2447(02)).
7. Kremer, C. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model / C. Kremer, G. Blewitt, E. C. Klein // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2014. – № 15 (10). – Pp. 3849-3889. DOI: [10.1002/2014GC005407](https://doi.org/10.1002/2014GC005407).
8. Altiner, Y. Analytical surface deformation theory for detection of the Earth's crust movements / Y. Altiner. – Berlin : Springer, 1999.
9. Grafarend, E.W. Intrinsic deformation analysis of the Earth's surface based on displacement fields derived from space geodetic measurements. Case studies: present-day deformation patterns of Europe and of the Mediterranean area (ITRF data sets) / E. W. Grafarend, B. Voosoghi // *Journal of Geodesy*. – 2003. – № 77. – P. 303-326. DOI: [10.1007/s00190-003-0329-2](https://doi.org/10.1007/s00190-003-0329-2).
10. Xu, P. L. Statistics and geometry of the eigenspectra of three-dimensional second-rank symmetric random tensor / P. L. Xu, E. W. Grafarend // *Geophysical Journal International*. – 1996. – № 127(3). – P. 744-756. DOI: [10.1111/j.1365-246X.1996.tb04053.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb04053.x).
11. Present-day tectonics in and around the Adria plate inferred from GPS measurements / Y. Altiner, Z. Bacic, T. Basic, A. Coticchia, M. Medved, M. Mulic, B. Nurce // *Geological Society of America Special Paper*. – 2006. – № 409. – P. 43-55. DOI: [10.1130/2006.2409\(03\)](https://doi.org/10.1130/2006.2409(03)).
12. Dermanis, A. Fundamentals of surface deformation and application to construction monitoring / A. Dermanis // *Applied Geomatics*. – 2011. – № 3. – P. 9-22. DOI: [doi.org/10.1007/s12518-010-0040-y](https://doi.org/10.1007/s12518-010-0040-y).
13. Grafarend, E.W. The transition from three-dimensional embedding to two-dimensional Euler-Lagrange deformation tensor of the second kind: variation of curvature measures / E. W. Grafarend // *Pure and Applied Geophysics*. – 2012. – № 169. – P. 1457-1462. DOI: [10.1007/s00024-011-0419-7](https://doi.org/10.1007/s00024-011-0419-7).
14. Hossainali, M. Comprehensive approach to the analysis of the 3D kinematics deformation with application to the Kenai Peninsula / M. Hossainali, M. Becker, E. Groten // *Journal of Geodetic Science*. – 2011. – № 1 (1). – P. 59-73. DOI: [10.2478/v10156-010-0008-1](https://doi.org/10.2478/v10156-010-0008-1).
15. Moghtased-Azar, K. Surface deformation analysis on dense GPS networks based on intrinsic geometry: deterministic and stochastic aspects / K. Moghtased-Azar, E. W. Grafarend // *Journal of Geodesy*. – 2009. – № 83. – P. 431-454. DOI: [10.1007/s00190-008-0252-7](https://doi.org/10.1007/s00190-008-0252-7).
16. Voosoghi, B. Intrinsic deformation analysis of the Earth's surface based on 3-dimensional displacement fields derived from space geodetic measurements [Electronic resource] : dissertation / B. Voosoghi ; Institute of Geodesy, University of Stuttgart. – 2000. – Access mode: <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2000/722/pdf/voosoghi.pdf>.
17. Sokolnikoff, I. S. Tensor analysis: Theory and applications to geometry and mechanics of continua / I. S. Sokolnikoff. – New York, London, Sydney : John Wiley & Sons, 1964.
18. Tadyeyev, O. A. Evaluation of three-dimensional deformation fields of the Earth by methods of the projective differential geometry. The main linear deformation / O. A. Tadyeyev // *Geodynamics*. – 2016. – № 2(21). – P. 7-17. DOI: [doi.org/10.23939/jgd2016.02.007](https://doi.org/10.23939/jgd2016.02.007).

19. Тадєєв, О. Оцінювання тривимірних деформаційних полів Землі методами проєктивно-диференціальної геометрії. Дилатаційні поля Землі / О. Тадєєв // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2017. – № I(33). – С. 53-60.
20. Tadyeyev, O. Evaluation of three-dimensional deformation fields of the Earth by methods of the projective differential geometry. Rigid rotations of the Earth / O. Tadyeyev // *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. – 2016. – № 84. – P. 25-38. DOI: doi.org/10.23939/istcgcap2016.02.025.
21. Moritz, H. Earth's Rotation. Theory and estimations / H. Moritz, I. I. Muller. – New York : Ungar, 1987.
22. IERS Conventions 2010. IERS Technical Note [Electronic resource] / eds. G. Petit, B. Luzum. – Frankfurt am Main : Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. – Access mode: [http://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechNote36/tn36\\_031.pdf](http://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechNote36/tn36_031.pdf).

### References

1. IAG (International Association of Geodesy). Commission 3 – Earth Rotation and Geodynamics. [http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/handbook\\_2012/333\\_Commission\\_3.pdf](http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/handbook_2012/333_Commission_3.pdf).
2. Kiamehr, R., Sjöberg, L.E. (2005). Analysis of surface deformation patterns using 3D finite element method: A case study in the Skane area, Sweden. *Journal of Geodynamics*, 39(4), 403–412. doi.org/10.1016/j.jog.2005.03.001.
3. Pietrantonio, G., Riguzzi, F. (2004). Three-dimensional strain tensor estimation by GPS observations: methodological aspects and geophysical applications. *Journal of Geodynamics*, 38(1), 1–18. doi.org/10.1016/j.jog.2004.02.021.
4. Savage, J.C., Gan, W., Svarc, J.L. (2001). Strain accumulation and rotation in the Eastern California Shear Zone. *Journal of Geophysical Research*, 106(B10), 21995–22007. doi.org/10.1029/2000JB000127.
5. Hammond, W.C., Thatcher, W. (2007). Crustal deformation across the Sierra Nevada, northern Walker Lane, Basin and Range transition, western United States measured with GPS, 2000-2004. *Journal of Geophysical Research*, 112 (B5), B05411. doi: 10.1029/2006JB004625.
6. Kremer, C., Blewitt, G., Hammond, W.C. (2009). Geodetic constraints on contemporary deformation in the northern Walker Lane: 2. Velocity and strain rate tensor analysis. In Oldow, J.S., Cashman, P.H. (Eds.), *Late Cenozoic structure and evolution of the Great Basin – Sierra Nevada transition*, 17–31. Geological Society of America Special Paper 447. doi: 10.1130/2009.2447(02).
7. Kremer, C., Blewitt, G., Klein, E.C. (2014). A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15 (10), 3849–3889. doi:10.1002/2014GC005407.
8. Altiner, Y. (1999). *Analytical surface deformation theory for detection of the Earths crust movements*. Berlin: Springer.
9. Grafarend, E.W., Voosoghi, B. (2003). Intrinsic deformation analysis of the Earth's surface based on displacement fields derived from space geodetic measurements. Case studies: present-day deformation patterns of Europe and of the Mediterranean area (ITRF data sets). *Journal of Geodesy*, 77, 303–326. doi: 10.1007/s00190-003-0329-2.
10. Xu, P.L., Grafarend, E.W. (1996). Statistics and geometry of the eigenspectra of three-dimensional decond-rank symmetric random tensor. *Geophysical Journal International*, 127(3), 744–756. doi:10.1111/j.1365-246X.1996.tb04053.x.
11. Altiner, Y., Basic, Z., Basic, T., Coticchia, A., Medved, M., Mulic, M., Nurce, B. (2006). Present-day tectonics in and around the Adria plate inferred from GPS measurements. In Dilek, Y., Pavlides, S. (Eds.), *Postcollisional tectonics and magnetism in the Mediterranean region and Asia*, 43–55. Geological Society of America Special Paper 409. doi: 10.1130/2006.2409(03).
12. Dermanis, A. (2011). Fundamentals of surface deformation and application to construction monitoring. *Applied Geomatics*, 3, 9–22. doi.org/10.1007/s12518-010-0040-y.
13. Grafarend, E.W. (2012). The transition from three-dimensional embedding to two-dimensional Euler-Lagrange deformation tensor of the second kind: variation of curvature measures. *Pure and Applied Geophysics*, 169, 1457–1462. doi: 10.1007/s00024-011-0419-7.
14. Hossainali, M., Becker, M., Groten, E. (2011). Comprehensive approach to the analysis of the 3D kinematics deformation with application to the Kenai Peninsula. *Journal of Geodetic Science*, 1(1), 59–73. doi: 10.2478/v10156-010-0008-1.

15. Moghtased-Azar, K., Grafarend, E.W. (2009). Surface deformation analysis on dense GPS networks based on intrinsic geometry: deterministic and stochastic aspects. *Journal of Geodesy*, 83, 431–454. doi: 10.1007/s00190-008-0252-7.
16. Voosoghi, B. (2000). Intrinsic deformation analysis of the Earth's surface based on 3-dimensional displacement fields derived from space geodetic measurements. *PhD thesis*. Institute of Geodesy, University of Stuttgart, Germany. <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2000/722/pdf/voosoghi.pdf>.
17. Sokolnikoff, I.S. (1964). *Tensor analysis: Theory and applications to geometry and mechanics of continua*. New York, London, Sydney, John Wiley & Sons.
18. Tadyeyev, O.A. (2016). Evaluation of three-dimensional deformation fields of the Earth by methods of the projective differential geometry. The main linear deformation. *Geodynamics*, 2(21), 7–17. doi.org/10.23939/jgd2016.02.007.
19. Tadyeyev, O. (2017). Otsiniuvannia tryvymirnykh deformatsiinykh poliv Zemli metodamy proektyvno-dyferentsialnoi heometrii. Dylatatsiini polia Zemli [Evaluation of three-dimensional deformation fields of the Earth by methods of the projective differential geometry. Dilatation fields of the Earth]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Modern Achievements of Geodetic Science and Industry*, I(33), 53–60.
20. Tadyeyev, O. (2016). Evaluation of three-dimensional deformation fields of the Earth by methods of the projective differential geometry. Rigid rotations of the Earth. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 84, 25–38. doi.org/10.23939/istcgcap2016.02.025.
21. Moritz, H., Muller I.I. (1987). *Earth's Rotation. Theory and estimations*. New York: Ungar.
22. Petit, G., Luzum, B. (Eds.). (2010). *IERS Conventions 2010. IERS Technical Note; 36*. – Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. Retrieved from [http://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechNote36/tn36\\_031.pdf](http://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechNote36/tn36_031.pdf).

Отримано 12.12.2023

UDC 528.22+551.24

### **Oleksandr Tadyeyev**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Geodesy and Cartography  
National University of Water and Environmental Engineering (Rivne, Ukraine)

E-mail: [o.a.tadyeyev@nuwm.edu.ua](mailto:o.a.tadyeyev@nuwm.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4566-0160>. ResearcherID: B-6081-2019

## **PROSPECTS FOR EVALUATION OF THREE-DIMENSIONAL DEFORMATIONS OF THE EARTH BASED ON DATA FROM GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS**

*Presented in the article information is of a scientific and methodical character. Accumulation of coordinate monitoring data in networks of permanent GNSS stations made it possible to increase the efficiency of solving of many problems of modern geodynamics. At the same time, their use made it necessary to rethink traditional theoretical approaches to solving of the problem, in particular, in terms of developing methods for evaluation of three-dimensional deformations. The analysis of the used theoretical approaches and methods for evaluation of three-dimensional deformations of the Earth in this article are presented. The insufficient degree of their correspondence to the potential information resource of GNSS data is substantiated. The method for evaluation of deformations of the Earth from the standpoint of the theory of transformations of Riemannian space images in the form of complex diffeomorphic manifolds is proposed. Properties of complex manifolds in the form of a tangent Euclidean space, which is parameterized by a rectangular Cartesian coordinate system, are used. This choice is justified by its identity with the ITRS system, which is used to monitoring of coordinates by the GNSS method. The algorithm for constructing a functional model of deformation based on the homeomorphism of transformations is formulated. The method involves the direct use of coordinates in the ITRS system and modeling of deformations of the curvilinear topographic surface of the Earth in three-dimensional space. The method provides evaluation of three-dimensional deformation tensors and related invariants, which belong to the topographic surface. Working formulas for evaluation of main linear deformations, dilatation and rigid rotation of the Earth have been obtained. The method is generalized for evaluation of nonlinear deformations.*

**Keywords:** GNSS; ITRS; deformation; metric tensor; diffeomorphic manifolds; homeomorphism.

Fig.: 2. References: 22.

**ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ  
НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ  
«ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**

**Шановні дописувачі!**

Для подання статті необхідно спочатку надіслати статтю та інформацію про автора, з яким контактувати щодо публікації статті, оформлені за встановленими вимогами, для попереднього розгляду редакційною колегією журналу «Технічні науки та технології». За умови відповідності статті спеціальностям, за якими акредитовано журнал, відповідності нормам академічної доброчесності за результатами перевірки на плагіат, позитивної незалежної рецензії від призначеного редакційною колегією рецензента, стаття розміщується в макеті журналу.

Редакційна колегія забезпечує розгляд та незалежне рецензування поданих до публікації матеріалів вченими, які мають науковий ступінь та здійснюють дослідження за спеціальністю, що відповідає тематиці поданого для публікації матеріалу, і є авторами (спів-авторами) загальною кількістю не менше трьох публікацій у наукових виданнях, включених до категорії «А» та/або категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, та/або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus за відповідною спеціальністю, оприлюднених упродовж останніх п'яти років.

Опублікування наукових статей у журналі «Технічні науки та технології» є платним. Вартість публікації наукової статті становить:

- **60 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам потрібна паперова версія журналу);
- **40 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам достатньо електронної версії журналу).

Остаточна вартість публікації формується після готовності електронного макету журналу та повідомляється автору, відповідальному за публікацію статті. Оплата підтверджується квитанцією.

**УМОВИ ПУБЛІКАЦІЇ, ВИМОГИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ, РЕКВІЗИТИ  
ОПЛАТИ ТА ОСТАННІ НОМЕРИ НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ  
ТА ТЕХНОЛОГІЇ» РОЗМІЩЕНО НА САЙТІ»: <http://tst.stu.cn.ua/>**

**Контактна інформація:**

Мороз Наталія Вікторівна

Тел. моб.: (0462) 665-225

E-mail: [tst.technical.sj@gmail.com](mailto:tst.technical.sj@gmail.com)

**Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор.  
Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи,  
що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.**

*Редакція розглядає надходження публікації та супровідних документів  
як згоду дописувача (ів) щодо передачі авторського права на використання твору  
(тиражування, розповсюдження тощо).*

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

*НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ*

*№ 4(34)*

Відповідальний за випуск  
Технічний редактор, відповідальна за випуск  
Редактор  
Комп'ютерна верстка

С. П. Сапон  
Н. В. Мороз  
О. С. Смелова  
О.П. Журко

Підписано до друку 26.12.2023. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 32,32.  
Тираж 100 пр. Замовлення № 1/24.

---

Редакційно-видавничий відділ Національного університету «Чернігівська політехніка»  
14035, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції серія ДК № 7128 від 18.08.2020 р.