

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

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



# ***ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ***

***НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ***

***№ 3(37)***

Чернігів 2024

УДК 62:67.05

T38

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-3(37)

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 11 від 28.10.2024 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», 2024. – № 3(37). – 290 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:**

Болотов М. Г., 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. С., 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, провідний науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки.

Повстяной О. Ю., доктор технічних наук, доцент, Луцький національний технічний університет;

Сапон С. П., кандидат технічних наук, доцент, Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського;

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»;

Michał Bembek, Doctor of Engineering Sciences, Professor, AGH University of Krakow (Krakow, Poland).

**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, Київський національний торговельно-економічний університет;

Мелешко Є. В., доктор технічних наук, доцент, Центральноукраїнський 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**

Вінніков 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»;

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

Ромеро-Кадавал 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, Луцький національний технічний університет;

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;

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;

Сахно С. Ю., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

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.

© НУ «Чернігівська політехніка», 2024



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 № 3(37)***

Chernihiv 2024

UDC 62:67.05

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-3(37)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv Polytechnic National University (protocol № 11 dated 28.10.2024). 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, 2024. – № 3(37). – 290 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:**

Bolotov M.G., 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;

Dmytriiiev 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, leading scientific coworker, State Research Institute of Tests and Certification of Armament and Military

Technique;

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

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

Michał Bemberek, Doctor of Engineering Sciences, Professor, AGH University of Krakow (Krakow, Poland).

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;

Kryvouchko O.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National 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, Lutsk National Technical 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.L., 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;

Cheliabieva 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;

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

Palianysia 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;

Sakhno E.Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

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.

© Chernihiv Polytechnic National University, 2024



## ЗМІСТ

РОЗДІЛ I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО  
ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>Пилипенко О. М., Ночвай В. М., Яновський В. А.</i> Підвищення ефективності обробки внутрішніх канавок ультразвуковим різанням .....	9
<i>Клименко С., Манохін А., Клименко С., Мельничук Ю., Чумак А., Конєйкіна М., Береснев В.</i> Багатошарові леговані нітридні покриття системи TiAlN .....	18
<i>Книш О., Стрілецький А., Млинко О.</i> Геометричний синтез механізмів привода стола з поступальним рухом та проколювачів ниткошвейної машини.....	28
<i>Регей І., Книш О., Бегень П., Михайлів Ю.</i> Аналітичні дослідження силового навантаження привода натискної плити у штанцювальному пресі.....	37
<i>Орисенко О., Шека О.</i> Математичне моделювання вібраційної площадки з регульованими за жорсткістю пружними опорами. ....	45
<i>Tuleja P.</i> Reducing the carbon footprint in the use of compressed air in automation.....	58
<i>Плис В., Дегтярьов І., Нешта А., Метенко О.</i> Розроблення конструкції верстатного пристрою для оброблення каналів апаратів спрямовувальних відцентрових насосів. ....	64
<i>Цимбаленко І.</i> Гальмівні системи промислових навантажувачів. ....	79
<i>Чолак І., Карвацький А.</i> Прогнозування фізичних властивостей нанокompозитів на основі поліетилену методами молекулярної динаміки.....	89
<i>Kovaluk D., Semjon J., Sabol M., Hrabcak M.</i> Design of robotized educational workplace in off-line environment with Yaskawa robot.....	101
<i>Melko J., Jánoš R.</i> Design of an energy-saving engine for a vehicle powered by pneumatic pistons .....	108
<i>Pilát P., Semjon J., Varga J.</i> Design of the four-wheeled mobile robotic platform for decontamination tasks.....	116

## РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Марчук Г., Коротун О., Левківський В., Українець М.</i> Дослідження методів штучного інтелекту для створення інтелектуальних ігрових агентів .....	122
<i>Бялий М. О.</i> Оцінка інформативності геоінформаційних систем військового призначення. ...	132
<i>Міщенко М. В.</i> Функціональна модель системи виявлення та прогнозування кіберзагроз для корпоративних комп'ютерних мереж з використанням експертних оцінок. ....	143
<i>Прищепя В. О., Задорожній А. О.</i> Дослідження сучасних напрямів моделювання процесів реагування на надзвичайні ситуації.....	153
<i>Резніченко О., Ляшенко О., Архипова В.</i> Вибір між реляційними та нереляційними базами даних.....	162

## РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Філінська Т., Терещук М., Філінська А.</i> Дослідження відходів авокадо як вторинних сировинних ресурсів багатоцільового призначення.....	170
<i>Хребтань О.</i> Дослідження асортименту м'ясо-рослинних консервів виробництва ТОВ «Фабрика Здорово», м. Чернігів.....	181

## РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

<i>Казимир В. В., Приступа А. Л., Ятченко Є. М.</i> Оптимальне керування нелінійною динамічною системою .....	196
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

<i>Петраковська О. С., Михальова М. Ю.</i> Трансформація понять і завдань функціонального зонування території.....	208
<i>Шаповал С. П., Пришляк Ю. В., Гулай Б. І., Генсецький М. П., Касинець М. Є.</i> Енергоефективні гібридні сонячні колектори інтегровані у світлопрозорі конструкції будівель.....	217
<i>Заворотний С. М.</i> Аналіз сучасних інженерно-геодезичних методів моніторингу будівель та споруд об'єктів історико-культурної спадщини.....	228
<i>Керш В. Я., Тихонюк С. А.</i> Штукатурний склад для будівель з вапняку-черепашнику.....	236
<i>Крячок С. Д.</i> Застосування безпілотних літальних апаратів для виконання радіаційного моніторингу.....	247
<i>Кухтар Д. В.</i> Джерела даних супутникового радіолокаційного знімання.....	262
<i>Лопушанський О. М., Смолій К. Б., Ванчура Р. Б., Лопушанська М. Р., Лопушанська Ю. М.</i> Побудова топографічної поверхні світового океану в регіоні північного моря.....	273
<i>Маслій Л.О.</i> Основи формального представлення знань про земельне адміністрування в Україні.....	281
<b>ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ.....</b>	<b>289</b>

## CONTENT

SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE  
AND MACHINE BUILDING

<i>Pylypenko O., Nochvai V., Yanovsky V.</i> Increasing the efficiency of processing internal grooves by ultrasonic cutting .....	9
<i>Klymenko S., Manokhin A., Klymenko S., Melniychuk Yu., Chumak A., Kopieikina M., Beresnev V.</i> Multilayer doped nitride coatings of the tialn system .....	18
<i>Knysh O., Striletskyi A., Mlynko O.</i> Geometric synthesis of mechanisms for the table drive with linear motion and perforators in a thread-sewing machine .....	28
<i>Rehei I., Knysh O., Behen P., Mykhayliv Y.</i> Analytical researches of the pressure plate drive power load in a die cutting press .....	37
<i>Orysenko O., Sheka O.</i> Mathematical modeling of vibration platform with rigidity-adjustable elastic supports .....	45
<i>Tuleja P.</i> Reducing the carbon footprint in the use of compressed air in automation.....	58
<i>Plys V., Dehtiarov I., Neshta A., Metenko O.</i> The development of the fixture design for guiding apparatus channels machining of centrifugal pumps.....	64
<i>Tsybalenko I.</i> Brake systems for industrial forklifts .....	79
<i>Cholak I., Karvatskii A.</i> Prediction of physical properties of polyethylene-based nanocomposites using molecular dynamics methods.....	89
<i>Kovaluk D., Semjon J., Sabol M., Hrabcak M.</i> Design of robotized educational workplace in off-line environment with Yaskawa robot.....	101
<i>Melko J., Jánoš R.</i> Design of an energy-saving engine for a vehicle powered by pneumatic pistons.....	108
<i>Pilát P., Semjon J., Varga J.</i> Design of the four-wheeled mobile robotic platform for decontamination tasks.....	116

## SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

<i>Marchuk G., Korotun O., Levkivskyi V., Ukrainets M.</i> Research of artificial intelligence methods for creating intelligent game agents.....	122
<i>Bialyi M.</i> Evaluation of the informative value of military geographical information systems ...	132
<i>Mishchenko M.</i> Functional model of the cyber threats detection and prediction system for corporate computer networks using expert assesments .....	143
<i>Pryshchepa V., Zadorozhnii A.</i> Study of modern directions of modeling emergency response processes.....	453
<i>Reznichenko O., Liashenko O., Arkhypova V.</i> Choice between relational and non-relational databases.....	162

## SECTION III. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

<i>Filinska T., Tereshchuk M., Filinska A.</i> Research of avocado waste as multipurpose secondary raw material resources.....	170
<i>Khrebtan O.</i> Study of the range of canned meat and vegetables manufactured by Fabryka Zdorovo LLC, Chernihiv.....	181

## SECTION IV. ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

<i>Kazymyr V., Prystupa A., Yatchenko Y.</i> Optimal control of a nonlinear dynamic system.....	196
-------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY

<i>Petrakovska O., Mykhalova M.</i> Transformation of concepts and tasks of functional zoning of the territory.....	208
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

<i>Shapoval S., Pryshliak Y., Gulai B., Gensetskyi M., Kasynets M.</i> Energy-efficient hybrid solar collectors integrated into transparent building structures .....	217
<i>Zavorotnyi S.</i> Analysis of modern engineering and geodetic methods of monitoring buildings and structures of objects of historical and cultural heritage .....	228
<i>Kersh V., Tihoniuk S.</i> Plaster composition for buildings made of limestone-shell rock .....	236
<i>Kryachok S.</i> Application of unmanned aerial vehicles for radiation monitoring .....	247
<i>Kukhtar D.</i> Data sources of satellite radar imaging .....	262
<i>Lopushanskyi O., Smoliy K., Vanchura R., Lopushanska M., Lopushanska Y.</i> Construction of the topographic surface of the world ocean in the North Sea region .....	273
<i>Maslii L.</i> Principles of formal knowledge representation on land administration in Ukraine.....	281
<b>BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES.....</b>	<b>289</b>



# РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-3(37)-9-17

УДК 621.9

**Олександр Михайлович Пилипенко<sup>1</sup>, Володимир Матвійович Ночвай<sup>2</sup>,  
Валерій Анатолійович Яновський<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів та технологій їх експлуатації

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: [chura.pilipenko255@ukr.net](mailto:chura.pilipenko255@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1200-0385>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, старший викладач кафедри механічної інженерії

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: [nochvajvm@ztu.edu.ua](mailto:nochvajvm@ztu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3742-0837>

<sup>3</sup>доцент кафедри механічної інженерії

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: [tmkts\\_java@ztu.edu.ua](mailto:tmkts_java@ztu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1702-4282>

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ВНУТРІШНІХ КАНАВОК УЛЬТРАЗВУКОВИМ РІЗАННЯМ

У статті наведено аналіз позитивних ефектів ультразвукового різання і способів підвищення ефективності обробки внутрішніх канавок. За умов різання з накладанням вимушених коливань вплив факторів змащування та охолодження поверхонь тертя значно збільшується. При ультразвуковому різанні з накладанням вимушених вібрацій значно зменшується величина шорсткості обробленої поверхні. Запропоновано конструкцію багаторізевої спеціальної головки для обробки внутрішніх канавок. Застосування спеціальної головки дасть змогу значно підвищити якість, точність та ефективність обробки канавок завдяки зниженню впливу силових та температурних факторів на матеріал інструмента.

**Ключові слова:** ультразвукове різання; вимушені коливання; вібрації; різальний інструмент; ефективність обробки.

Рис.: 2. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** Різання з накладанням вимушених коливань на один з компонентів технологічної системи є одним із прогресивних способів обробки матеріалів. Ідея використання ультразвукових коливань для удосконалення традиційного процесу різання розробляється уже тривалий час і на сьогодні їй присвячено велика кількість наукових праць. Разом з тим, розроблена теорія ультразвукового різання не є універсальною для всієї різноманітності видів і типів металообробки. Ефективність застосування спеціального обладнання залежить від великої кількості факторів і технологічних умов конкретного процесу різання.

**Постановка проблеми.** Під час ультразвукового різання підвищується оброблюваність різанням матеріалів особливо для важкооброблюваних у звичайних умовах. Оброблюваність матеріалів різанням визначається інтенсивністю зношування інструмента й опором руху різання, який оцінюється передусім за величиною сил різання та температурою.

Виготовлення труб значної довжини  $L = (20...30) \cdot D$  з внутрішніми поздовжніми канавками є актуальною проблемою в умовах існуючих виробничих технологій. Головним чинником, що забезпечує працездатність труб, є якість оброблених поверхонь канавок. Традиційно використовується досить складний технологічний процес, що вміщує декілька операцій чорнової, чистової та фінішної обробки із застосуванням значної кількості громіздкого енергонасиченого верстатного та інструментального устаткування. Причиною такого підходу є неможливість реалізації високошвидкісного стабілізованого різання пазових поверхонь через їхню специфічну форму, розміри та технологічні обмеження, що накладаються на процес обробки. Особливо проблематичною стає обробка труб при застосуванні більш зносостійких, важкооброблюваних та спеціальних сплавів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Серед нових методів обробки є вібраційне різання, що характеризується тим, що інструменту надається коливальний рух відносно заготовки, що обробляється. Точіння з вібраціями є ефективним способом чорнової та напівчистої обробки матеріалів різанням. Спосіб забезпечує надійне стружкодроблення та підвищення стійкості різального інструменту при використанні мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) [1; 2]. При правильному виборі напрямку коливань, їхньої частоти та амплітуди використання вібраційного різання гарантує злам стружки. Застосування вібраційного різання покращує низку найважливіших технологічних показників. Створюються передумови для поліпшення оброблюваності матеріалів, а також підвищення стійкості інструменту [3; 4]. Підвищити ефективність процесу можна, використовуючи високочастотні вібрації, спрямування яких співпадає з напрямком тангенційної складової сили різання. Це дозволяє підвищити швидкість різання, стійкість інструменту, знизити сили різання та шорсткість поверхні [3; 4].

Необхідно зазначити, що при вібраційному різанні також підвищується ефективність дії МОР і обробки взагалі [1; 2]. Точність обробки зберігається такою самою, як і при звичайному точінні [1].

Стабільне вібраційне різання може відбуватися із частотою, близькою до частоти власних коливань верстата – (200...1000 Гц) або інструмента (1...10 кГц) [5]. Застосовують два види цього процесу: оброблення з накладенням коливань низької частоти (до 200 Гц), метою якого є подрібнення стружки; оброблення з накладенням коливань малої амплітуди ( $a = 5...10$  мкм) і ультразвукової частоти ( $f = 15...50$  кГц), які приводять до поліпшення оброблюваності) [5].

Загальні закономірності вібраційного різання такі: короткочасна періодична зміна миттєвих швидкостей і кутів різання; змінні циклічні навантаження на матеріал, які обумовлені змінними швидкостями і кутами різання; зниження коефіцієнтів і сил тертя на майданчиках контакту інструмента зі стружкою і оброблюваною деталлю. Приведені особливості різання покращують умови роботи інструмента. У результаті дії примусових коливань знижується рівень сил і температури різання [6].

Застосування МОР також зменшує сили різання. В основі дії МОР на процес різання лежать три ефекти: змащувальний, охолоджуючий і миючий [7]. Для охолодження крім рідин застосовують також газові засоби (кисень, повітря, вуглекислоту, азот), які у вигляді струменя підводяться в зону різання [7].

Дослідження в напрямку вібраційного різання важкооброблюваних матеріалів, з використанням автоколивань та накладенням вимушених коливань є актуальними. Дослідження полягають в необхідності оптимізації технологічних параметрів вібраційного різання для забезпечення вимог, що задаються конструкторською документацією [8].

Вібраційне різання відбувається за рахунок використання вібраційного та віброударного обладнання. Робота цього обладнання відбувається за єдиною структурною схемою, а саме: від джерела енергії, привода енергоносія та системи елементів управління і розподілення енергії. Енергія передається на привід генератора вібрацій, який з'єднаний з виконавчою робочою ланкою, і на привід допоміжних робочих ланок [9]. З усіх типів віброзбуджувачів пневматичні є найбільш поширеною групою. Пневматичні віброзбуджувачі використовують енергію стиснутого повітря і працюють від стандартних промислових пневмосистем з тиском  $2...7$  кгс/см<sup>2</sup> [9].

Віброзбуджувачі з пульсатором використовують при частотах до 15 Гц, значних амплітудах (20...30 мм). Діапазон частот автоколивальних віброзбуджувачів знаходиться в межах 15...60 Гц, а відцентрових – 20...4000 Гц [9].

Одним з поширених видів обробки на токарних верстатах є обробка консольним інструментальним оснащенням, до якого належать оправки, різцетримачі, борштанги [4]. Особливістю обробки консольним інструментом є висока ймовірність виникнення вібрацій при різанні, що знижує точність, якість та продуктивність обробки деталей, обмежує технологічні можливості верстатів [4].

У роботі [10] приведено особливості гібридних технологій лезової обробки деталей з покриттями, в т.ч. обробка з накладенням на різальний інструмент високочастотних коливань. Частотний діапазон примусових високочастотних коливань визначається з умов якісних змін у процесі стружкоутворення, коли вібраційна швидкість перевищує швидкість різання [10].

Автори зазначають, що використання частоти коливань  $> 25$  кГц ускладнює технологію виготовлення магніостриктора та потребує суттєвого збільшення його потужності [10]. Автори роботи [10] рекомендують при конструюванні та виготовленні вібратора для вібротехнічної обробки покриттів набувати амплітудне значення коливань у межах  $5 \dots 10$  мкм та частоту в межах  $18 \dots 20$  кГц.

Розрахункова потужність магніостриктора становить  $100 \dots 120$  Вт, що відповідає значенням питомої енергоємності стружкоутворення для покриттів [10].

**Метою статті** є підвищення ефективності обробки внутрішніх канавок шляхом використання комбінованого методу обробки: багаторізцевим інструментом із накладанням на нього вимушених коливань.

#### **Виклад основного матеріалу.**

##### *1. Доцільність використання ультразвукового різання.*

У сучасних умовах промислового виробництва найбільш розповсюдженою є обробка поздовжніх за технологічним процесом, що вміщує операції чорнового, напівчистового та чистового різання спеціальним інструментом у вигляді борштанги з наступним хонінгуванням у поздовжньому напрямку.

Основними недоліками такого підходу є:

- низька продуктивність обробки і значний штучний час;
- зниження точності обробки через зниження жорсткості деталі;
- збільшення шорсткості, хвилястості та наявність подряпин на оброблених поверхнях через інтенсивне утворення наросту на поверхні інструменту;
- неможливість усунення дефектів обробки наступними фінішними операціями.

Вказані недоліки є наслідками реалізації низької швидкості різання ( $V = 10 \dots 20$ ) м/хв), що притаманна традиційній технології виготовлення внутрішніх канавок значної довжини. Відомо, що під час швидкісного різання закон зміни сили різання можна описати наступною залежністю:  $P(t) = P_{cp} + p \cdot \sin(\omega t)$ ,  $P_{cp}$  – середнє значення опору різання;  $\omega = 2\pi f$  – кругова частота коливань різця;  $p$  – амплітудне значення змінної складової сили різання;  $p \cdot \sin(\omega t)$  – поточне значення змінної складової сили різання.

При цьому значна частина роботи постійної складової різання  $P_{cp}$  витрачається на виділення тепла. Перпендикулярна складова сили різання  $P_{xcp}$  діє у напрямку притиску різця до деталі. При цьому пружні коливання, що виникають у процесі різання, призводять до зниження точності й утворення задирків.

У процесі поглиблення канавки величина  $P_{cp}$  поступово збільшується і підсилюється вплив збурюючих факторів. У результаті шорсткість оброблених поверхонь зростає і якість погіршується. У цій ситуації бажано створити такі умови різання, при яких параметри коливального руху різця не залежали б від глибини канавки. Традиційно, за

таких умов різними методами і способами намагаються мінімізувати вплив хаотичних вібрацій на процес механічної обробки. Вирішення такої задачі є складним і залежить від багатьох факторів.

Застосування ж ультразвукового різання (різання з накладанням вимушених вібрацій регулярного характеру) дає можливість отримувати сили різання імпульсного характеру без надмірного притиску інструмента до деталі. Через малу тривалість силового імпульсу напруження зосереджується перед різальною кромкою різця і процес пластичної деформації набуває більш сконцентрованого характеру. За таких умов можна досягнути заданої шорсткості, що здебільшого визначається геометричними параметрами різця і мало залежить від глибини різання  $t$ . Теоретично величину шорсткості можна розрахувати за формулою:

$$R_{\max} \approx \frac{S}{4 \cdot r_B} \cdot \Delta S + \frac{\Delta t}{2},$$

де  $S$  – величина подачі;  $\Delta S$  – зміна величини подачі;  $\Delta t$  – зміна глибини різання;  
 $r_B$  – радіус закруглення вершини різця.

Під час ультразвукового різання, завдяки ефекту нечутливості до хаотичних вібрацій, величини  $\Delta S$  та  $\Delta t$  теоретично прямують до нуля. Реальна величина шорсткості наближатиметься до мінімальної. Завдяки стабілізації коливань різальної кромки інструмента відбувається більш ефективно розбиття зрізаного шару на дрібні елементи сколювання, що підвищує якість обробленої поверхні.

## 2. Напрямок коливального руху при ультразвуковому різанні.

Найпростішими з точки зору реалізації є коливання обертальні або поступальні уздовж однієї з координатних осей. Кожен із цих видів має певні переваги і недоліки. Виходячи з конкретної схеми різання і обмеженості в габаритах інструментального блоку найбільш доцільним є реалізація коливань згину у напрямку швидкості різання. Необхідно відмітити, що в коливальній системі виникатимуть головна  $P_z$  та перпендикулярна  $P_x$  складові сили різання. Напрямок  $P_z$  співпадає з напрямком поздовжніх коливань вібратора. За рахунок складової  $P_x$  виникає пружна деформація елементів кріплення інструмента. В результаті знижується міцність кріплення і різальна кромка починає вібрувати в перпендикулярному напрямку. Таким чином на коливання згину накладаються поздовжні коливання і різальна кромка здійснює кругові коливальні рухи. У результаті цього процесу виникають ударні навантаження на задній поверхні різця, які прискорюють зношення інструменту та знижують його стійкість.

У даній ситуації більш доцільним є розробка пристроїв, які б усували дані недоліки шляхом стабілізації положення різального леза. Таким може бути пристрій, коливальна система якого показана на рис. 1.

Різець, що здійснює коливання згину, відігнутий до напрямку рівнодійної сили різання. Кут нахилу можна визначити за формулою:

$$\Theta = \text{arctg}(P_x / P_z).$$

Центральна вісь коливання розташована нормально до напрямку дії рівнодійної сил різання і співпадає із напрямком вимушених коливань різця. Таким чином можна значно зменшити величину неперіодичних коливань різального леза, що спричинені динамічними характеристиками технологічної системи.

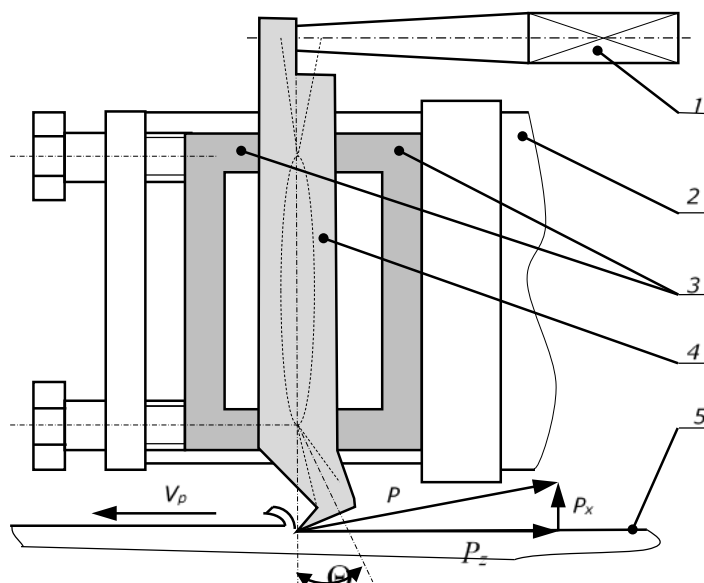


Рис. 1. Схема згину з відігнутим різцем:

1 – вібратор поздовжніх коливань; 2 – різцетримач; 3 – притискні пластини;  
4 – різець; 5 – оброблена поверхня

Джерело: розроблено авторами.

### 3. Вплив мастильно-охолоджувальної рідини на процес ультразвукового різання.

Основні фактори дії мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) полягають у змащуванні та охолодженні поверхонь тертя, диспергуванні в зоні стружкоутворення, фізико-хімічному впливі на оброблену поверхню та вимиванні стружки із зони різання. За умов різання з накладанням вимушених коливань вплив цих факторів значно збільшується. Під час обробки внутрішніх пазових поверхонь забезпечення ефективної дії МОР є проблематичним через недостатню проникність МОР в зону різання. В окремих випадках вимушено використовують заповнення внутрішньої порожнини деталі рідиною під тиском, що спричинює додаткові технологічні труднощі.

Впровадження ультразвукового різання для вказаної обробки дає можливість розширити доступ МОР до зони різання шляхом використання переривчастого контакту та капілярних ефектів на робочих поверхнях. Завдяки цьому стає можливим використання в якості МОР спеціальних суспензій, що ефективно екранують і термоізолюють контактні площини.

Дослідженнями встановлено, що найвагомим фактором дії МОР при ультразвуковому різанні є не охолоджувальна її властивість, а мастильне плівкоутворення. Під час різання без вібрацій мастильна плівка надійно екранує лише 40 % рухомої площі контакту інструмента з оброблюваним матеріалом, тоді як переривчасте різання забезпечує повне змочування різального клину інструменту.

Склад МОР за таких умов має визначальний вплив на процес різання. Після тривалих випробувань найбільшою ефективністю відзначився склад з молібденітовою суспензією (дисульфід молібдену і графіт з оливою), характеризувався найбільшою міцністю плівки при максимальній адгезійності. Застосування МОР такого складу є рекомендованим для роботи спеціалізованого обладнання для ультразвукового різання поздовжніх внутрішніх канавок. Такий підхід дає змогу значно зменшити температуру в зоні різання.

### 4. Обладнання для ультразвукової обробки внутрішніх прямолінійних канавок.

Для реалізації ультразвукового різання під час обробки внутрішніх поздовжніх канавок у трубних заготовках значної довжини пропонується спеціалізоване обладнання на

основі спеціальної багаторізевої головки (ГБС). ГБС призначена для обробки поздовжніх прямих та гвинтових внутрішніх канавок значної довжини методом стругання з накладанням вимушених коливань.

ГБС (рис. 2) складається з трубчастого корпусу 1, всередині якого розміщені основні вузли: магнітостриктор (М) та гідравлічний генератор імпульсів (ГГІ). У передній частині корпусу знаходиться інструментальний блок 4 з комплектом різцевих вставок 6, що фіксується у визначених вузлових точках за допомогою напрямної цапфи 5. Внутрішня порожнина корпусу розділена герметично на напірну камеру А та зливну Б.

З метою зменшення інерційності всього пристрою, камеру А можна замінити окремим напірним трубопроводом, що приєднується до каналу В. Корпус має також дренажні Д і Е та вихлопні канали Г для видалення відпрацьованої рідини й повітря з головки. Оброблювана деталь 2 базується по зовнішній циліндричній поверхні з упором по торцю. Обидва торці герметизовано для централізованого видалення рідини та повітря, а також з метою покращення шумопоглинання.

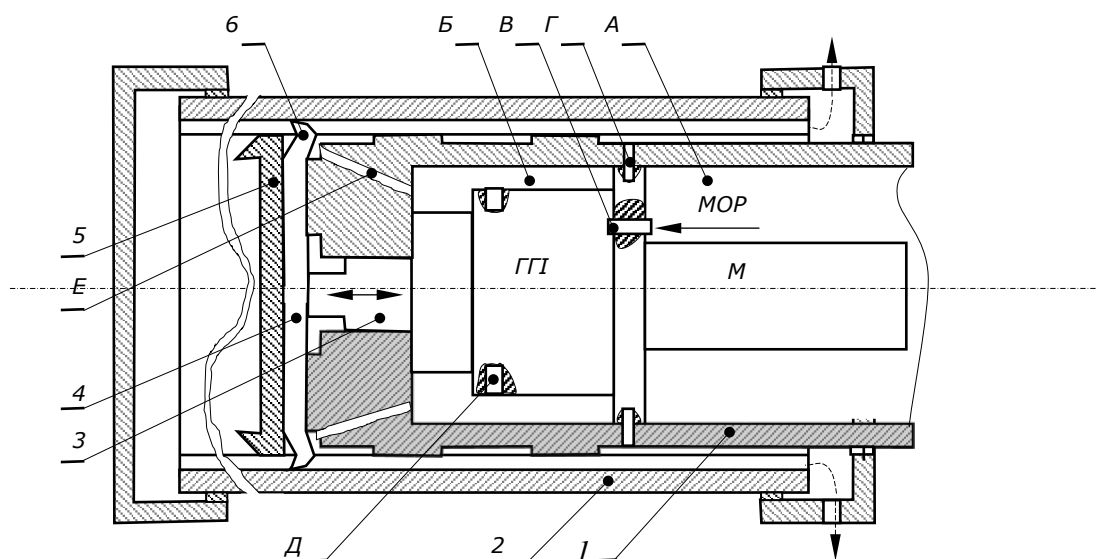


Рис. 2. Головка багаторізева:

1 – корпус трубчастий; 2 – оброблювана деталь; 3 – бойок;  
4 – інструментальний блок; 5 – цапфа напрямна; 6 – різцеві вставки;  
А – напірна камера; Б – зливна камера; В – канал; Г – вихлопний канал;  
Д, Е – дренажні канали

Джерело: розроблено авторами.

Магнітостриктор М генерує коливання частотою 20 кГц, які передаються до циліндричного золотника ГГІ. ГГІ керує реверсивним зворотно-поступальним рухом поршня. Бойок 3, що з'єднаний з поршнем ГГІ, періодично ударяє по центру різцевого диска 4. Це призводить до виникнення коливань згину поперечних до диску і утворення в процесі обробки стоячих хвиль необхідної довжини. Різцеві вставки закріплені під кутом до напрямку швидкості різання з метою усунення надмірного тертя та заклинювання інструмента по задній поверхні при зворотному вигині.

Через наявність вимушених коливань різального клину проходить додаткове тепловиділення, що компенсується диференційованою подачею МОР у вказані точки через канали Е. Проте загальне тепловиділення при ультразвуковому різанні менше ніж за умов традиційного різання, що є наслідком зміни схеми різання та механізму деформації зрізуваного шару.

Основна частина потоку відпрацьованої рідини видаляється уздовж канавок у зворотному напрямку і, змішуючись з потоком відпрацьованого повітря від каналу  $L$ , інтенсивно очищує оброблені поверхні від залишків стружки та забруднень. Регулювання робочих параметрів ГБС здійснюється зміною тиску в гідросистемі при відповідній швидкості головного руху.

Запропонована конструкція ГБС дає змогу значно підвищити якість, точність та продуктивність обробки канавок завдяки зниженню впливу силових та температурних факторів на матеріал інструмента. Зменшення нагріву різального клину у поєднанні з його короткочасним періодичним контактом з матеріалом заготовки значно зменшить інтенсивність наростуотворення і підвищить якість оброблюваних поверхонь.

Використання позитивних ефектів ультразвукового різання досягається завдяки запропонованій конструкції ГБС без значних додаткових матеріальних та енергетичних витрат з більш раціональним використанням вихідних потужностей, що застосовуються у базовій технології виготовлення канавок. Використання комбінованого методу обробки (стругання багаторіздцевим інструментом із накладанням вимушених коливань) при обробці внутрішніх канавок трубчастих заготовок забезпечить:

- перехід від низькошвидкісного традиційного різання до ультразвукової обробки;
- підвищення якості і точності оброблюваних поверхонь;
- інтенсифікацію дії МОР та підвищення стійкості інструмента;
- підвищення продуктивності за умов збереження якості обробки;
- зниження енерговитрат при використанні ультразвукового обладнання.

#### **Висновки.**

1. Якісна продуктивна обробка внутрішніх канавок значної довжини у важкообробних матеріалах викликає значні труднощі за умов традиційних технологій виготовлення.

2. Підвищення ефективності обробки внутрішніх канавок можливе при використанні комбінованого методу: стругання багаторіздцевим інструментом із накладанням на нього вимушених коливань.

3. Розроблено оригінальний різальний інструмент для обробки внутрішніх канавок комбінованим методом – головку багаторіздцеву спеціальну з гідроприводом. Для накладання вібрацій використано гідравлічний генератор імпульсів, яким керує магнітострикційний перетворювач (вібратор). В останньому високочастотні електричні коливання частотою 20 кГц перетворюються в механічні тієї ж частоти. При цьому інструментальний блок повинен мати відповідну жорсткість.

4. Для забезпечення ультразвукової обробки ГБС має такі технічні характеристики:

– вимушені коливання накладаються на різальний інструмент як компонент технологічної системи;

– для успішного протікання ультразвукового стругання використано прикладення вимушених вібрацій за коливальною системою згинного типу. При цьому напрямок вектора швидкості при ультразвуковому різанні повинен бути протилежним напрямку рівнодійної сили різання;

– оптимальна частота коливань ГБС 20 кГц, що забезпечує ультразвукове різання з необхідною швидкістю  $V_p$  при амплітуді  $a = 5$  мкм.

#### **Список використаних джерел**

1. Мартиненко, О. Д. Підвищення якості обробки деталей автомобілів за рахунок використання низькочастотних вібрацій / О. Д. Мартиненко, С. В. Лисенко // Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (1-2 грудня 2022 р.). – Харків : ДБТУ, 2022. – С. 117-118.

2. Шевченко, О. В. Ефективність ультразвукової токарної обробки / О. В. Шевченко, С. А. Манзюк // Вібрації в техніці та технологіях: тези доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції (11-12 жовтня 2018 р.). – Дрогобич, Посвіт, 2018. – С. 111-112.

3. Солодовник, Є. В. Технологічні особливості застосування вібрацій при механічній обробці / Є. В. Солодовник, С. В. Лисенко, О. Д. Мартиненко // Молодь і технічний прогрес в АПВ : Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, (23-24 листопада 2023 р.). – Харків : ДБТУ, 2023. – С. 485-488.

4. Шевченко, О. В. Спеціальне інструментальне оснащення для розширення технологічних можливостей токарних верстатів / О. В. Шевченко, А. Ю. Беляєва // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем – 2018 : матеріали тез доп. VIII Міжнародної науково-практичної конф. (10-12 травня 2018 р.) : у 2-х т. – Чернігів : ЧНТУ, 2018. – Т. 1. – С. 57-59.

5. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М. П. Мазур, Ю. М. Внуків, А. І. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. О. Залога, Ю. К. Новосолов, Ф. Я. Якубов ; за ред. М. П. Мазура. – 3-є вид. перероб. і доп. – Львів : Новий Світ-2000, 2020. – 471 с.

6. Теорія різання [Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальності 131 – Прикладна механіка / О. В. Глоба, В. В. Вовк, Д. А. Красновид, В. І. Солодкий. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 248 с. – Режим доступу: <https://km.kpi.ua>nauka>monograiyyi-pidruchnyky>.

7. Теорія різання та інструмент : навчальний посібник / Н. Р. Веселовська, Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. М. Ковальова. – Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2018. – 297 с.

8. Омелянов, О. М. Перспективи застосування вібрації при різанні матеріалів / О. М. Омелянов, Ю. А. Полевода, М. А. Замрій // Вібрації в техніці та технологіях. – 2021. – № 1 (100). – С. 104-114.

9. Паладійчук, Ю. Б. Типи і конструкції віброзбуджувачів сучасного машинобудування / Ю. Б. Паладійчук, І. А. Телятник // Вібрації в техніці та технологіях. – 2022. – № 4 (107). – С. 26-35.

10. Обработка резанием деталей с покрытиями / С. А. Клименко, В. В. Коломиец, М. Л. Хейфец, А. М. Пилипенко, Ю. А. Мельничук, В. В. Бурякин ; под общ. ред. С. А. Клименко. – Київ : ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с.

## References

1. Martynenko, O.D., & Lysenko, S.V. (2022). Pidvyschennia yakosti obrobky detalej avtomobiliv za rakhunok vykorystannia nyz'kochastotnykh vibratsij [Improving the quality of processing car parts due to the use of low-frequency vibrations]. *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Avtomobil'nyj transport v ahrarnomu sektori: proektuvannia, dyzajn ta tekhnolohichna ekspluatatsiia"* – Road transport in the agricultural sector: planning, design and technological operation (pp. 117-118). DBTU.

2. Shevchenko, O.V., & Manziuk, S.A. (2018). Efektyvnist' ul'trazvukovoi tokarnoi obrobky [Effectiveness of ultrasonic turning processing]. *Tezy dopovidei XVII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh"* – Abstracts of reports of the XVII International Scientific and Technical Conference "Vibrations in Engineering and Technologies" (pp. 111-112). Posvit.

3. Solodovnyk, Ye.V., Lysenko, S.V., & Martynenko, O.D. (2023). Tekhnolohichni osoblyvosti zas-tosuvannia vibratsij pry mekhanichnij obrobtsi [Technological features of the use of vibrations during mechanical processing]. *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Molod' i tekhnichnyj prohres v APV"* – Materials of the International scientific and practical conference "Youth and technical progress in the APV" (pp. 485-488). DBTU.

4. Shevchenko, O.V., & Beliaieva, A.Yu. (2018). Beliaieva Spetsial'ne instrumental'ne osnaschen-nia dlia rozshyrennia tekhnolohichnykh mozhlyvostej tokarnykh verstativ [Special tool equipment for expanding the technological capabilities of lathes]. *Tezy dopovidei VIII Mizhnarodnoi naukovo- praktychnoi konferentsii "Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system – 2018"* – Abstracts of reports of the 8th International scientific and practical conference "Complex quality assurance of technological processes and systems" (pp. 57-59). ChNTU.

5. Mazur, M.P., Vnukov, Yu.M., Hrabchenko, A.I., Dobroskok, V.L., Zaloha, V.O., Novosolov, Yu.K., & Yakubov F.Ya. (2020). *Osnovy teorii rizannia materialiv [Fundamentals of material cutting theory]*. Novyi Svit-2000.

6. Hloba, O.V., Vovk, V.V., Krasnovyd, D.A., & Solodkyj, V.I. (2022). *Teoriia rizannia [Cutting theory]*. KPI im. Ihoria Sikors'koho. <https://km.kpi.ua>nauka>monograiyyi-pidruchnyky>.



7. Veselovska, N.R., Iskovych-Lototskyi, R.D., & Kovalova, I.M. (2018). *Teoriia rizannia ta instrument [Theory of cutting and tools]*. Vinnytskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet.

8. Omel'ianov, O.M., Polievoda, Yu.A., Zamrii, M.A. (2021). Perspektyvy zastosuvannya vibratsii pry rizanni materialiv [Prospects for using vibration when cutting materials]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibrations in engineering and technology*, (1(100)), 104-114.

9. Paladiichuk, Yu.B. (2022). Typy i konstruktsii vibrozbudzhuvachiv suchasnoho mashynobuduvannya [Types and designs of vibration exciters of modern mechanical engineering]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibrations in engineering and technology*, (4(107)), 26-35.

10. Klimenko, S.A., Kolomiets, V.V., Hejfec, M.L., Pilipenko, A.M., Melniichuk, Ju.A., & Burykin, V.V. (2011). *Obrabotka rezaniem detalej s pokrytijami [Cutting of coated parts]*. ISM im. V.N. Bakulia NAN Ukrainy.

Отримано 01.10.2024

UDC 621.9

**Oleksandr Pylypenko<sup>1</sup>, Volodymyr Nochvai<sup>2</sup>, Valery Yanovsky<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automobiles and Technologies of Their Operation  
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

**E-mail:** [chura.pilipenko255@ukr.net](mailto:chura.pilipenko255@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1200-0385>

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering  
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

**E-mail:** [nochvajvm@ztu.edu.ua](mailto:nochvajvm@ztu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3742-0837>

<sup>3</sup>Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering  
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

**E-mail:** [tmkts\\_java@ztu.edu.ua](mailto:tmkts_java@ztu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1702-4282>

## INCREASING THE EFFICIENCY OF PROCESSING INTERNAL GROOVES BY ULTRASONIC CUTTING

*Production of pipes with internal longitudinal grooves is an urgent problem in the conditions of existing production technologies. The use of new types of materials in industry requires the study of machining processes intensification based on the use of the latest cutting methods. The article provides an analysis of the positive effects of ultrasonic cutting and methods of increasing the efficiency of processing internal grooves. During ultrasonic cutting with the imposition of forced vibrations, the roughness of the treated surface is significantly reduced. Under the conditions of cutting with the imposition of forced oscillations, the influence of lubrication and cooling of the friction surfaces increases significantly. This is especially true for the intermittent cutting process. It should be noted that the main and perpendicular components of the cutting force will appear in the oscillating system. Longitudinal oscillations overlap bending oscillations and the cutting edge performs circular oscillatory movements. This leads to shock loads on the back surface of the cutter, which accelerates tool wear. In order to eliminate this shortcoming, it is proposed to place the central axis of oscillation normal to the direction of action of the uniform cutting forces. In addition, the direction of the central axis of oscillation must coincide with the direction of forced oscillations of the cutter. In this way, it is possible to significantly reduce the amount of non-periodic oscillations of the cutting blade caused by the dynamic characteristics of the technological system. The design of a multi-cutting special head for processing internal grooves is suggested. The use of a special head will make it possible to significantly increase the quality, accuracy and efficiency of groove processing due to the reduction of the influence of force and temperature factors on the tool material.*

**Keywords:** ultrasonic cutting; forced oscillations; vibrations; cutting tool; processing efficiency.

**Fig.:** 2. **References:** 10.

**Сергій Анатолійович Клименко<sup>1</sup>, Андрій Сергійович Манохін<sup>2</sup>,  
Сергій Анатолійович Клименко<sup>3</sup>, Юрій Олексійович Мельничук<sup>4</sup>,  
Анатолій Олександрович Чумак<sup>5</sup>, Марина Юрїївна Копейкіна<sup>6</sup>,  
В'ячеслав Мартинович Береснев<sup>7</sup>**

<sup>1</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>

**ResearcherID:** [Q-8928-2019](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771). **SCOPUS Author ID:** [57221904325](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, старший дослідник,  
старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

**E-mail:** [the.manokhin@gmail.com](mailto:the.manokhin@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>

**ResearcherID:** [DGN-4506-2022](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482). **SCOPUS Author ID:** [37059129600](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482)

<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:** [alcon1202@ukr.net](mailto:alcon1202@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>

**ResearcherID:** [FFQ-3675-2022](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519). **SCOPUS Author ID:** [57197629303](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519)

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна),

**E-mail:** [en22@i.ua](mailto:en22@i.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4529-2775>. **SCOPUS Author ID:** [57193381972](https://orcid.org/0000-0003-4529-2775)

<sup>5</sup>кандидат технічних наук,  
науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

**E-mail:** [chumak1826ar@gmail.com](mailto:chumak1826ar@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9054-3196>

**ResearcherID:** [AEK-3163-2022](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196). **SCOPUS Author ID:** [58162161100](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196)

<sup>6</sup>кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

**E-mail:** [atmul@meta.ua](mailto:atmul@meta.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>

**ResearcherID:** [FZY-5450-2022](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503). **SCOPUS Author ID:** [36337661400](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503)

<sup>7</sup>доктор технічних наук, професор, професор кафедри радіаційного матеріалознавства,  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна (Харків, Україна)

**E-mail:** [v.beresnev@karazin.ua](mailto:v.beresnev@karazin.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4623-3243>

**ResearcherID:** [ELI-3316-2022](https://orcid.org/0000-0002-4623-3243). **SCOPUS Author ID:** [26530793400](https://orcid.org/0000-0002-4623-3243)

## БАГАТОШАРОВІ ЛЕГОВАНІ НІТРИДНІ ПОКРИТТЯ СИСТЕМИ TiAlN

Наведено результати досліджень гами багатошарових наноструктурних покриттів на основі системи TiAlN – структурного стану, морфології, складу, мікрогеометрії інтерфейсу. Покриття загальною товщиною 7–8 мкм з товщиною шарів (TiAlN/CrN) 20–30 нм, нанесене вакуумно-дуговим методом на основу з надтвердої кераміки на основі кубічного нітриду бору. Розглянуто вплив на показники стану інтерфейсу покриттів, легування їхніх матеріалів, комплексом елементів – Y, Zr, Nb, Si. На основі аналізу результатів вивчення інтерфейсу покриттів методом скетч-тестування встановлено агеційний і когезійний механізми руйнування покриттів залежно від рівня легування їхніх матеріалів, запропоновано перспективні напрями використання покриттів для застосування в різальному інструменті з PcbN.

**Ключові слова:** покриття на основі системи TiAlN; структура, інтерфейс, морфологія, склад, мікрогеометрія поверхні, руйнування.

Рис. 4. Табл.: 2. Бібл. 12.

**Актуальність теми досліджень.** Використання твердих плівок як захисних зміцнювальних покриттів дозволяє істотно підвищити поверхневу міцність, зносостійкість, корозійну стійкість і, як наслідок, експлуатаційний ресурс роботи різальних інструментів. На теперішній час захисні покриття використовуються для підвищення працездатності інструментів із робочою частиною з інструментальних та швидкорізальних сталей, твердих сплавів, кераміці, надтвердих матеріалів [1–3].

Сучасними напрямками у створенні покриттів для різального інструменту є формування потрібного за умовами експлуатації наноструктурного стану матеріалів покриттів, використання в матеріалах покриттів багатоелементних систем, аж до високоентропійних, отримання архітектури покриттів у вигляді багатошарових композицій, кожний шар з яких виконує власну функцію, а всьому комплексу шарів притаманний синергізм властивостей [4].

Аналіз досвіду використання інструментів, оснащених РсВN із захисними покриттями, показує, що основні функції таких покриттів полягають у такому: підвищення надійності інструменту на етапі припрацювання; збільшення періоду стійкості інструменту; інтенсифікація режимів різання; інформаційна функція [3].

Усі вказані функції захисних покриттів безпосередньо впливають на ефективність процесів механічної обробки як у частині її економічних показників, так і з погляду забезпечення якості оброблюваних виробів та впливу стану поверхневого шару оброблених виробів на їхні експлуатаційні властивості. У зв'язку з цим актуальність досліджень у напрямку вивчення властивостей і вдосконалення захисних покриттів для різальних інструментів не викликає сумнівів.

**Постановка проблеми.** Інструменти з надтвердих матеріалів особливо ефективні під час обробки найміцніших сучасних конструкційних матеріалів, що в деяких випадках є запорукою використання таких матеріалів у деталях техніки. При цьому вартість інструментів із надтвердих матеріалів досить значна. Усе це свідчить про важливість проведення робіт з удосконалення та поширення використання захисних покриттів саме для інструментів із надтвердих матеріалів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наукові роботи, присвячені дослідженням як фізико-механічних властивостей та способів отримання захисних покриттів, так і характеристик застосування інструментів з покриттями, свідчать, що наноструктурні системи мають більш високі значення твердості, тріщино- та термостійкості, а також підвищені експлуатаційні показники в порівнянні з покриттями, структурні елементи яких належать до мікрометричного діапазону. У зв'язку з чим однією з основних тенденцій у створенні покриттів для різальних інструментів є забезпечення нанорозмірності при формуванні як структурних елементів покриття, так і окремих шарів у багатошарових композиціях. Вказана перевага наноструктур теоретично обґрунтована фактом суттєвої зміни фізико-механічних властивостей матеріалу зі зменшенням розміру його структурних складових (зерен, кристалів) [5–7].

При створенні багатошарових нанотовщинних покриттів [16] у структурі зростає площа поверхонь розділу між окремими фазами та межами зерен. Ці межі є перешкодами на шляху розповсюдження тріщин та дислокацій, зумовлюючи підвищення твердості та міцності матеріалу. Ще одним фактором, що сприяє підвищенню твердості, є те, що значення модуля Юнга сусідніх шарів сильно відрізняються. Наочним свідченням ефективності покриттів із нанощаровою архітектурою є дослідження тріщин, що йдуть у масив покриття поруч із відбитком індентора [8] – зростання тріщини вглиб покриття обмежений через розсіювання енергії при подоланні тріщиною міжфазних кордонів на стиках шарів.

Найбільш перспективними, з погляду їх застосування на різальних інструментах РсВN, є нанокондитні покриття. Це зумовлено поєднанням високих значень фізико-механічних властивостей, стійкості до окислення та дисоціації хімічних сполук, що входять до їх складу, внаслідок особливостей структури нанокондитних плівок. Нанокондитні структури бувають двох видів [9]: а) нітридна нанорозмірна фаза впроваджена в міжкристалітне середовище; б) зерна одного матеріалу утворюють дві фази з різною кристалічною орієнтацією або суміш нанозерен різних матеріалів.

Багатошарові покриття можуть підвищити стабільність інструментів на 25–200 % порівняно з одношаровими покриттями TiC і TiCN [4]. При динамічному різанні важкооброблюваних матеріалів найкращу стійкість показали інструменти з багатошаровим покриттям, у якому чергуються «м'які» і «тверді» шари [10]. Багатошарові покриття переважно

багатофункціональні [11]. Вони поєднують високу твердість, зносостійкість, стійкість до адгезійної взаємодії з контактуючим матеріалом, низький коефіцієнт тертя, підвищену стійкість до абразивного зношування і окислення при підвищених температурах.

Аналіз технічної літератури показує, що одними з поширених покриттів для різальних інструментів є покриття на основі системи TiAlN [12]. Для забезпечення більш високих механічних властивостей покриття легуються ітрієм, що підвищує їх абразивну зносостійкість та зменшує здатність до окислення. При цьому шари (TiAlY)<sub>N</sub> перемішуються із шарами простих нітридів металів, наприклад CrN, що забезпечує чергування «твердих» і «м'яких» шарів.

Захисне покриття має виконувати також роль пасивного протектора, який перешкоджає механічній взаємодії виробу та інструменту в зоні контакту або відігравати певну роль, змінюючи умови безпосередньої хімічної взаємодії їхніх матеріалів [3]. У зв'язку з цим склад і властивості захисних покриттів можуть впливати на умови взаємодії в зоні контакту і тим самим підвищувати ефективність покритих виробів.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Для забезпечення повноти уявлень щодо властивостей багатошарових покриттів на основі системи TiAlN, нанесених на підкладку з надтвердої кераміки на основі кубічного нітриду бору, потрібно виконати дослідження впливу легуючих компонентів у складі покриття на стан інтерфейсу напиленої поверхні, виконати порівняльний аналіз властивостей таких покриттів з визначенням напрямків можливого використання.

**Метою статті** є аналіз стану інтерфейсу напилених поверхонь і порівняльний аналіз властивостей поверхневого шару покриттів на основі системи TiAlN залежно від легуючих компонент покриття.

**Методика досліджень.** Розглянуто багатошарові вакуумно-дугові нітридні покриття (TiAlY)<sub>N</sub>/CrN, (TiAlSiY)<sub>N</sub>/CrN, (TiZrNbYAl)<sub>N</sub>/CrN, нанесені на підложку з надтвердої кераміки на основі кубічного нітриду бору (PcBN) з періодом шарів 20–30 нм. Загальна товщина покриттів (без врахування краплинної фази) – 7,92; 7,45; 7,00 мкм відповідно.

Осадження вакуумно-дугових багатошарових нітридних покриттів проводили протягом 60 хв. Використовували тиск азоту у вакуумній камері під час осадження покриттів  $P_N = 0,05\text{--}0,60$  Па, негативний потенціал на підкладці  $U_3 = -100\text{--}-200$  В. Нанесення покриттів здійснювалося за допомогою командного контролера.

Зображення поверхні і склад покриттів роботі були отримані за допомогою растрового іонно-електронного мікроскопа JEM-2100F («JEOL» Ltd.) у поєднанні з мікроаналізаторами INCA (фірма «Oxford») (діаметр електронного пучка 0,7 нм).

Дифрактометричні дослідження зразків проводилися на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-4-07 у мідному Cu-K $\alpha$  випромінюванні із застосуванням Ni фільтру, що селективно поглинає. Дифрагроване випромінювання реєструвалося сцинтиляційним детектором.

Для випробування покриттів з метою визначення адгезійної / когезійної міцності, стійкості до подряпин і визначення механізму руйнування, використовувався скретч-тестер Revetest (CSM Instruments).

**Виклад основного матеріалу.** Основою системи покриттів, що розглядаються, є композиція TiAlN. Обрання додаткових складових для легування покриття пов'язане з наступним: додавання до складу матеріалу ітрію (Y) дозволяє підвищити його твердість за рахунок зменшення розміру зерен і підвищити опір окислювальним процесам за рахунок розміщення в межзереному просторі, по якому відбувається переміщення

кисню в процесі роботи покриття; нітриди цирконію забезпечують підвищення твердості покриття та значне підвищення температуростійкості, що є одним із головних якостей при обробці жароміцних сплавів, додавання нітриду кремнію, при правильно підібраних параметрах, дозволить отримати аморфну складову, що дозволить зменшити висоту мікронерівностей покриття; наявність Nb у складі покриття сприяє підвищенню температурі, при якій має хімічна взаємодія між нітридом бору та складовими оброблюваного матеріалу.

Багатошарове нітридне покриття (TiAlY)N/CrN сформоване з використанням катодних матеріалів, які мають добру теплопровідність, тому кількість крапельної фази на поверхні досліджуваного зразка порівняно невелика (рис. 1, а). Покриття має високу однорідність і низьку дефектність по всій товщині.

Рентгеноструктурний аналіз покриття (TiAlY)N/NbN показує, що до складу покриття входять усі компоненти катодів (рис. 1, б).

Розмір ОКР для такого покриття становить 24,2 нм при рівні мікронапружень  $\varepsilon = 5,76 \cdot 10^{-3}$ . Аналіз інтенсивності та результати структурних досліджень свідчать про переважну орієнтацію текстури [111].

Зниження дефектності структури покриття (TiAlY)N/CrN дозволяє покращити мікрорельєф, відзначено зниження висоти мікронерівностей поверхні  $Ra$  0,276,  $Rz$  2,58 (рис. 1, в, г).

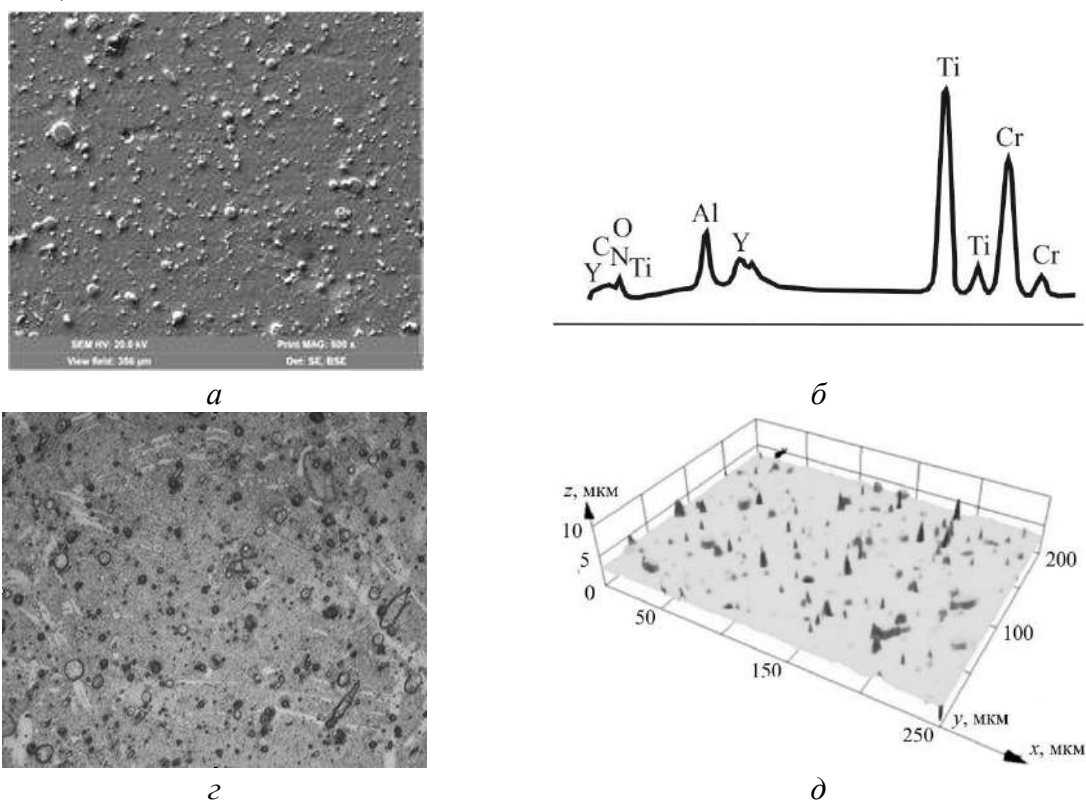


Рис. 1. Покриття (TiAlY)N/CrN. Морфологія поверхні в режимі SEM BSE (а), дифракційні спектри EDS покриття (б), мікрорельєф (г) та топографія (д) поверхні покриття ( $U_3 = -200$  В,  $P_N = 0,6$  Па)

При формуванні інтерфейсу багатошарового нітридного покриття (TiAlSiY)N/CrN виявлено незначний вміст краплинної фази, яка видалялася після полірування (рис. 2, а).

Характерний енергодисперсійний спектр покриття наведено на (рис. 2, б). Встановлено, що сформоване покриття має майже стехіометричну структуру. Хімічний склад покриття відповідає елементам, що входять до складу матеріалу катода, за винятком ітрію, який не виявлено, унаслідок концентрації менше ніж 0,1 %.

Отримане покриття характеризується утворенням фаз із кубічною (ГЦК) кристалічною ґраткою в обох шарах багат шарового покриття. У шарах нітридного покриття утворюється неупорядкований твердий розчин  $(\text{TiAlSiY})\text{N}$  з кристалічними ґратками структурного типу  $\text{NaCl}$  і  $\text{CrN}$ . Інтенсивність ліній рентгенівського спектра вказує на наявність міцної (111) текстури в багатоеlementному нітриді та нітриді хрому. Зерна цих фаз переважно орієнтовані так, що їхні кристалографічні площини (111) паралельні поверхні зразка. Розмір ОКР становить 14,6 нм.

Шорсткість покриття  $(\text{TiAlSiY})\text{N}/\text{CrN}$  після його формування є низькою ( $R_a$  0,0628  $R_z$  0,5638) (рис. 2, в, г), що зумовлено використанням катодних матеріалів з хорошою теплопровідністю.

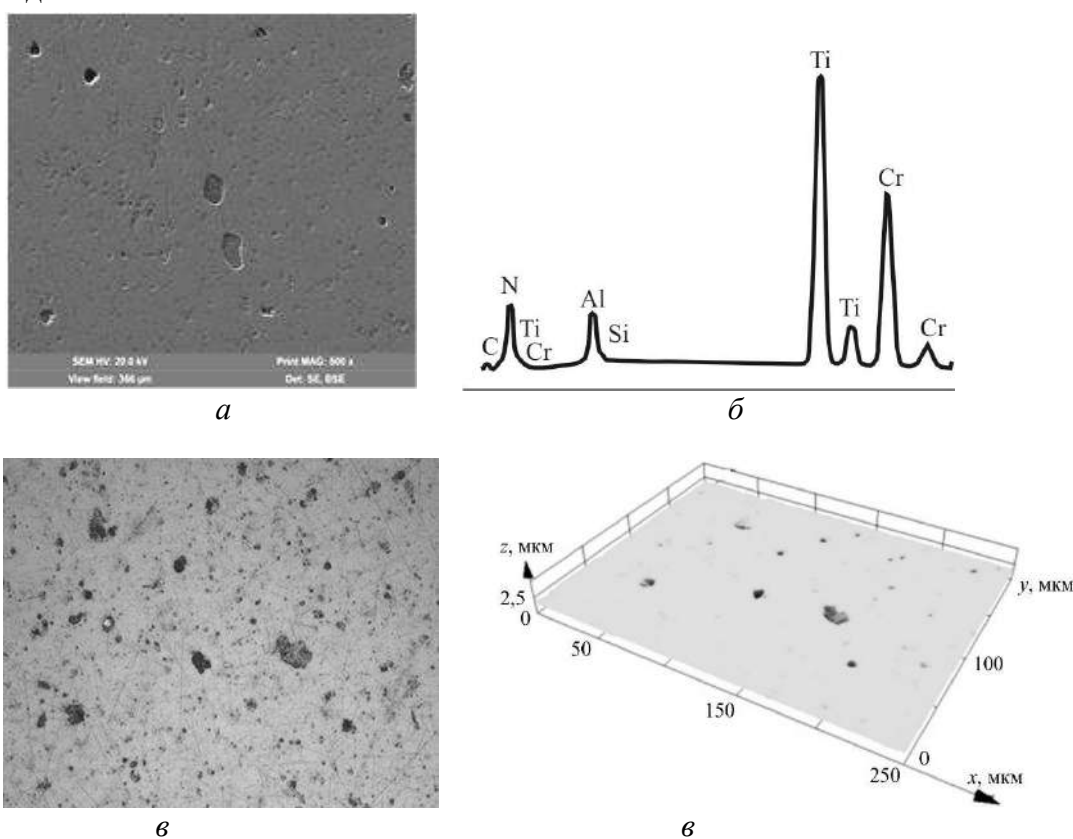


Рис. 2. Покриття  $(\text{TiAlSiY})\text{N}/\text{CrN}$ . Морфологія поверхні в режимі SEM BSE (а), дифракційні спектри EDS покриття (б), мікрорельєф (в) та топографія (г) поверхні покриття ( $U_3 = -200 \text{ В}$ ,  $P_N = 0,6 \text{ Па}$ )

Морфологія поверхні багат шарового нітридного покриття  $(\text{TiZrNbYAl})\text{N}/\text{CrN}$  покриття демонструє досить велику кількість крапельної фази матеріалу катода (рис. 3, а). Така велика кількість крапель пояснюється відносно низькою теплопровідністю  $\text{TiZrNbYAl}$  катода/мішені. Велика кількість краплинної фази призводить до збільшення процентного вмісту елементів  $\text{Ti}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Y}$  в покритті. При цьому формувалася ОЦК структура, яка не утворювала нітриду, що несприятливо для покриття, що створено для використання на різальному інструменті. Так само краплинна фаза створює труднощі при проведенні механічних випробувань, зокрема визначення мікротвердості.

Товщина отриманого покриття становить 7,0 мкм, а в районах крапельної фази може досягати 9,0 мкм.

На рис. 3, б наведено характерний енергодисперсійний спектр покриття. Як видно, весь елементний склад двох катодів розкривається в покритті.

Мікрогеометрія поверхні розділу покриття після її формування (від  $Ra$  0,43 до  $Rz$  3,23) (рис. 3, в, з), яка зумовлена краплинною фазою, призводить до обмежень точності вимірювання мікротвердості та дослідження методом скретч-тесту. Розвинена поверхня за рахунок краплинної фази може негативно впливати на зносостійкість різального інструменту з таким покриттям через крихке руйнування більш м'яких крапель.

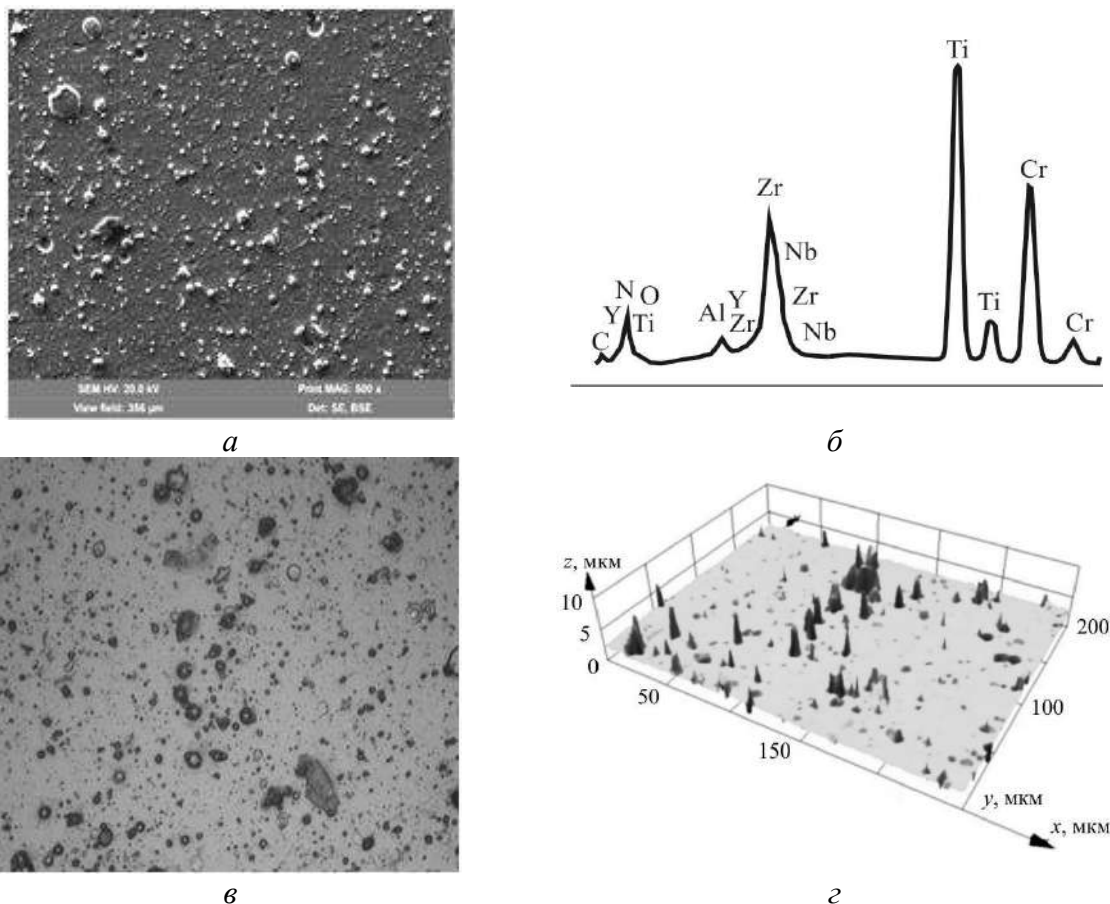


Рис. 3. Покриття  $(TiZrNbYAl)N/CrN$ . Морфологія поверхні в режимі SEM BSE (а), дифракційні спектри EDS покриття (б), мікрорельєф (в) та топографія (з) поверхні покриття ( $U_3 = -200$  В,  $P_N = 0,6$  Па)

Механічні властивості покриттів наведені в табл. 1. Залежно від умов осадження мікротвердість досліджуваних покриттів змінюється в широких межах. Слід зазначити, що мікротвердість покриттів може значно перевищувати мікротвердість нітридів (одношарових покриттів), що входять до їхнього складу. Наприклад, покриття  $TiAlSiYN$  має мікротвердість 34 ГПа, покриття  $CrN$  – 26 ГПа. При дослідженні поверхні покриттів сколів і тріщин не виявлено, що знижує ймовірність утворення дефектів і тріщин при термобаричному навантаженні покриттів при їх використанні в різальному інструменті.

Таблиця 1 – Механічні властивості отриманих покриттів

Покриття	Мікротвердість, ГПа	Модуль Юнга, ГПа
$(TiAlY)N/CrN$	25,0	310
$(TiAlSiY)N/CrN$	30,5	295
$(TiZrNbYAl)N/CrN$	32,0	380



Таблиця 2 – Результати трибологічних випробувань отриманих покриттів

Покриття	Тип руйнування	Нормальне зусилля при руйнуванні, сН	Максимальне навантаження, сН
(TiAlY)N/CrN	Адгезійне	75	100
(TiAlSiY)N/CrN	Когезійне	84	100
(TiZrNbYAl)N/CrN	Когезійне	92	100

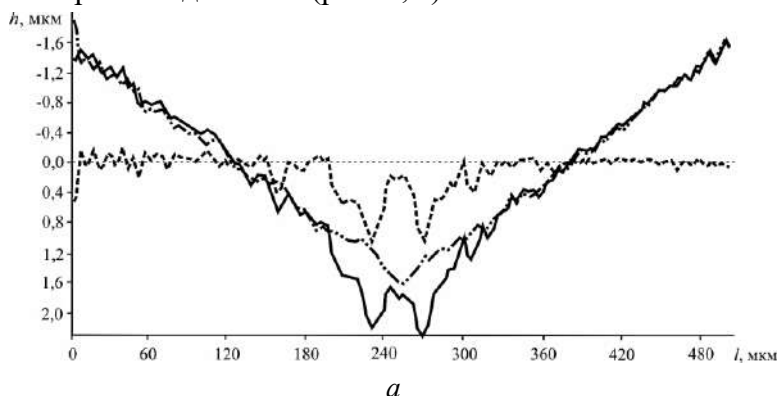
Трибологічні випробування покриттів на підкладці із ПКНБ проводилися за методом скретч-тестування (табл. 2) та визначення максимальних зусиль руйнування покриттів при повздовжньому переміщенні індентора і постійному зростанні навантаження, максимальне значення якого становило 100 г.

Аналіз отриманих результатів трибологічних випробувань методом скретч-тестування показав, що для покриттів (TiAlSiY)N/CrN та (TiZrNbYAl)N/CrN не відзначено відшарування покриття від основи, а характерний тип руйнування – когезійний.

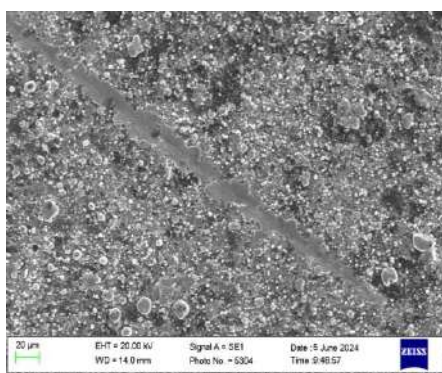
Як приклад на рис. 4, а наведено сканограма (графік залежності глибини занурення індентора від координати переміщення) навантажень при прямому переміщенні індентора та профіль поверхні руйнування – горизонтальна лінія (рис. 4, а), а також зображення поверхні зразка покриття (TiZrNbYAl)N/CrN, отриманого при  $U_3 = -200$  В,  $P_N = 0,6$  Па (рис. 4, б).

Після трьох проходів максимальна глибина занурення індентора в поверхню покриття (TiZrNbYAl)N/CrN становила 2,0 мкм. Це підтверджує, що покриття здатні витримувати значні навантаження.

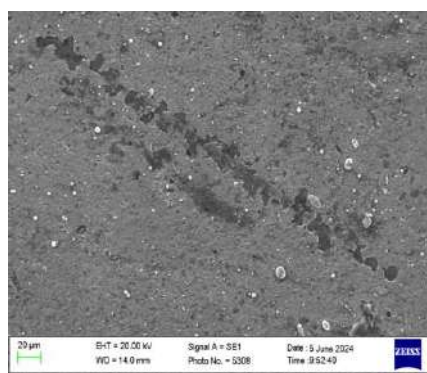
Для покриття (TiAlY)N/CrN характерний адгезійний тип руйнування, що призводить до відшарування покриття від основи (рис. 4, в).



а



б



в

Рис. 4. Результати трибологічних випробувань покриттів:  
а – зворотне сканування та профіль руйнування покриття (TiZrNbYAl)N/CrN ( $h$  – глибина втілення індентора,  $l$  – довжина траси сканування); б – поверхня зразка покриття (TiZrNbYAl)N/CrN; в – поверхня зразка покриття (TiAlY)N/CrN



Враховуючи фізико-механічні та трибологічні дослідження покриттів, можна запропонувати як перспективний напрям використання покриттів  $(\text{TiAlSiY})\text{N}/\text{CrN}$  та  $(\text{TiZrNbYAl})\text{N}/\text{CrN}$  у різальному інструменті обробку конструкційних матеріалів, для яких характерна адгезійна взаємодія з матеріалом інструменту, наприклад жароміцних сплавів.

**Висновки.** Для багат шарових покриттів на основі системі  $\text{TiAlN} - (\text{TiAlY})\text{N}/\text{CrN}$ ,  $(\text{TiAlSiY})\text{N}/\text{CrN}$ ,  $(\text{TiZrNbYAl})\text{N}/\text{CrN}$ , нанесених на підложку з надтвердої кераміки на основі кубічного нітриду бору, досліджено структурний стан, якість поверхні, механічні та трибологічні властивості інтерфейсу. Встановлено: 1) показники стану інтерфейсу покриттів пов'язані з характером легування їх матеріалів; 2) наявність краплинної фази на інтерфейсі покриттів зумовлена хімічним складом їхніх матеріалів; 3) шорсткість поверхні інтерфейсу покриттів зумовлена наявністю на ній краплинної фази; 4) мікротвердість покриттів зумовлена їхнім хімічним складом; 5) залежно від характеру легування покриття має місце адгезійне або когезійне руйнування покриття; 6) для покриттів  $(\text{TiAlSiY})\text{N}/\text{CrN}$  та  $(\text{TiZrNbYAl})\text{N}/\text{CrN}$  пропонується застосування в різальному інструменті при обробці жароміцних сплавів.

**Джерело фінансування.** Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в межах виконання проєкту «Створення композитів на основі кубічного нітриду бору із захисними наноструктурними покриттями, вивчення їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей в умовах формування виробів авіаційної техніки» (реєстраційний номер проєкту 2022.01/0046) (проєкт-переможець конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди»).

#### Список використаних джерел

1. Внуков, Ю. Н. Резание инструментом с покрытием : уч. пособие / Ю. Н. Внуков, Э. В. Кондрачук, Е. Б. Козлова. – Запорожье : ЗНТУ, 2015. – 48 с.
2. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным флюем : справочник / Г. И. Костюк. – Харьков : Антиква, 2003. – 412 с.
3. Высокопроизводительная чистовая лезвийная обработка деталей из сталей высокой твердости / С. А. Клименко, А. С. Манохин, М. Ю. Копейкина, С. Ан. Клименко, Ю. А. Мельничук, А. А. Чумак ; под ред. С.А. Клименко. – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2018. – 304 с.
4. Manokhin, A. S. Promising types of coatings for PCBN tools / A. S. Manokhin, S. A. Klimentko, S. An. Klimentko, V. M. Beresnev // J. of Superhard Mat. – 2018. – Vol. 40, № 6. – P. 424-431.
5. Veprek, S. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites / S. Veprek, M. Veprek-Heijman, P. Karvankov, J. Prochazka // Thin Solid Films. – 2005. – 476. – P. 1-29.
6. Гранкин, С. С. Механічні властивості наноструктурованих покриттів  $(\text{Ti}, \text{Al})\text{N}$  і  $(\text{Ti}, \text{Cr})\text{N}$ , отриманих методом вакуумно-дугового осадження / С. С. Гранкин, У. С. Немченко, В. Ю. Новиков, О. В. Соболев, Л. В. Маликов, С. И. Плиев // Фізика та інженерії поверхні. – 2014. – Том 12, № 2.
7. Береснев, В. М. Структура и механические свойства вакуумно-дуговых покрытий системы  $\text{TiAlSiY}$ , осажденных в азотной атмосфере / В. М. Береснев, О. В. Соболев, А. Д. Погребняк и др. // Физика и химия обработки материалов. – 2017. – № 2. – С. 34-43.
8. Musil, J. Ch. Physical and mechanical properties of hard nanocomposite films prepared by reactive magnetron sputtering / J. Musil // Nanostructured Hard Coatings. – Kluwer Academic; Plenum Publishers, 2005.
9. Азаренков, Н. А. Наноструктурные покрытия и наноматериалы : Основы получения. Свойства. Области применения: Особенности современного наноструктурного направления в нанотехнологии / Н. А. Азаренков, В. М. Береснев, А. Д. Погребняк, Д. А. Колесников. – Москва : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 368 с.

10. Kauffmann, F. Mirostructural size effects on the hardness of nanocrystalline TiN/amorphous- SiNx coatings prepared by magnetron sputtering / F. Kauffmann, G. Dehm, V. Schier et al. // *Thin Solid Films*. – 2005. – Vol. 473. – Pp. 114-122.
11. Dobrzański, L. A. Structure and mechanical properties of gradient PVD coatings / L. A. Dobrzański, L. W. Żukowska, J. Mikuła et al. // *J. of Mat. Proc. Technol.* – 2008. – Vol. 201, № 1-3.
12. Tadahiro, W. Tool wear of (Ti, Al) N-coated polycrystalline cubic boron nitride compact in cutting of hardened steel / W. Tadahiro, H. Hiroyuki // *IOP Conf. Ser. : Mat. Sci. Eng.* – 2017. – № 264. – Pp. 1-8.

### References

1. Vnukov, Yu.N., Kondratyuk, E.V., Kozlova, Ye.B. (2015). *Rezaniye instrumentom s pokrytiyem [Cutting with a coated tool]*. ZNTU.
2. Kostyuk, G.I. (2003). *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym floyem: spravochnik [Efficient cutting tool with a coating and hardened floe: reference book]*. Antikva.
3. Klimenko, S.A., Manokhin, A.S., Kopeykina, M.Yu., Klimenko, S.An., Melniychuk, Yu.A., Chumak, A.A. (2018). *Vysokoproizvoditelnaya chistovaya lezviynaya obrabotka detaley iz staley vysokoy tverdosti [High-performance finishing blade machining of parts made of high-hardness steels]*. ISM im. V.N. Bakulya NAN Ukrainy.
4. Manokhin, A.S., Klimenko, S.A., Klimenko, S.An., Beresnev, V.M. (2018). Promising types of coatings for PCBN tools. *J. of Superhard Mat.*, 40(6), 424– 431.
5. Veprek, S., Veprek-Heijman, M., Karvankov, P., Prochazka, J. (2005). Different approaches to superhard coatings and nanocomposites. *Thin Solid Films*, 476, 1–29.
6. Grankin, S.S., Nemchenko, U.S., Novikov, V.Yu., Sobol, O.V., Malikov, L.V., Pliyev, S.I. (2014). Mekhanichní vlastivostí nanostrukturovanikh pokrittív (Ti, Al)N í (Ti, Cr)N, otrimanikh metodom vakuumno-dugovogo osadzhennya [Mechanical properties of nanostructured (Ti, Al)N and (Ti, Cr)N coatings obtained by vacuum-arc deposition]. *Fiziki ta inzhenerií poverkhni – Surface Physics and Engineering*, 12(2).
7. Beresnev, V.M., Sobol, O.V., Pogrebnyak, A.D. (2017). Struktura i mekhanicheskiye svoystva vakuumno-dugovykh pokrytiy sistemy TiAlSiY, osazhdennykh v azotnoy atmosphere [Structure and mechanical properties of vacuum-arc coatings of the TiAlSiY system deposited in a nitrogen atmosphere]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov – Physics and chemistry of material processing*, (2), 34–43.
8. Musil, J. Ch. (2005). Physical and mechanical properties of hard nanocomposite films prepared by reactive magnetron sputtering. *Nanostructured Hard Coatings*. Kluwer Academic; Plenum Publishers.
9. Azarenkov, N.A., Beresnev, V.M., Pogrebnyak, A.D., Kolesnikov, D.A. (2012). *Nanostrukturnyye pokrytiya i nanomaterialy: Osnovy polucheniya. Svoystva. Oblasti primeneniya: Osobennosti sovremennogo nanostrukturnogo napravleniya v nanotekhnologii [Nanostructured coatings and nanomaterials: Basics of production. Properties. Application areas: Features of the modern nanostructured direction in nanotechnology]*. Knizhnyy dom «LIBROKOM».
10. Kauffmann, F., Dehm, G., Schier, V. et al. (2005). Mirostructural size effects on the hardness of nanocrystalline TiN/amorphous- SiNx coatings prepared by magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 473, 114–122.
11. Dobrzański, L.A., Żukowska, L.W., Mikuła, J. et al. (2008). Structure and mechanical properties of gradient PVD coatings. *J. of Mat. Proc. Technol.*, 201(1–3).
12. Tadahiro, W., Hiroyuki H. (2017). Tool wear of (Ti, Al) N-coated polycrystalline cubic boron nitride compact in cutting of hardened steel. *IOP Conf. Ser. : Mat. Sci. Eng.*, 264, 1–8.

Отримано 29.08.2024

**Sergii Klymenko<sup>1</sup>, Andrii Manokhin<sup>2</sup>, Serhii Klymenko<sup>3</sup>, Yurii Melniychuk<sup>4</sup>,  
Anatolii Chumak<sup>5</sup>, Maryna Kopieikina<sup>6</sup>, Vyacheslav Beresnev<sup>7</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Deputy Director for Research  
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [atmu@meta.ua](mailto:atmu@meta.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>  
**ResearcherID:** [Q-8928-2019](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771). **SCOPUS Author ID:** [57221904325](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,  
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools  
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [the.manokhin@gmail.com](mailto:the.manokhin@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>  
**ResearcherID:** [DGN-4506-2022](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482). **SCOPUS Author ID:** [37059129600](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482)

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,  
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools  
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [alcon1202@ukr.net](mailto:alcon1202@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>  
**ResearcherID:** [FFQ-3675-2022](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519). **SCOPUS Author ID:** [57197629303](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519)

<sup>4</sup>PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,  
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools  
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [en22@i.ua](mailto:en22@i.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4529-2775>. **SCOPUS Author ID:** [57193381972](https://orcid.org/0000-0003-4529-2775)

<sup>5</sup>PhD in Technical Sciences,  
Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools  
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [chumak1826ar@gmail.com](mailto:chumak1826ar@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9054-3196>  
**ResearcherID:** [AEK-3163-2022](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196). **SCOPUS Author ID:** [58162161100](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196)

<sup>6</sup>PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,  
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools  
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [atmu1@meta.ua](mailto:atmu1@meta.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>  
**Researcher ID:** [FZY-5450-2022](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503). **SCOPUS Author ID:** [36337661400](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503)

<sup>7</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Radiation Materials Science  
V.N. Karazin Kharkov National University (Kharkov, Ukraine)  
**E-mail:** [v.beresnev@karazin.ua](mailto:v.beresnev@karazin.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4623-3243>  
**ResearcherID:** [ELI-3316-2022](https://orcid.org/0000-0002-4623-3243). **SCOPUS Author ID:** [26530793400](https://orcid.org/0000-0002-4623-3243)

## MULTYLAYER DOPED NITRIDE COATINGS OF THE TiAlN SYSTEM

*The results of studies of the range of multilayer nanostructured coatings based on the TiAlN system - structural state, morphology, composition, and microgeometry of the interface - are presented. A coating with a total thickness of 7-8 μm and a layer thickness (TiAlN/CrN) of 20-30 nm was applied by the vacuum arc method to a base of superhard ceramics based on cubic boron nitride. The influence of doping of the coatings with Y, Y, and Si materials and a complex of elements such as Y, Zr, and Nb on the state of the interface was considered. For coatings with different levels of material doping, the presence of a droplet phase at the interface of the coatings and its effect on the defectiveness and surface roughness of the coatings were analyzed. It was found that the minimum amount of the droplet phase at the interface is inherent in (TiAlSiY)N/CrN, which is associated with the high thermal conductivity of the resulting coating. A large amount of the droplet phase is characteristic of the (TiZrNbYAl)N/CrN coating. The roughness of the interfaces of the coatings changes according to the amount of the droplet phase. The microhardness of the coatings was determined, the value of which is related to the presence of alloying elements in the material. The microhardness of the coatings can exceed the microhardness of the nitrides that make up their composition: the microhardness of the (TiAlSiY)N/CrN coating is 30.5 GPa, and that of the CrN nitride is 26 GPa. No chips or cracks were found at the interfaces of the studied coatings. Based on the analysis of the results of studying the interface of coatings by the method of sketch testing, the aggressive and cohesive mechanisms of coating destruction were established, depending on the nature of the alloying of their materials. The results of studies of the mechanical and tribological properties of coatings allow us to propose promising areas for the use of coatings in PcBN cutting tools.*

**Keywords:** coating based on TiAlN system; structure; interface, morphology; composition; surface microgeometry; fracture.  
*Fig.: 4. Table: 2. References: 12.*

**Олег Богданович Книш<sup>1</sup>, Андрій Володимирович Стрілецький<sup>2</sup>,  
Оксана Іванівна Млинко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних і пакувальних виробництв  
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

**E-mail:** [Oleh.B.Knysh@lpnu.ua](mailto:Oleh.B.Knysh@lpnu.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5854-1879>

**Scopus Author ID:** [57209411556](https://orcid.org/0000-0001-5854-1879)

<sup>2</sup>аспірант кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних і пакувальних виробництв  
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

**E-mail:** [arrow220682@gmail.com](mailto:arrow220682@gmail.com)

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри вищої математики  
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

**E-mail:** [Oksana.I.mlynko@lpnu.ua](mailto:Oksana.I.mlynko@lpnu.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9878-6846>

**Scopus Author ID:** [57296733200](https://orcid.org/0000-0001-9878-6846)

## ГЕОМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ МЕХАНІЗМІВ ПРИВОДА СТОЛА З ПОСТУПАЛЬНИМ РУХОМ ТА ПРОКОЛЮВАЧІВ НИТКОШВЕЙНОЇ МАШИНИ

*Важливою операцією при виготовленні книжкової продукції скріпленої нитками є шиття книжкових блоків. За результатами аналізу наукових праць, які присвячені дослідженню технологічного процесу шиття нитками книжкових блоків, окреслено шляхи удосконалення конструкції механізмів хитного стола та проколювачів ниткошвейної машини. Запропоновано схему з поступальним столом та спрощений кулачково-важільний механізм привода проколювачів. Удосконалена циклограма роботи механізмів забезпечить зменшення вистою стола в зоні шиття. Проведений геометричний синтез механізмів поступального стола та проколювачів у відносних величинах уможливує подальший їхній кінематичний та силовий аналізи.*

**Ключові слова:** ниткошвейна машина; стіл; зошит; механізм; кулачок; важіль; проколювачі; синтез; привод.

*Рис.: 4. Бібл.: 11.*

**Актуальність теми дослідження.** Шиття нитками – найдавніший спосіб скріплення окремих зошитів у книжкові блоки. Він виник задовго до винаходу друкування і протягом тривалого часу є домінуючим для подібних операцій. Книжки зшиті нитками, є міцними, довговічними, характеризуються хорошою здатністю до розкривання. Шиття книжкових блоків нитками виконується на ниткошвейних машинах. Їхня циклічність роботи значною мірою залежить від швидкодії механізмів хитного стола та проколювачів. Тому дослідження спрямовані на збільшення швидкості роботи ниткошвейної машини при забезпеченні якості та надійності шиття книжкових блоків нитками є актуальними.

**Постановка проблеми.** Високі вимоги до якості готової продукції визначили обґрунтовані вимоги до функціонування окремих вузлів ниткошвейного устаткування, зокрема до хитного стола. Хитний стіл виконує комплекс основних операцій: приймає на сідло напіврозкритий зошит; транспортує його в зону шиття; вирівнює зошит; контролює наявність зошита на хитному столі; бере участь у шитті; проштовхує зшиті зошити по приймальному столу [1].

Привод хитного стола в ниткошвейній машині представлений спареним кулачково-коромисловим механізмом. Він забезпечує функціональну циклічність роботи. Ефективна робота ниткошвейної машини значно залежить від вибору раціональної конструкції стола, його кінематичних та динамічних характеристик. Важливу функцію виконує механізм проколювачів, що забезпечує підготовку зошитів до шиття нитками. Його привод є багатоланковим і складається із трьох контурів: кулачково-коромислового, чотирилан-

ковика та кривошипно-повзунного. Складність конструкції механізму проколювачів зумовлює його велику металомісткість, наявність численних шарнірів спричинює появу зазорів у процесі його експлуатації, що негативно впливає на точність руху проколювачів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідженням надійності роботи ниткошвейних машин присвячено роботи. Зокрема, автори [2] доходять висновку, що основним обмежувальним фактором підвищення швидкодії ниткошвейної машини є самонаклад зошитів. При цьому їхні дослідження ґрунтуються лише на статистичному аналізі відмов роботи механізму, а шляхи вирішення проблеми в цій роботі не вказано.

Питання підвищення надійності роботи самонакладів зошитів розглянуто в роботах [3; 4]. Авторами визначено вплив законів періодичного руху клапанів ротаційного вивідного пристрою самонакладу зошитів на характер траєкторії руху. Встановлено, що найголовнішим фактором, що впливає на характер траєкторії руху є фазовий кут віддалення. Розроблено математичну модель руху клапанів ротаційного вивідного пристрою самонакладу зошитів, яка дозволяє отримувати раціональні схемні рішення механізму клапанів.

У роботі [5] проведено аналіз технології шиття блоків нитками, встановлено наявність взаємозв'язку між структурними елементами конструкції ниткошвейної машини і виявлено, що від їхньої роботи залежить міцність скріплення книжкових блоків та готових видань. Задекларовано проведення подальших аналітичних та експериментальних досліджень із розробки удосконалених класифікаційних схем устаткування, з урахуванням принципів системотехнічного та функціонально-структурного аналізів, які дозволяють сформулювати вимоги до технологічного процесу шиття книжкових блоків та методів їх контролю. Загальним питанням класифікації ниткошвейних машин присвячена робота [6].

Наведені в роботі [1] результати наукових досліджень групи науковців засвідчили, що функціонування механізму хитного стола ниткошвейних машин супроводжується наявністю значних інерційних навантажень, що негативно впливають на його динаміку. Автори пропонують для мінімізації інерційних навантажень вводити у конструкцію додаткові зрівноважувальні пристрої (наприклад, торсіон), що спричинить ускладнення конструкції механізму хитного стола.

У роботі [7] автори пропонують удосконалену схему механізму хитного стола та проколювачів, яка передбачає застосування зубчастої передачі у приводі механізму проколювачів. Мінімізація інерційних навантажень у цьому випадку досягається завдяки зменшенню маси хитного стола з проколювачами. Однак слід відзначити, що наявність реверсивної зубчастої пари «сектор – шестерня» спричинить виникнення зазорів, що може негативно вплинути на точність руху проколювачів.

У патенті [8] для покращення якості шиття та збільшення швидкості ниткошвейної машини запропоновано конструкцію «ламаного» хитного стола. Це дозволяє точно позиціонувати хитний стіл у зоні шиття, зменшити кількість ламань голок та гачків, підвищити ефективність та швидкість роботи машини.

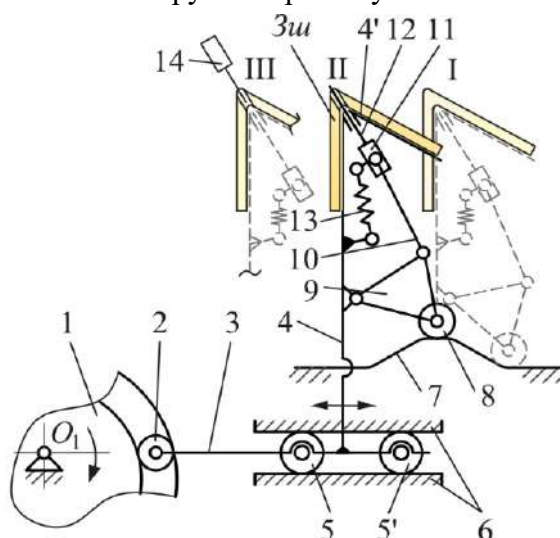
У роботі [9] наведено результати теоретичних досліджень пристрою для фіксування зошитів книжкових блоків на хитному столі ниткошвейних автоматів. Успішне функціонування запропонованого пристрою можливе за умови додаткової модернізації механізму бокового упору, який вирівнює складні зошити на сідлі хитного стола під час руху. Питання геометричного синтезу механізму привода натискної плити у штанцювальному пресі висвітлено в роботі [10].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що наявна у відкритому доступі наукова інформація щодо дослідження та удосконалення механізмів хитного стола та проколювачів ниткошвейної машини лише частково присвячена вирішенню наявних проблем комплексу механізмів хитного стола. Водночас не вирішеним залишається питання спрощення конструкції механізмів хитного стола та проколювачів.

**Мета статті** – провести комплексний аналіз функціонування механізмів привода хитного стола та проколювачів, запропонувати напрямки їхнього удосконалення для створення передумов якісного виконання та підвищення ефективності технологічної операції шиття книжкових блоків, спрощення конструкції і покращення динаміки роботи механізмів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В основу пропонованої конструкції стола та проколювачів ниткошвейної машини ставиться задача забезпечення поступального руху стола з проколювачами, у якому функціонування стола створює передумови необхідної точності його позиціонування відносно швейної каретки, мінімізує інерційні навантаження, збільшує швидкість роботи ниткошвейної машини, при цьому одночасно підвищується ефективність та спрощується конструкція механізму проколювачів.

На рис. 1 зображено запроповану кінематичну схему механізмів поступального стола та проколювачів ниткошвейної машини. Механізм поступального стола складається з пазового кулачка 1, ролика 2, штовхача 3, жорстко приєднаного до стола 4 з сидлоподібною вершиною 4', роликів 5 і 5', верхньої та нижньої напрямних 6. Механізм проколювачів складається з нерухомої гірці 7, ролика 8, двоплечого важеля 9, шатуна 10, каретки 11 з проколювачами 12 та пружини розтягу 13.



*Рис. 1. Кінематична схема механізмів поступального стола та проколювачів у ниткошвейній машині*

Джерело: розроблено авторами.

Механізм поступального стола працює таким чином. У початковому положенні I на сидло 4' поступального стола 4 подається зошит *Зш* у розкритому вигляді. При обертанні головного вала  $O_1$  змінюється радіус-вектор пазового кулачка 1. За рахунок обкочування пази кулачка роликком 2 стіл 4, що жорстко з'єднаний зі штовхачами 3 разом з зошитом *Зш* завдяки роликам 4 і 5, що перекочуються в напрямних 6, переміщується справа на ліво в зону шиття. При наближенні до зони шиття III прискорення стола 4 плавно зменшується, чим забезпечується точне позиціонування його сидла 4' з зошитом *Зш* відносно швейної каретки 14 з голками з нитками та гачками, а отже, – якісне шиття книжкового блока швейними інструментами.

Механізм проколювачів працює наступним чином. У початковому положенні I (рис. 1) проколювачі 12 знаходяться всередині сидла 4' стола 4 (штрихова лінія). При переміщенні стола справа на ліво ролик 8 обкочується по нерухомій гірці 7. Це забезпечує коливний рух важеля 9, який через шатун 10 приводить у рух каретку 11 з проколюва-

чами 11. При цьому відбувається поступове піднімання проколювачів з одночасним проколюванням отворів у корінці зошита. Посередині циклу переміщення стола 4 (положення II) проколювачі досягають максимального переміщення. При подальшому переміщенні стола у позицію шиття III ролик 8 опускається по нерухомій гірці 7 чим забезпечується зворотний рух проколювачів і у крайньому лівому положенні стола 4 вони переміщуються у своє нижнє положення. Силове замикання між роликом 8 та гіркою 7 забезпечує пружина розтягу 12. Запропонована схема механізму проколювачів дозволяє функціонально змістити операцію проколювання отворів у фальцях зошитів під час переміщення поступального стола з позиції накидання зошитів на сідло в позицію шиття нитками. За рахунок цього покращується ефективність експлуатації механізму проколювачів, що забезпечує зменшення тривалості кінематичного циклу шиття при збереженні необхідної якості проколюваних отворів, спрощення конструкції механізму.

Циклограма руху механізмів привода стола та проколювачів ниткошвейної машини зображена на рис. 2. У випадку застосування хитного або поступального стола їхня циклограма є ідентичною (рис. 2, а). Для існуючого механізму рух проколювачів у напрямку зошита починається при переміщенні хитного стола у зону шиття, а проколювання отворів – під час вистою хитного стола у зоні шиття (рис. 2, б). Основним функціональним недоліком існуючого механізму проколювачів є виконання операції проколювання отворів у корінці зошита під час вистою в зоні шиття книжкового блока. У пропонованому варіанті (рис. 2, в) дана операція виконується під час руху поступального стола в зону шиття. При цьому переміщення проколювачів з крайнього нижнього до крайнього верхнього положення відбувається на половині циклу лінійного переміщення стола, що відповідає куту  $\varphi = 41^\circ$  (рис. 2, в) повороту вала  $O_1$  привода кулачка 1 (рис. 1).

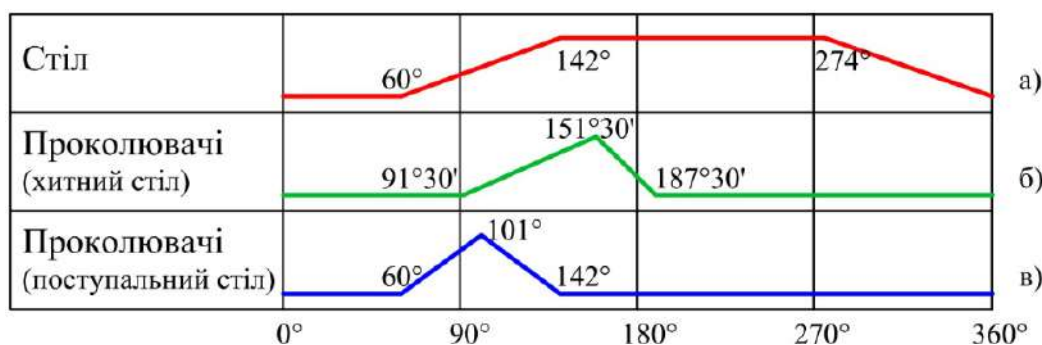


Рис. 2. Циклограма механізмів привода стола та проколювачів ниткошвейної машини  
Джерело: розроблено авторами.

Задачею геометричного синтезу механізму поступального стола є визначення його горизонтального переміщення, виходячи з наявних геометричних параметрів хитного стола, його кутового переміщення та циклограми. При цьому за аналог взято ниткошвейну машину БНШ-6А з відповідними співвідношеннями реальних геометричних розмірів. Заданими є наступні відносні геометричні параметри (рис. 3):

- $l_1 = 1,0$  – відстань від вертикальної осі хитання стола до його вершини в позиції шиття книжкового блока;
- $R = 11,0$  – діагональ  $OA_i$ , що з'єднує вісь хитання стола і його вершину.





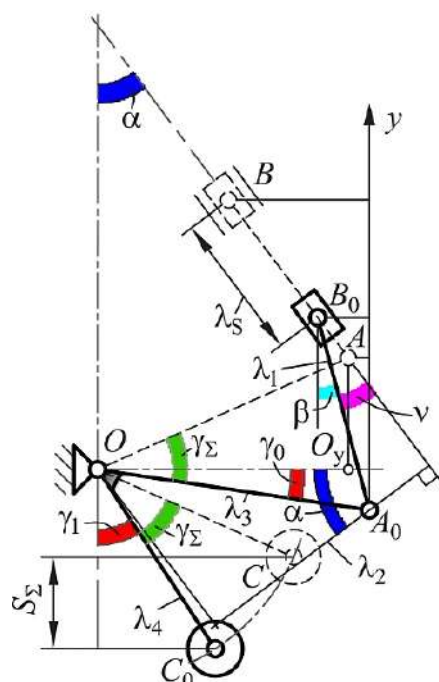


Рис. 4. Розрахункова схема до геометричного синтезу механізму привода проколювачів  
Джерело: розроблено авторами.

Відома методика розрахунку вихідних і комбінованих механізмів передбачає застосування «одиночного» механізму [11]. При цьому довжина ведучої ланки приймається рівною одиниці. Розроблена в цій роботі методика синтезу комбінованого кулачково-важільного механізму із повзуном привода проколювачів передбачає «зворотній» розрахунок. При ньому за одиницю приймається рівним відносно лінійне переміщення  $\lambda_S = 1$  веденої ланки – проколювачів (рис. 4). Це зумовлено технологічною необхідністю забезпечити лінійне переміщення проколювачів на величину  $S_{пр} = 30$  мм, як у ниткошвейній машині БНШ-6А.

Для геометричного синтезу механізму прийнято наступні відносні параметри (з урахуванням реальних геометричних розмірів ланок механізму машини БНШ-6А):

- $\lambda_S = 1,0$  – максимальне відносне переміщення проколювачів;
- $\lambda_1 = 1,07$  – відносна довжина шатуна;
- $\lambda_2 = 2,0$  – відносна довжина ексцентриситету;
- $\lambda_3 = 2,03$  – відносна довжина важеля;
- $\lambda_4 = 1,6$  – відносна довжина важеля з роликом.

Абсолютні значення геометричних параметрів механізму:

- $\gamma_0 = 6^\circ$  – початковий кут положення важеля відносно горизонталі;
- $\gamma_1 = 47^\circ$  – початковий кут положення важеля з роликом відносно вертикалі;
- $\alpha = 37^\circ$  – кут між напрямком траєкторії проколювачів та вертикаллю.

Параметри, які визначаються при геометричному синтезі механізму:

- $\nu$  – кут між шатуном та напрямком траєкторії проколювачів у крайньому нижньому положенні проколювачів;
- $\gamma_\Sigma$  – сумарний кут коливання важеля;
- $S_\Sigma$  – максимальне лінійне переміщення ролика по вертикалі.

Кут  $\nu$  положення шатуна визначаємо із проєкцій важеля  $\lambda_3$  та шатуна  $\lambda_1$  на ексцентриситет  $\lambda_2$  (рис. 4):

$$\lambda_1 \cdot \sin v = \lambda_2 - \lambda_3 \cdot \cos(\alpha + \gamma_0),$$

звідки

$$v = \arcsin \frac{\lambda_2 - \lambda_3 \cdot \cos(\alpha + \gamma_0)}{\lambda_1} \quad (2)$$

Для визначення кута  $\gamma_\Sigma$  коливання важеля проєктуємо довжини ланок механізму проколювачів на вертикальну вісь  $y$ :

- проєкція переміщення  $\lambda_S$  проколювачів:

$$\lambda_{Sy} = \lambda_S \cdot \cos \alpha;$$

- проєкція довжини  $\lambda_1$  шатуна у крайньому верхньому положенні проколювачів:

$$\lambda_{11y} = \lambda_1 \cdot \cos \alpha;$$

- проєкція довжини  $\lambda_1$  шатуна у крайньому нижньому положенні проколювачів:

$$\lambda_{12y} = \lambda_1 \cdot \cos \beta = \lambda_1 \cdot \cos(\alpha - v),$$

де  $\beta = (\alpha - v)$  – кут нахилу шатуна відносно вертикалі;

- проєкція довжини  $\lambda_3$  важеля у крайньому нижньому положенні проколювачів:

$$\lambda_{3y} = \lambda_3 \cdot \sin \gamma_0.$$

Сумарний кут  $\gamma_\Sigma$  коливання важеля визначаємо із прямокутного трикутника  $O_1AO_y$ :

$$\sin(\gamma_\Sigma - \gamma_0) = \frac{AO_y}{\lambda_3} = \frac{\lambda_{Sy} + \lambda_{12y} - \lambda_{3y} - \lambda_{11y}}{\lambda_3}, \text{ або}$$

$$\gamma_\Sigma = \arcsin \left( \frac{\lambda_S \cdot \cos \alpha + \lambda_1 \cdot \cos(\alpha - v) - \lambda_3 \cdot \sin \gamma_0 - \lambda_1 \cdot \cos \alpha}{\lambda_3} \right) + \gamma_0 \quad (3)$$

Максимальне лінійне переміщення  $S_\Sigma$  ролика по вертикалі визначаємо із геометричних залежностей проєктуванням довжини  $\lambda_4$  важеля з роликом у крайніх положеннях механізму на вертикальну вісь:

$$S_\Sigma = \lambda_4 \cdot \cos \gamma_1 - \lambda_4 \cdot \cos(\gamma_\Sigma + \gamma_1) \quad (4)$$

Як бачимо із залежностей (3, 4) кутовий розмах важеля та лінійне переміщення ролика по вертикалі є функціями геометричних параметрів кулачково-важільного механізму привода проколювачів.

Аналіз кінематичних залежностей механізму привода проколювачів є предметом наступних досліджень і у даній статті не розглядаються.

**Висновки.** На підставі аналізу літературних джерел запропоновано нову схему механізму поступального стола та кулачково-важільного з повзуном механізму привода проколювачів. Циклограма роботи удосконаленого механізму проколювачів уможливує проколювання отворів у корінці зошита під час його транспортування у зону шиття, що забезпечує зменшення вистою стола у зоні шиття на  $9^\circ 30'$  кута повороту приводного вала у порівнянні з існуючим механізмом.

За результатами геометричного синтезу механізмів у відносних величинах виведено аналітичні залежності їхніх геометричних параметрів, що уможливує подальший аналіз кінематичних та силових параметрів поступального стола та проколювачів.

#### Список використаних джерел

1. Хведчин, Ю. Й. Брошурувально-палітурне устаткування : Ч. 1: Брошурувальне устаткування : підруч. / Ю. Й. Хведчин. – Львів : ТеРус, 1999. – 336 с.

2. Андрущенко, В. В. Дослідження надійності ниткошвейної машини БНШ6А / В. В. Андрущенко, Б. О. Черня // Технологія і техніка друкарства. – 2009. – № 3(25). – С. 52-57.
3. Приставський, З. М. Аналіз руху механізму клапанів ротаційного вивідного пристрою самонакладів / З. М. Приставський // Технологія і техніка друкарства. – 2008. – № 1(19). – С. 58-64.
4. Приставський, З. М. Визначення кінематичних характеристик механізму клапанів ротаційного вивідного пристрою самонакладів зошитів / З. М. Приставський, В. В. Шебунін // Технологія і техніка друкарства. – 2008. – № 2(20). – С. 110-116.
5. Логазяк, І. Ю. Аналіз процесу скріплення книжкових блоків нитками / І. Ю. Логазяк // Технологія і техніка друкарства. – 2009. – № 4. – С. 86-90.
6. Логазяк, І. Ю. Класифікація ниткошвейних машин для скріплення книжкових блоків / І. Ю. Логазяк // Квалілогія книги. – 2010. – № 1(17). – С. 65-70.
7. Регей, І. І. Обґрунтування раціональної схеми механізмів хитного стола ниткошвейної машини та аналіз їх кінетостатичних параметрів / І. І. Регей, О. Б. Книш, А. Б. Коломієць // Поліграфія і видавнича справа. – 2010. – № 2(52). – С. 93-97.
8. Хитний стіл ниткошвейного автомата: пат. 98072 Україна: МПК В42В 9/00, В42В 2/00, В42С 1/00, D05В 75/00. Регей І. І., Книш О. Б., Хведчин Ю. Й. №а201104138; заявл. 05.04.2011; опубл. 10.04.2012. Бюл. №7. 2 с.
9. Логазяк, І. Ю. Удосконалення технології позошитного скріплення нитками книжкових блоків : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.05.01 / Логазяк Ірина Юріївна; Укр. акад. друкарства. – Львів, 2011. – 21 с.
10. Combined double crank wedging drive mechanisms of the press plate used in die-cutting press: synthesis, kinematic and functional / I. Rehei, V. Vlach, O. Knysh, R. Knysh & O. Mlynko // Academic journal of manufacturing engineering. – 2023. – Vol. 21, Issue 3 – P. 53-60.
11. Полюдов, О. М. Механіка поліграфічних і пакувальних машин: навч. посіб. / О. М. Полюдов. – Львів: УАД, 2005. – 177 с.

## References

1. Khvedchyn, Yu.Y. (1999). *Broshuruvalno-paliturne ustatkuvannia : Ch. 1: Broshuruvalne ustatkuvannia [Binding and finishing equipment: Part 1: binding equipment]*. TeRus.
2. Andrushchenko V. V., Chernia B. O. (2009). Doslidzhennia nadiinosti nytkoshveinoi mashyny BNSh6A [Research on the reliability of the BNSH6A thread-sewing machine]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva –Technology and printing technology*, (3(25)), 52–57.
3. Prystavskiy, Z.M. (2008). Analiz rukhu mekhanizmu klapaniv rotatsiinoho vyvidnoho prystroiu samonakladiv [Analysis of the movement of the valve mechanism of the rotary output device of automatic feeders]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva –Technology and printing technology*, (1(19)), 58–64.
4. Prystavskiy, Z.M., Shebunin, V.V. (2008). Vyznachennia kinematychnykh kharakterystyk mekhanizmu klapaniv rotatsiinoho vyvidnoho prystroiu samonakladiv zoshytiv [Determination of the kinematic characteristics of the valve mechanism of the rotary output device of automatic feeders for book blocks]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva –Technology and printing technology*, (2(20)), 110–116.
5. Lohaziak, I.Yu. (2009). Analiz protsesu skriplennia knyzhkovykh blokiv nytkamy [Analysis of the process of binding book blocks with thread]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva –Technology and printing technology*, (4), 86–90.
6. Lohaziak, I.Yu. (2010). Klasyfikatsiia nytkoshveinykh mashyny dlia skriplennia knyzhkovykh blokiv [Classification of thread-sewing machines for binding book blocks]. *Kvalilohiia knyhy – Book quality*, (1(17)), 65–70.
7. Rehei, I.I., Knysh, O.B., Kolomiets, A.B. (2010). Obgruntuvannia ratsionalnoi skhemy mekhanizmiv khytnoho stola nytkoshveinoi mashyny ta analiz yikh kinetostatychnykh parametriv [Justification of the rational scheme of the oscillating table mechanisms of a thread-sewing machine and the analysis of their kinetostatic parameters]. *Polihrafia i vydavnycha sprava – Polygraphy and Publishing*, (2(52)), 93–97.

8. Rehei I. I., Knysh O. B., Khvedchyn Yu. Y. *Khytnyi stil nytkoshveinoho avtomata [Perforator mechanism of a thread-sewing machine]*: pat. 98072 Ukraina: MPK B42B 9/00, B42B 2/00, B42C 1/00, D05B 75/00. No. a201104138.

9. Lohaziak, I.Yu. (2011). Udoskonalennia tekhnolohii pozoshytnoho skriplennia nytkamy knyzhkovykh blokiv. [Improvement of the technology of binding book blocks with thread]. *Extended abstract of candidate's thesis*. UAD.

10. Rehei, I., Vlach, V., Knysh, O., Knysh, R., & Mlynko, O. (2023). Combined double crank wedging drive mechanisms of the press plate used in die-cutting press: synthesis, kinematic and functional. *Academic journal of manufacturing engineering*, 21(3), 53–60.

11. Poliudov, O.M. (2005). *Mekhanika polihrafichnykh i pakuvalnykh mashyn [Mechanics of printing and packaging machines]*. UAD.

Отримано 19.09.2024

UDC 686.1.05

**Oleh Knysh<sup>1</sup>, Andrii Striletskyi<sup>2</sup>, Oksana Mlynko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department of Computerized Systems in Printing and Packaging Industries

Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [Oleh.B.Knysh@lpnu.ua](mailto:Oleh.B.Knysh@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5854-1879>

**Scopus Author ID:** 57209411556

<sup>2</sup> Doctoral Student of the Department of Computerized Systems in Printing and Packaging Industries

Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [arrow220682@gmail.com](mailto:arrow220682@gmail.com)

<sup>3</sup>Candidate of Technical Science, Associate Professor, Senior Instructor of the Department of Higher Mathematics

Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [Oksana.I.mlynko@lpnu.ua](mailto:Oksana.I.mlynko@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9878-6846>

**Scopus Author ID:** 57296733200

## GEOMETRIC SYNTHESIS OF MECHANISMS FOR THE TABLE DRIVE WITH LINEAR MOTION AND PERFORATORS IN A THREAD-SEWING MACHINE

*In the technological chain of book production bound with thread, an important operation is sewing book blocks with thread. This operation is performed on a thread-sewing machine. Its crucial components are mechanisms for driving the oscillating table and perforators. The article provides an overview of the work of researchers focused on the analysis and improvement of the technological process of sewing book blocks with thread. The review results show that a significant number of studies are devoted to reliability of thread-sewing machines. However, no current studies aim at improving the design of the table and perforator mechanisms. Existing research focuses on balancing excessive loads in the oscillating table drive by introducing additional balancing devices into the mechanism's design. The use of such devices is not always justified, as it complicates the mechanism's design and increases its metal content.*

*To improve reliability and productivity of thread-sewing machines, a scheme with a reciprocating table and a simplified cam-lever perforator mechanism is proposed. The improved cyclogram, when such mechanisms are used, will reduce the table's dwell time in the sewing zone and increase the machine's overall productivity. A geometric synthesis of the oscillating table and perforator mechanisms has been carried out in relative dimensions. The linear displacement of the table has been determined under the condition of replacing its oscillating motion with a linear one. A reverse calculation method for geometric parameters of the combined cam-lever mechanism with a slider for the perforator drive has been developed. Based on the geometric synthesis of the perforator mechanism, the angular swing of the lever of the cam contour and maximum vertical linear displacement of the cam contour's roller were determined.*

*The geometric synthesis of the mechanisms for the reciprocating table and perforators in relative dimensions enables further kinematic and force analysis.*

**Keywords:** thread-sewing machine; table; book block; mechanism; cam; lever; perforators; synthesis; drive.

**Fig.:** 4. **References:** 11.

**Іван Іванович Регей<sup>1</sup>, Олег Богданович Книш<sup>2</sup>,  
Петро Ігоревич Бегень<sup>3</sup>, Юрій Юрійович Михайлів<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних і пакувальних виробництв

Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

**E-mail:** [Ivan.I.Rehei@lpnu.ua](mailto:Ivan.I.Rehei@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3395-2994>. **Scopus Author ID:** 57209409155

<sup>2</sup>доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних і пакувальних виробництв

Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

**E-mail:** [Oleh.B.Knysh@lpnu.ua](mailto:Oleh.B.Knysh@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5854-1879>. **Scopus Author ID:** 57209411556

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних і пакувальних виробництв

Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

**E-mail:** [Petro.I.Behen@lpnu.ua](mailto:Petro.I.Behen@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1999-2479>

<sup>4</sup>аспірант кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних і пакувальних виробництв  
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

**E-mail:** [muhayliv99@gmail.com](mailto:muhayliv99@gmail.com)

## **АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИВОДА НАТИСКНОЇ ПЛИТИ У ШТАНЦЮВАЛЬНОМУ ПРЕСІ**

*Відповідальною і важконавантаженою є штанцювальна техніка, призначена для виготовлення розгортки пакувань із картону. Наголошено на актуальності завдання з дослідження силового навантаження привода натискної плити. Наведено аналітичні залежності для геометричного синтезу ланок розклинювального механізму її привода. Встановлено, що процес штанцювання картонних заготовок натискною плитою включає дві фази. Наведено аналітичні залежності для розрахунку складових сил навантаження ланок розклинювального механізму та моменту сили на приводному валу. Встановлено, що протягом початкової фази силове навантаження привода суттєво менше за навантаження протягом основної фази. Розкрито реальну картину характеру навантаження привода натискної плити у процесі штанцювання картонних розгортки.*

**Ключові слова:** штанцювальний прес; штанцювальна форма; розклинювальний механізм; картонна заготовка; натискна плита; привод; геометричний синтез; силове навантаження.

*Рис.: 2. Бібл.: 10.*

**Актуальність теми дослідження.** Для задоволення потреб ринку виробники тари з картону розширюють парк технологічного обладнання. Він представлений штанцювальною технікою, яка призначена для виготовлення розгортки пакувань із картону. До штанцювального обладнання висувають високі вимоги, пов'язані з особливістю функціонування в умовах значних технологічних навантажень та високої продуктивності. Завдання розкриття реальної картини навантаження привода натискної плити у процесі штанцювання картонних розгортки актуальне для обґрунтування метало- та енергомісткості технологічного обладнання.

**Постановка проблеми.** У світі обсяг виробництва паперу та картону для тари протягом останніх 10 років зріс майже на 30 %. За прогнозами експертів європейський ринок паперово-картонного пакування зростатиме з показником 4,8 % упродовж 2022–2027 років [1]. Відповідальною і важконавантаженою є штанцювальна техніка, призначена для виготовлення розгортки пакувань із картону. Вона широко представлена на ринку обладнання штанцювальними пресами з розклинювальними важільними механізмами для привода натискної плити [2].

Високі вимоги до функціонування штанцювальних пресів пов'язані з особливістю: вони працюють в умовах значних технологічних навантажень за продуктивності понад 7000 циклів/годину. Як приклад, штанцювальний автомат моделі SP 102-EO фірми BOBST створює в робочій зоні преса тиск до 250 тонн [3]. Експериментальне підтвердження значних силових показників висвітлено в праці [4], у якій зазначено, що навантаження у пресовій парі вимірювали методами мікрокапсул та давачів зображення. Встановлено, що при штанцюванні картону завтовшки 0,3 мм навантаження у пресі сягнули 225 тонн.

Для забезпечення тривалого функціонування штанцювальне обладнання комплектується приводом, лівовою складовою потужності якого припадає на прес. Його силове навантаження значною мірою залежить від застосування механізмів натискної плити. Задача дослідження полягає в обґрунтуванні силового навантаження привода преса, укомплектованого розклинювальними механізмами.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** За жорстких експлуатаційних умов особливими є вимоги до надійності та точності роботи механізму привода натискної плити, яка забезпечує потрібний тиск при штанцюванні картону. У науковій праці [5] автори висвітлили новий метод регулювання тиску висікальної лінійки при штанцюванні картону та встановили залежності між зусиллями висікання і частотним спектром вібрування інструменту при миттєвому ударі в картон. Проте в цій праці науковцями не проаналізовано вплив результату взаємодії висікальної лінійки з картоном на навантаження привода засобу створення тиску. Тому висновки щодо ефективності його функціонування потребують додаткових досліджень.

Автори праці [6] аналізували звукові коливання, які супроводжують процес штанцювання картонних розгортки. У процесі експлуатації штанцформи різальні крайки лінійок затуплюються та змінюється характер отриманих деформацій картону. Вагомою зміною є збільшення частки пластичних деформацій, що впливає на характер звукових коливань. Дослідники провели заміри інтенсивності звукових коливань залежно від зміни параметрів: сила висікання, товщина картону, напрямку розташування його волокон та розміру різальної крайки висікальної лінійки. Отримані результати важливі для підвищення ефективності контролю за ступенем зношування висікальних інструментів, що дозволяє стабільно підтримувати потрібну якість продукції. Однак серед досліджуваних параметрів відсутнє силове навантаження привода натискної плити, яке прогнозовано зростатиме внаслідок затуплення різальних крайок інструментів.

Згадані науковці у своїх працях концентрують увагу на дослідженні фізико-механічних явищ, що відбуваються у пресовій парі, проте не приділяють уваги дослідженням механізмів, які переборюють значні технологічні навантаження при штанцюванні картону. Важливий розклинювальний механізм привода натискної плити, який застосовують у пресах фірми BOBST, досліджено у праці [7]. У ній доведено, що складові контури механізму привода спричиняють протилежним частинам натискної плити коливання протягом робочого та холостого ходів. Такий її рух негативно впливає як на якість відштанцьованої продукції, так і на ефективність функціонування привода. Недослідженим параметром в аналізованій праці є силове навантаження привода натискної плити, від якого залежить обґрунтування його потужності.

Шляхи забезпечення строгого вертикального переміщення натискної плити протягом робочого та холостого ходів окреслені застосуванням механізмів її привода нової конструкції: на базі передачі гвинт-гайка [8] та ексцентрикового механізму [9]. Недолік першого механізму полягає в неможливості переборювати технологічний опір, співмірний із можливостями розклинювального. У другому механізмі ключова ланка – ексцентрик – вимагає прецизійної точності виготовлення та використання надміцних матеріалів.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Аналіз останніх публікацій засвідчив, що наукова інформація, наявна у відкритому доступі з дослідження та удосконалення штанцювальної техніки, лише частково стосується вирішення завдання з визначення силового навантаження її приводів. Відтак відкритою залишається проблема з обґрунтування енерго- та металомісткості штанцювального обладнання.

**Мета статті** – провести геометричний синтез розклинювального механізму привода натискної плити, виявити вплив деформування ежкторних подушок штанцювальної форми та висікання і бігування картону на навантаження складових механізму, розкрити картину характеру навантаження привода натискної плити у процесі штанцювання картонних розгортки.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Штанцювальний прес у верхній частині містить горизонтальну нерухому опорну плиту 1 (рис. 1, а) із закріпленою плоскою формою 2. У нижній частині для привода натискної плити 3 з картонною заготовкою КЗ прес укомплектований розклинювальними механізмами лівого ЛК та правого ПК контурів. Механізми складаються із кривошипів 4<sub>1</sub>, 5<sub>1</sub>, зафіксованих протилежно на приводному валу; ведучих шатунів 4<sub>2</sub>, 5<sub>2</sub>; коромисел 4<sub>3</sub>, 5<sub>3</sub> і ведених шатунів 4<sub>4</sub>, 5<sub>4</sub>, які шарнірно приєднані до нижнього боку натискної плити 3. Процес штанцювання картонної заготовки КЗ завершується за умови горизонтального вирівнювання кривошипів 4<sub>1</sub>, 5<sub>1</sub> і ведучих шатунів 4<sub>2</sub>, 5<sub>2</sub> в одну лінію.

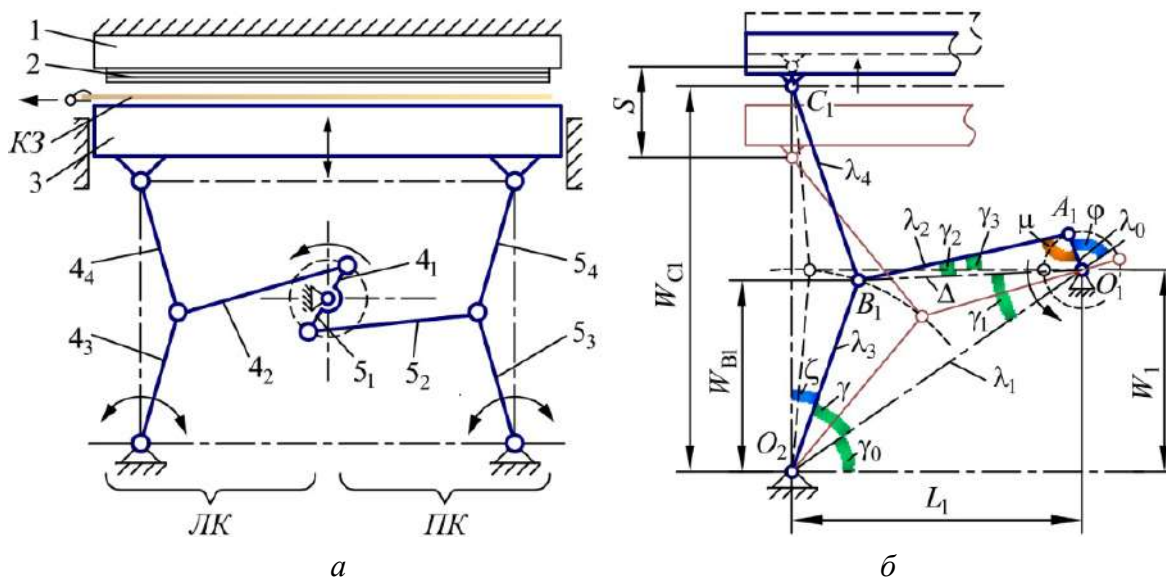


Рис. 1. Кінематична схема штанцювального преса (а), схема до розрахунку положень складових розклинювального механізму лівого контуру в приводі натискної плити (б)

Джерело: розроблено авторами.

Для аналітичних досліджень силового навантаження привода натискної плити спочатку розглянемо схему до розрахунку положень складових розклинювального механізму лівого контуру. Прийнято такі позначення:

відносних параметрів:

-  $S = 1,0$  – максимальне переміщення («одиничний» лінійний параметр) натискної плити (рис. 1, б);

-  $W_1 = 3,4$  – вертикальна відстань між осями  $O_1$  і  $O_2$ ;

-  $L_1 = 5,0$  – горизонтальна відстань між осями  $O_1$  і  $O_2$ ;

-  $\lambda_0$  – радіус кривошипа;

-  $\lambda_1$  – міжбазова відстань між осями  $O_1$  і  $O_2$ ;

-  $\lambda_2$  – довжина шатуна ведучого контуру;

-  $\lambda_3$  – довжина коромисла веденого контуру;

-  $\lambda_4$  – довжина шатуна веденого контуру;

-  $\Delta$  – поточна відстань шарніра  $B_1$  до осі  $O_1$ ;

-  $W_{C1}$  – поточна відстань шарніра  $C_1$  до осі  $O_2$ ;

-  $W_{B1}$  – поточна відстань шарніра  $B_1$  до осі  $O_2$ ;

абсолютних параметрів (поточних кутів):

-  $\varphi$  – повороту кривошипа;

-  $\xi$  – між коромислом ведучого контуру і вертикальною віссю;

- $\gamma_0$  – нахилу міжбазової осі до горизонталі;
- $\gamma_1$  – нахилу осі  $\Delta$  до міжбазової осі;
- $\gamma_2$  – нахилу ведучого шатуна до осі  $\Delta$ ;
- $\gamma_3$  – нахилу ведучого шатуна до горизонталі;
- $\gamma$  – нахилу коромисла веденого контуру до міжбазової осі;
- $\mu$  – між кривошипом і шатуном ведучого контуру.

Виведені аналітичні залежності для геометричного синтезу ланок  $\lambda_0, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  (табл. 1) розклинювального механізму привода натискної плити та розрахунку поточних значень кутів. За відносний «одиничний» розмірний параметр прийнято хід  $S$  натискної плити. Як початкове, прийнято положення натискної плити 3 (рис. 2, а), при якому картонна заготовка  $K3$  доторкається до ежекторних подушок  $EП$  штанцювальної форми. Алгоритм послідовного розрахунку поточних значень параметрів:  $\gamma \rightarrow \Delta \rightarrow \mu \rightarrow \gamma_1 \rightarrow \varphi \rightarrow \gamma_2 \rightarrow \gamma_3$ . Аналітичні залежності наведені в табл. 2.

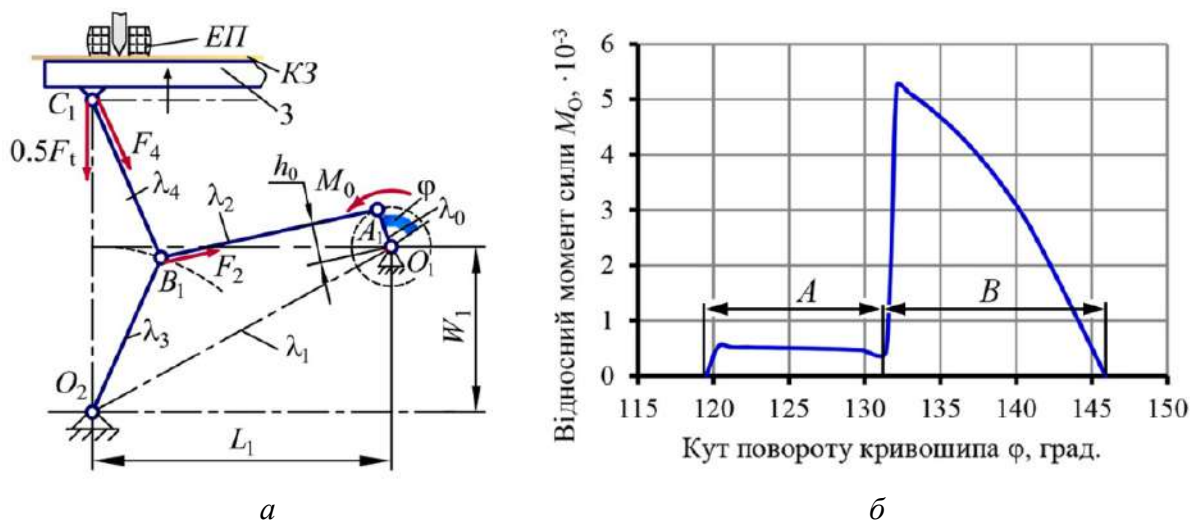


Рис. 2. Схема до розрахунку силового навантаження розклинювального механізму лівого контуру привода натискної плити внаслідок штанцювання картонної заготовки (а), графік залежності відносного моменту сили на приводному валу від кута його повороту (б)

Джерело: розроблено авторами.

Процес штанцювання картонної заготовки натискною плитою включає дві фази:  $A$  – деформування ежекторних подушок (рис. 2, б) штанцювальної форми (початковий етап);  $B$  – висікання розгорток вздовж контурів та бігування в них ліній згину (основний етап). Виведені аналітичні залежності для розрахунку складових сил навантаження ланок розклинювального механізму та моменту сили на приводному валу. Алгоритм послідовного розрахунку поточних значень параметрів силового навантаження:  $F_4 \rightarrow F_2 \rightarrow h_0 \rightarrow M_0$ . Тут  $F_4, F_2$  – зусилля, відповідно, на веденому  $4_4$  (рис. 1, а) та ведучому  $4_2$  шатунах;  $h_0$  – плече дії сили  $F_2$  на кривошипі  $4_1$ ;  $M_0$  – момент сили на приводному валу. Аналітичні залежності наведені в табл. 3.

За розмірний «еталон» значень сили прийнято відносне значення технологічного опору  $F_t = 1,0$ . У дослідженні прийнято, що частка складового опору, що припадає на висікання розгорток, становить 73,4 % від сумарного, на бігування картону – 18,2 %, на деформування ежекторних подушок – 8,4 % [10].



Таблиця 1 – Лінійні відносні параметри

№ з/п	Параметр	Позначення	Аналітична залежність	Номер формули
Задані				
1	Максимальне переміщення натискної плити	$S$	$S = 1,0$	
2	Вертикальна відстань між осями $O_1$ і $O_2$	$W_1$	$W_1 = 3,4$	
3	Горизонтальна відстань між осями $O_1$ і $O_2$	$L_1$	$L_1 = 5,0$	
Розрахункові поточні				
4	Радіус кривошипа	$\lambda_0$	$\begin{cases} W_1 \cdot \text{tg} \xi_0 + \lambda_0 + \lambda_2 = L_1, & (1.1) \\ \lambda_2 - \lambda_0 = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_3^2 - 2\lambda_1 \cdot \lambda_3 \cdot \cos(\gamma_{\min} - \gamma_0)} & (1.2) \end{cases}$	
5	Довжина шатуна ведучого контуру	$\lambda_2$		
6	Міжбазова відстань між осями $O_1$ і $O_2$	$\lambda_1$	$\lambda_1 = \sqrt{L_1^2 + W_1^2}$	(1.3)
7	Довжина коромисла веденого контуру	$\lambda_3$	$\lambda_3 = \frac{W_1}{\cos \xi_1}$	(1.4)
8	Довжина шатуна веденого контуру	$\lambda_4$	$\lambda_4 = \lambda_3$	
9	Довжина осі між шарніром $B$ і віссю $O_1$	$\Delta$	$\Delta = \sqrt{\lambda_3^2 + \lambda_1^2 - 2\lambda_3 \cdot \lambda_1 \cdot \cos \gamma}$	(1.5)
10	Поточна відстань шарніра $C_1$ до осі $O_2$	$W_{C1}$	$W_{C1} = \lambda_3 \cdot \sin(\gamma_0 + \gamma)$	(1.6)
11	Поточна відстань шарніра $B_1$ до осі $O_2$	$W_{B1}$	$W_{B1} = 2W_{C1}$	

Таблиця 2 – Кутові параметри (абсолютні)

№ з/п	Кут	Позначення	Аналітична залежність	Номер формули
Заданий				
1	Між коромислом веденого контуру і вертикальною віссю у верхньому положенні натискної плити	$\xi_0$	$\xi_0 = 5^\circ$	
Розрахункові				
2	Між коромислом веденого контуру і горизонтальною віссю у нижньому положенні натискної плити	$\gamma_{\min}$	$\gamma_{\min} = \arcsin \frac{W_1 - 0,5}{\lambda_3}$	(2.1)
3	Нахилу міжбазової осі до горизонталі	$\gamma_0$	$\gamma_0 = \arctg \frac{W_1}{L_1}$	(2.2)
Розрахункові поточні				
4	Між коромислом веденого контуру і міжбазовою віссю	$\gamma$	$\gamma = \arcsin \frac{W_{B1}}{\lambda_3} - \gamma_0$	(2.3)
5	Між коромислом ведучого контуру і вертикальною віссю	$\xi$	$\xi = 0,5\pi - (\gamma_0 + \gamma)$	(2.4)
6	Нахилу осі $\Delta$ до міжбазової осі	$\gamma_1$	$\gamma_1 = \arccos \frac{\lambda_1^2 + \Delta^2 - \lambda_3^2}{2\lambda_1 \cdot \Delta}$	(2.5)
7	Нахилу ведучого шатуна до осі $\Delta$	$\gamma_2$	$\gamma_2 = \arccos \frac{\lambda_2^2 + \Delta^2 - \lambda_0^2}{2\lambda_2 \cdot \Delta}$	(2.6)
8	Між кривошипом і шатуном ведучого контуру	$\mu$	$\mu = \arccos \frac{\lambda_2^2 + \lambda_0^2 - \Delta^2}{2\lambda_2 \cdot \lambda_0}$	(2.7)
9	Нахилу ведучого шатуна до горизонтальної осі	$\gamma_3$	$\gamma_3 = \gamma_2 - (\gamma_0 - \gamma_1)$	(2.8)
10	Між кривошипом і віссю $\Delta$	$\gamma_4$	$\gamma_4 = \arccos \frac{\lambda_0^2 + \Delta^2 - \lambda_2^2}{2\lambda_0 \cdot \Delta}$	(2.9)
10	Повороту кривошипа	$\varphi$	$\varphi = \pi - \gamma_0 - \gamma_4 + \gamma_3$	(2.10)

Таблиця 3 – Відносні параметри, пов'язані з розрахунком відносного силового навантаження ведучого кривошипа

№ з/п	Відносний параметр	Позначення	Аналітична залежність	Номер формули
Заданий				
1	Загальний технологічний опір	$F_t$	$F_t = 1,0$	
2	Технологічний опір, що переборює механізм лівого (правого) контуру	$F_{tl},$ ( $F_{tr}$ )	$F_{tl} = F_{tr} = 0,5 F_t$	
Розрахунковий поточний				
3	Зусилля на веденому шатуні	$F_4$	$F_4 = \frac{0,5}{\cos \zeta}$	(3.1)
4	Зусилля на ведучому шатуні	$F_2$	$F_2 = F_4 \cdot \cos[(0,5\pi - \zeta) + \gamma_3]$	(3.2)
5	Плече дії сили, що діє на кривошип	$h_0$	$h_0 = \lambda_0 \cdot \sin \mu$	(3.3)
6	Момент сили на валу кривошипа	$M_0$	$M_0 = F_2 \cdot h_0$	(3.4)

За результатами розрахунку силового навантаження розклинювального механізму лівого контуру привода натискної плити побудований графік залежності  $M_0 = f(\varphi)$  (рис. 2, б). Як видно з графіка, протягом фази А спостерігається значно менше значення  $M_0$ , ніж протягом наступної. Причина полягає у тому, фаза А пов'язана тільки з деформуванням пружних ежекторних подушок форми, а фаза В – із взаємодією численних інструментів форми з картоном. Відношення пікових значень становить 10,6. Зменшення значень крутного моменту сили на приводному валу протягом фази В спричинене зменшенням плеча  $h_0$  внаслідок його повороту.

Отримані результати розкрили реальну картину характеру навантаження привода натискної плити у процесі штанцювання картонних розгорток, а кількісний показник навантаження уможливорює інженерне обґрунтування силових засобів привода.

**Висновки.** Складовою секцією штанцювальної техніки є прес із розклинювальними важільними механізмами для привода натискної плити. Для аналітичних досліджень силового навантаження привода натискної плити прийнято позначення відносних геометричних параметрів ланок. Виведені аналітичні залежності для геометричного синтезу ланок розклинювального механізму привода натискної плити та розрахунку поточних значень кутів. За «одиничний» відносний розмірний параметр прийнятий хід натискної плити.

Виведені аналітичні залежності для розрахунку складових сил навантаження ланок розклинювального механізму та моменту сили на приводному валу, створений алгоритм послідовного розрахунку поточних значень параметрів силового навантаження. Аналітично досліджено процес штанцювання картонних заготовок натискною плитою протягом фаз деформування ежекторних подушок штанцювальної форми та висікання розгорток вздовж контурів і бігування в них ліній згину. Співвідношення пікових значень фаз становить 10,6. Досліджено характер зміни крутного моменту сили на приводному валу протягом фаз штанцювання картону.

Отримана реальна картина характеру навантаження привода натискної плити у процесі штанцювання картонних розгорток, що уможливорює інженерне обґрунтування його силових засобів.

### Список використаних джерел

1. Тенденції розвитку ринку упаковки з паперу та картону // Упаковка. – 2023. – № 2. – С. 24-27.
2. Регей, І. І. Споживче картонне пакування (матеріали, проектування, обладнання для виготовлення) : навч. посіб. / І. І. Регей. – Львів : УАД, 2011. – 144 с.
3. Kirwan, M. J. Handbook of Paper and Paperboard Packaging Technology / M. J. Kirwan. – 2<sup>nd</sup> Edition. – Oxford : John Wiley & Sons, 2013. – 432 p.

4. Study on Pressure Testing Method of Die-Cutting Machine Based on Micro-capsule and Image Sensor / L. Q. Jiao, Y. M. Wang, S. Q. Wu, L. H. Li // In Proceedings of the ICMEIT 2018. – Shanghai, China, 15–16 April 2018. – Pp. 32–38.
5. Pressure Balance Characteristic of a Double Structure Blade under Quasi-Static Reciprocal Loading Condition / D. Abdul Hamid, S. Nagasawa, Y. Fukuzawa, K. Kojima, & A. Hine // Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering. – 2008. – № 2(10). – Pp. 1253-1264.
6. Analysis acoustic emission and sound during the paperboard of cutting process / Y. Fukuzawa, S. Nagasawa, S. Suzuki, I. Katayama, A. Sadamoto // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 192–193. – Pp. 134-138.
7. Пасіка, В. Р. Кінематичний синтез механізму штанцювального преса з умови рівності прямого і зворотного ходів / В. Р. Пасіка, В. В. Влах // Поліграфія і видавнича справа. – 2016. – № 1 (71). – С. 129-139.
8. Experimental research of paperboard cutting in die cutting press with the screw nut transmission of drive mechanism of a movable pressure plate / S. Ternytskyi, I. Rehei, N. Kandiak, I. Radikhovskiy, O. Mlynko // Acta mechanica et automatica. – 2021. DOI: 10.2478/ama-2021-0017.
9. Analytical interpretation of experimental research of cardboard cutting in die-cutting press / O. Knysh, I. Rehei, V. Vlakh, O. Mlynko, S. Ternytskyi // Academic journal of manufacturing engineering. – 2023. – Vol. 21.
10. Регей, І. І. Застосування двосекційної натискної плити у пресі штанцювального автомата: перспективи відмови від моноблочної конструкції / І. І. Регей, В. В. Влах, Ю. Ю. Михайлів, О. І. Млинко // Наукові записки УАД. – 2023. – № 2 (67). – С. 239-248.

### References

1. Tendentsii rozvytku rynku upakovky z paperu ta kartonu [Development trends of the paper and cardboard packaging market]. (2023). *Upakovka – Packaging*, 2, 24-27.
2. Rehei I. I. (2011) *Spozhyvche kartonne pakovannia (materialy, proektuvannia, obladnannia dlia vyhotovlennia) [Consumer cardboard packaging (materials, design, manufacturing equipment)]*. UAD.
3. Kirwan, M.J. (2013) *Handbook of Paper and Paperboard Packaging Technology, 2nd Edition*. Oxford: John Wiley & Sons.
4. Jiao, L. Q., Wang, Y. M., Wu, S. Q., Li, L. H. (15–16 April, 2018). Study on Pressure Testing Method of Die-Cutting Machine Based on Micro-capsule and Image Sensor. *In Proceedings of the ICMEIT* (pp. 32–38). Shanghai, China.
5. Abdul Hamid, D., Nagasawa, S., Fukuzawa, Y., Kojima, K., & Hine, A. (2008). Pressure Balance Characteristic of a Double Structure Blade under Quasi-Static Reciprocal Loading Condition. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2(10), 1253-1264.
6. Fukuzawa, Y., Nagasawa, S., Suzuki, S., Katayama, I., Sadamoto, A. (1 October 2007). Analysis of acoustic emission and sound during the paperboard of cutting process. *Journal of Materials Processing Technology*, 192–193, 134-138.
7. Pasika, V.R., Vlakh, V.V. (2016). *Kinematychnyi syntez mekhanizmu shtantsiuvalnoho presa z umovy rivnosti priamoho i zvorotnoho khodiv [Kinematic synthesis of the die cutting press mechanism from the condition of equality of forward and reverse displacements]*. *Polihrafiia i vydavnycha sprava – Printing and publishing*, (1(71)), 129–139.
8. Ternytskyi, S., Rehei, I., Kandiak, N., Radikhovskiy, I., Mlynko, O. (2021). Experimental research of paperboard cutting in die cutting press with the screw nut transmission of drive mechanism of a movable pressure plate. *Acta mechanica et automatica*. doi: 10.2478/ama-2021-0017.
9. Knysh, O., Rehei, I., Vlakh, V., Mlynko, O., Ternytskyi, S. (2023). Analytical interpretation of experimental research of cardboard cutting in die-cutting press. *Academic journal of manufacturing engineering*, 21(1).
10. Rehei, I.I., Vlakh, V.V., Mykhayliv, Y.Y., Mlynko, O.I. (2023) Zastosuvannia dvosektsiinoi natysknoi plyty u presi shtantsiuvalnoho avtomata: perspektyvy vidmovy vid monoblochnoi konstruktsii [The use of a two-section pressure plate in the die cutting press: possibilities for abandoning the monoblock design]. *Naukovi zapysky UAD –Scientific notes of UAD*, (2(67)), 239–248.

Отримано 20.09.2024

**Ivan Rehei<sup>1</sup>, Oleh Knysh<sup>2</sup>, Petro Behen<sup>3</sup>, Yuriy Mykhayliv<sup>4</sup>**<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor,

Head of the Department of Computerized Complexes of Printing and Packaging Industries

Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [Ivan.I.Rehei@lpnu.ua](mailto:Ivan.I.Rehei@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3395-2994>. **Scopus Author ID:** [57209409155](https://orcid.org/0000-0002-3395-2994)<sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor,

Professor of the Department of Computerized Complexes of Printing and Packaging Industries

Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [Oleh.B.Knysh@lpnu.ua](mailto:Oleh.B.Knysh@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5854-1879>. **Scopus Author ID:** [57209411556](https://orcid.org/0000-0001-5854-1879)<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor of the Department of Computerized Complexes of Printing and Packaging Industries

Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [Petro.I.Behen@lpnu.ua](mailto:Petro.I.Behen@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1999-2479><sup>4</sup>Graduate Student of the Department of Computerized Complexes of Printing and Packaging Industries

Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [muhayliv99@gmail.com](mailto:muhayliv99@gmail.com)**ANALYTICAL RESEARCHES OF THE PRESSURE PLATE DRIVE  
POWER LOAD IN A DIE CUTTING PRESS**

*It is stated in the article that the volume of paper and cardboard production for packaging has increased in recent years. It is emphasized that the die cutting equipment, intended for the production of cardboard blanks of packages, is responsible and heavily loaded. High requirements for die cutting equipment, which are related to the peculiarity of functioning in conditions of heavy technological loads and high productivity, are pointed out. It is widely represented on the technological equipment segment by die cutting presses with wedging lever mechanisms for driving the pressure plate. The analysis of scientific publications was performed and the relevance of the task of researching the force load of the pressure plate drive mechanism was emphasized. Its left wedging contour is considered. Analytical dependencies for geometric synthesis of the pressure plate drive wedging mechanism links and the calculation of their angles current values are presented. Its initial position is taken as the position in which the cardboard blank touches the ejector cushions of the die board. It is taken into account that the process of die cutting cardboard blanks is completed with the horizontal alignment of the crank and the driving connecting rod in one line. It was established that the process of die cutting cardboard with a pressure plate includes two phases. The first one is associated with the deformation of the ejector cushions of the die board, and the second main phase is with the cutting of blanks along their contours and the creasing of fold lines in them. It is considered that the second phase also includes the compression of the ejector cushions. Analytical dependences for calculating the component forces of the wedging mechanism links and the moment of force on the drive shaft are given. The starting peak of the relative moment of force on it was detected during the research of the main phase. The components of technological resistance accounted for by the blanks cutting, creasing and the deformation of ejector pillows are taken into account. It was established that during the first phase the drive load is significantly less than the load during the second main phase. The ratio of the moment of force peak values for different phases was obtained. The real picture of the pressure plate drive load nature in the process of die cutting cardboard blanks has been revealed.*

**Key words:** die cutting; die board; wedging mechanism; cardboard blank; pressure plate; drive; geometric synthesis; force load.

*Fig.: 2. References: 10.*

**Олександр Вікторович Орисенко<sup>1</sup>, Олександр Павлович Шека<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: [oleksandr.orysenko@gmail.com](mailto:oleksandr.orysenko@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3103-0096>

<sup>2</sup>аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна)  
E-mail: [ascheka51@gmail.com](mailto:ascheka51@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1328-1416>

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРАЦІЙНОЇ ПЛОЩАДКИ  
З РЕГУЛЬОВАНИМИ ЗА ЖОРСТКІСТЮ ПРУЖНИМИ ОПОРАМИ**

У статті описано математичну модель вібраційної площадки для віброформування малогабаритних бетонних виробів, що пов'язує амплітуди просторових коливань робочого органа із її конструктивними та технологічними параметрами. Математична модель створена за допомогою узагальненого рівняння руху Лагранжа другого роду, при її розробленні використані методи фізико-математичного моделювання. Для опису просторового руху коливної маси віброплощадки було прийнято кілька гіпотез, які дозволили значно спростити математичні викладки без погіршення точності кінцевих результатів. Отримана математична модель у вигляді системи трьох диференціальних рівнянь другого порядку описує просторовий рух робочого органа вібраційної площадки із середовищем завантаження як рух абсолютно твердого тіла. На основі розрахованих числових значень коефіцієнтів жорсткостей і в'язкого опору для пружних віброізоляційних елементів, що задовольняють умові налагодження далеко зарезонансного режиму роботи віброплощадки, визначено амплітудні значення лінійних та кутових вібропереміщень робочого органа, побудовано амплітудно-частотні характеристики коливної системи та графіки часових залежностей руху коливної маси за відповідними узагальненими координатами.

**Ключові слова:** вібраційна площадка; робочий орган; віброзбуджувач; математична модель; коливна система; змушувальна сила; частота; амплітуда.

Рис.: 7. Табл.: 2. Бібл.: 16.

**Актуальність теми дослідження.** Виробництво сучасних будівельних матеріалів, бетонних і залізобетонних виробів та конструкцій, вимоги до їхньої якості зумовлюють постійне впровадження в будівельну практику новітніх технологій, розробку нових зразків формувального обладнання і вібраційної техніки. Практична експлуатація цього обладнання ґрунтується на тому, що операції приготування, транспортування, розподілу та ущільнення бетонних сумішей складають єдиний технологічний процес. Найважливішою в цьому процесі є операція ущільнення бетонної суміші. У промисловому виробництві бетонних і залізобетонних виробів застосовують різні способи ущільнення бетонних сумішей: вібрування, центрифугування, вакуумування, пресування та інші, що технологічно поєднуються із методами об'ємного формування заготовок. Вібрування є одним із найпоширеніших способів ущільнення бетонних композитів [1; 2]. Вібраційний спосіб ущільнення сумішей застосовується для виготовлення понад 90 % всіх виробів із бетону та залізобетону [3]. На заводах будівельної індустрії найбільшого поширення набув стендовий спосіб об'ємного вібраційного ущільнення бетонних виробів [4; 5], що технологічно реалізується на вібраційних площадках [5] та вібраційних формувальних установках [6; 7].

Масове застосування вібраційних машин у будівельній практиці пояснюється відносною простотою їхньої конструкції, високою ефективністю ущільнення бетонних сумішей, надійністю та порівняно невеликою енергоємністю. Однак попри суттєві енергетичні переваги та промислове домінування вібраційних машин з інерційним віброзбудженням вимушених коливань, вони мають певні суттєві недоліки:

- обмежений ресурс роботи вальниць;
- обмежений частотний діапазон вимушених коливань;
- складність реалізації напрямлених коливань;
- підвищена витрата потужності для виходу в зарезонансний режим роботи [8].

Тому для стабільного та рівномірного ущільнення бетонних сумішей потрібно чітко дотримуватися технологічних вимог щодо забезпечення в процесі вібрування необхідних силових та інерційно-жорсткісних параметрів вібраційного обладнання.

**Постановка проблеми.** У різних галузях промисловості для вібраційного ущільнення бетонних сумішей використовують машини, у яких робочі органи здійснюють вимушені коливання з амплітудами 0,1...12 мм на циклічних частотах 12...100 Гц. Зазначені межі амплітудно-частотних параметрів коливань робочих органів відповідають практично всім типам вібраційного технологічного обладнання, що використовується у промисловості [9].

Об'ємне вібраційне ущільнення застосовують для жорстких, помірно жорстких та рухомих бетонних сумішей, і здійснюють на вібраційних площадках та їх різновидах – вібраційних пресах і плитах, вібростолах тощо. Найбільшого поширення набули ударно-вібраційні та віброплощадки з вимушеними гармонійними коливаннями робочих органів [1]. Основними характеристиками площадок із гармонійним режимом роботи є амплітуда і частота вимушених коливань, які задаються за технологічними міркуваннями залежно від складу бетонної суміші та габаритних розмірів формувальних виробів. У таких вібромашинах коливні маси здійснюють здебільшого вимушені коливання із невеликими амплітудами 0,3...0,6 мм на циклічних частотах у діапазоні 25...50 Гц, що відповідають гармонійному режиму їхньої роботи й зазнають перевантажень на робочих органах із прискореннями 1...10 g [10].

**Аналіз останніх джерел і публікацій.** Дослідженню впливу параметрів пружних вібраційних опор на амплітуди переміщень робочих органів вібраційних машин присвячено значну кількість наукових робіт. Зокрема, у роботі [11] пропонуються конструкції вібраційних опор, що зменшують матеріалоемність та покращують експлуатаційні характеристики вібраційних площадок.

Як показано в роботах [12; 13], недостатня ефективність вібраційного обладнання для формування малогабаритних будівельних виробів проявляється, зокрема, через нерівномірність розподілу вертикальних амплітуд на горизонтальній поверхні форми, зростаючи від мінімального значення у центрі до максимального значення по її краях. Одним із можливих шляхів розв'язання цієї проблеми є застосування у вібраційних площадках для формування малогабаритних бетонних виробів віброізоляційних пружних опор із регульованою жорсткістю та високоефективних віброізоляційних вузлів, створених на основі сучасних композитних матеріалів.

До пружних елементів вібраційних машин з інерційним приводом належать металеві плоскі та виті пружини, гумові пружні елементи. Останні здебільшого працюють на стиск або на зсув, і у віброізоляційних пружних опорах вони забезпечують більшу частку приєднання маси бетонної суміші. Для резонансних пружних вузлів застосовувати гуму як пружний елемент недоцільно, оскільки їй у процесі експлуатації притаманні процеси старіння і значне розсіювання механічної енергії [9].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Потрібно створити математичну модель одномасової вібраційної площадки із заданими параметрами її коливної маси та колової частоти вимушених коливань у вигляді системи диференціальних рівнянь, яка описувала б просторовий рух її робочого органа із середовищем завантаження як абсолютно твердого тіла, що здійснює вимушені гармонійні коливання, не зазнаючи при цьому деформацій. Для розрахованих за умовою налагодження далеко зарезонансного режиму роботи віброплощадки числових значень коефіцієнтів лінійної і кутової жорсткостей та дисипації пружних елементів віброізоляційного вузла потрібно обчислити відповідні амплітудні значення вібропереміщень робочого органа цієї моделі в напрямку відповідних координатних осей, і на основі їх аналізу зробити висновок про технічну відповідність чи невідповідність жорсткісних параметрів цього вузла технологічним вимогам щодо забезпечення якісного віброущільнення бетонних сумішей.

**Мета статті.** Ефективність роботи вібраційних машин різних типів залежить від надійності й довговічності їхніх пружних віброізоляційних вузлів. В одномасових вібраційних машинах вони забезпечують зарезонансний режим роботи для умовно виділеної коливної системи у вигляді маси тієї частини установки, що встановлена на них [9].

Метою цієї статті є обґрунтування жорсткісних параметрів пружних елементів для віброізоляційних опор із регульованою жорсткістю вібраційної площадки малої вантажопідйомності на основі її математичної моделі.

**Виклад основного матеріалу.** Запропонована математична модель пов'язує амплітуди віброколивань на поверхні робочого органа при заданій коловій частоті вимушених коливань із його конструктивними та технологічними параметрами: коливною масою, коефіцієнтами жорсткості та дисипації віброізоляційної опори, змушувальною силою віброзбудувача, відстанню від центра мас робочого органа із сумішшю до осі дебалансного вала. При моделюванні прийнято кілька гіпотез, які дозволяють спростити математичний апарат без порушення точності отримуваних результатів та враховано досвід математичного моделювання установок подібного типу [10; 14].

Щоб створювана вібраційна машина мала необхідну частоту власних коливань  $\Omega_g$ , потрібно забезпечити сумарну жорсткість її пружного віброізоляційного вузла [9] відповідно до рівності:

$$c_{iz} = M \cdot \Omega_g^2 = M \cdot \left( \frac{\Omega}{z} \right)^2, \quad (1)$$

де  $M$  – коливна маса системи;

$\Omega_g$  – власна колова частота вимушених коливань системи;

$\Omega$  – коливна частота вимушених коливань;

$z$  – резонансне налагодження коливної системи.

Для забезпечення далеко зарезонансного режиму роботи одномасової коливної системи вібромашини, жорсткість її пружного віброізоляційного вузла розраховують згідно (1), а резонансне налагодження для коливної маси вибирають з умови:

$$z = \frac{\Omega}{\Omega_g} = 5 \dots 7. \quad (2)$$

Математичне моделювання руху робочого органа вібраційної машини є порівняно складною задачею, оскільки вона пов'язана з необхідністю опису вільного руху механічної коливної системи, а також з урахуванням впливу середовища завантаження на динаміку машини. У зв'язку з цим були прийняті наступні гіпотези, які дозволяють спростити математичні викладки:

- робочий орган віброплощадки вважаємо абсолютно твердим тілом, яке не деформується при роботі установки;
- наявність бетонної суміші у формі, що вібує разом із робочим органом, враховується через коефіцієнт приєднаної маси;
- пружність віброізоляційної опори приймається такою, що задовольняє лінійному закону в усьому діапазоні деформацій;
- вібраційний вплив на коливну масу дебалансного віброзбудувача вимушених коливань представлено у вигляді змушувальної сили, яка змінює числове значення та напрям за гармонійним законом;
- складний просторовий рух дебалансу не враховується;
- враховуючи конструктивні особливості віброплощадки, рух його робочого органа розглядається не як просторовий, а як плоскопаралельний у вертикальній площині, яка проходить через повздовжню вісь симетрії вібраційної установки;

– обертова маса дебалансу набагато менша за коливну масу системи, тому нею в рівняннях можна знехтувати;

– коливну систему приймаємо центрованою, а обертання дебалансу – рівномірним.

Ці припущення дозволять зменшити число ступенів вільності механічної коливної системи та уникнути громіздких математичних обчислень.

Механічна коливна система віброплощадки містить лише один пружний вузол. Він складається з чотирьох гумокордних віброізоляційних елементів, за допомогою яких коливна маса з'єднується з нерухомою опорою або фундаментом. Збурена дебалансним віброзбудувачем, коливна система деформується в найподатливішому місці – в пружному вузлі, і отже, може розглядатися як абсолютно тверде тіло, з'єднане пружними елементами з фундаментом.

Оскільки жорсткість коливної маси вібромашини набагато більша за жорсткість віброізоляційного пружного вузла, то коливна система осцилюватиме на власній коловій частоті як одне ціле без відносного зміщення робочого органа та бетонної суміші. На основі цих припущень можна стверджувати, що робочий орган віброплощадки разом із формою, віброзбудувачем та приєднаною частиною середовища завантаження утворюють умовно єдину масу  $M$ , інерційне значення якої використовують під час розрахунків жорсткісних характеристик віброізоляційного вузла вібромашини.

Для побудови математичної моделі вібраційної площадки зобразимо її кінематичну схему, що містить робочий орган 1, форму з бетонною сумішшю 2, віброзбудувач із дебалансним валом 3 та закріплений на ньому дебаланс 4.

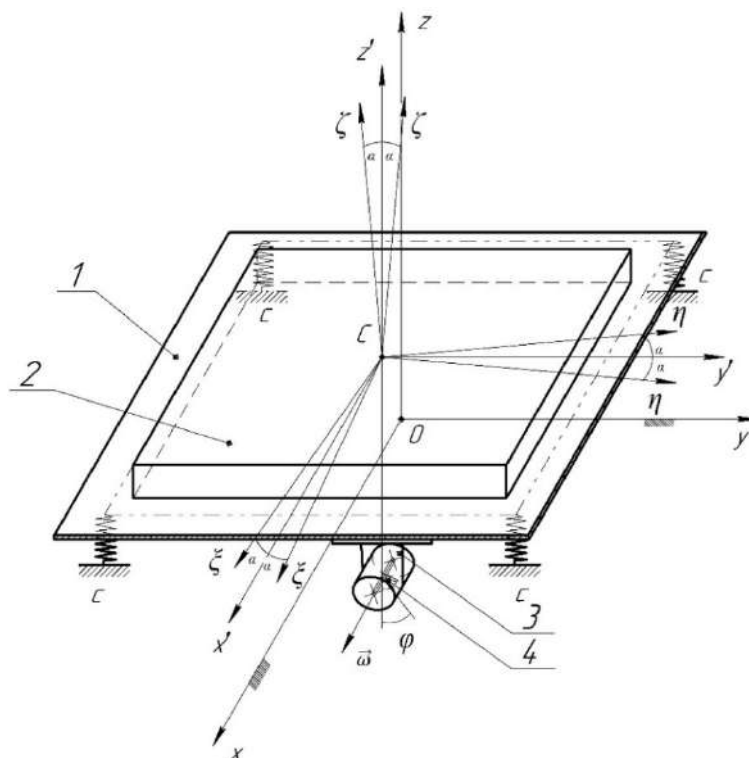


Рис. 1. Кінематична схема вібраційної площадки

Джерело: розроблено авторами.

Хоч віброплощадка і є просторовою конструкцією, по суті, розглядаємо її плоску фізичну модель. Це підкреслює, настільки важливим є вивчення руху робочого органа у фронтальній вертикальній площині, перпендикулярній до осі обертання дебалансного вала, оскільки амплітуда його вертикальних лінійних вібропереміщень значною мірою визначає технологічну ефективність вібромашини.



Виберемо базову нерухому систему координат  $Oxyz$ , початок координат  $O$  якої збігається з центром мас  $C$  робочого органа із сумішшю, що перебуває в положенні статичної рівноваги.

Нехай координатна площина  $yz$  перпендикулярна до осі дебалансного вала, а вісь  $z$  напрямлена вертикально вгору. Механічну коливну систему розглядаємо як одномасову, що складається з однієї незалежної маси  $M$  робочого органа з формою, заповненою бетоном сумішшю.

Початки координат двох рухомих систем координат  $Cx'y'z'$  та  $C\xi\eta\zeta$  також суміщаємо з точкою  $O$ . Під час вібраційної дії з боку дебалансу на робочий орган ці системи координат рухаються разом з центром мас  $C$  коливної маси.

Відповідно до припущень про плоскопаралельний рух робочого органа останній здійснює прямолінійні коливні рухи у вертикальній площині в напрямку осей  $Cz'$  та  $Cy'$  та крутильні коливання навколо осі  $Cx'$ . Тому рухома система координат  $Cx'y'z'$ , жорстко зв'язана з центром мас робочого органа із сумішшю, рухається поступально у координатній площині  $y'z'$ , через що її координатні осі весь час залишаються паралельними відповідним осям нерухомої системи координат  $Oxyz$ , а осі рухомої системи координат  $C\xi\eta\zeta$  повертаються навколо відповідних осей  $Cx'y'z'$  на один і той же кут  $\alpha$ .

Оскільки вісь дебалансного вала перпендикулярна до координатної площини  $yz$ , то дебаланс здійснює обертальний рух навколо прямої, яка паралельна координатним осям  $Ox$  та  $Cx'$ . Тому робочий орган машини одночасно здійснює кутові коливання навколо осі  $Cx'$  з деяким кутом  $\alpha$ .

Оскільки коливна система віброплощадки в цьому випадку має тільки три ступені вільності, то система диференціальних рівнянь руху її коливної маси складається із трьох рівнянь, без урахування рівняння, що описує складний просторовий рух дебаланса.

Пружно-в'язкі властивості віброізоляційних опор моделюються згідно з реологічною моделлю Кельвіна-Фойгта [15] коефіцієнтами жорсткості  $c_y, c_z, c_a$  у напрямках відповідних лінійних та кутового переміщень робочого органа й коефіцієнтами дисипації  $n_y, n_z, n_a$  – у відповідних напрямках. Для динамічних розрахунків рухому частину віброплощадки подаємо у вигляді коливної системи, на яку діє змушувальна гармонійна сила з амплітудою, пропорційною квадратові колової частоти вимушених коливань цієї системи.

При рівномірному обертанні дебалансу як тіла з незрівноваженою масою виникає відцентрова сила інерції, вектор  $\vec{F}$  якої рівномірно обертається по колу зі сталою коловою частотою  $\omega$ . Ця сила гармонійно збуджує коливну масу віброплощадки, оскільки її проекції на координатні осі  $Oy$  та  $Oz$  змінюються відповідно за гармонійними законами:

$$F_y = F \cdot \cos\varphi; F_z = F \cdot \sin\varphi, \quad (3)$$

де  $\varphi$  – кут повороту дебалансу навколо осі дебалансного вала.

Горизонтальна складова відцентрової сили  $F_y = F \cdot \cos\varphi = m_0 \cdot r \omega^2 \cdot \cos\varphi$ , де  $m_0$ ,  $r$  – відповідно маса і ексцентриситет дебалансу, періодично змінює своє числове значення і напрям, створюючи крутий момент відносно прямої, що містить поперечну вісь симетрії віброплощадки і проходить через її центр мас, тобто відносно нерухомої координатної осі  $Ox$ :

$$M_x = F_y \cdot L \cdot \cos\varphi, \quad (4)$$

де  $L$  – відстань від центра мас робочого органа із сумішшю до осі дебалансного вала;  
 $F$  – амплітуда змушувальної сили вібророзбуджувача кругових коливань.

Для одержання математичної моделі вібраційної площадки для ущільнення і формування бетонних виробів використаємо рівняння Лагранжа другого роду для непотенціальних сил [16].

Повна кінетична енергія механічної коливної системи віброплощинки дорівнює сумі кінетичних енергій лінійних і кутового коливних рухів інерційного параметра  $M$ :

$$T = \frac{M\dot{y}^2}{2} + \frac{M\dot{z}^2}{2} + \frac{J_x\dot{\alpha}^2}{2}, \quad (5)$$

де  $\dot{y}, \dot{z}, \dot{\alpha}$  – миттєві значення лінійних і кутової швидкостей;

$J_x$  – момент інерції коливної маси відносно координатної осі  $Ox$ .

Потенціальну енергію  $\Pi$  віброплощинки визначаємо за деформаціями її віброізоляційного пружного вузла:

$$\Pi = \frac{1}{2}c_y \cdot y^2 + \frac{1}{2}c_z \cdot z^2 + \frac{1}{2}c_\alpha \alpha^2, \quad (6)$$

де  $c_y, c_z, c_\alpha$  – коефіцієнти лінійної та кутової жорсткостей пружного вузла;

$y, z, \alpha$  – миттєві лінійні й кутове зміщення робочого органа від положення статистичної рівноваги.

З огляду на припущення, що розсіювання енергії в системі вздовж координатних осей пропорційне до швидкості відповідних вібропереміщень, дисипативну функцію  $D$  коливної системи віброплощинки розраховуємо за формулою:

$$D = \frac{1}{2}n_y \cdot \dot{y}^2 + \frac{1}{2}n_z \cdot \dot{z}^2 + \frac{1}{2}n_\alpha \cdot \dot{\alpha}^2, \quad (7)$$

де  $n_y, n_z, n_\alpha$  – коефіцієнти в'язкого опору.

Складемо систему диференціальних рівнянь руху одномасової коливної системи віброплощинки з дебалансним приводом у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{\partial \Pi}{\partial y} - \frac{\partial D}{\partial \dot{y}} + Q_{\text{нен.}y} \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{\partial \Pi}{\partial z} - \frac{\partial D}{\partial \dot{z}} + Q_{\text{нен.}z} \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = -\frac{\partial \Pi}{\partial \alpha} - \frac{\partial D}{\partial \dot{\alpha}} + M_{\text{нен.}x} \end{cases} \quad (8)$$

Використовуючи рівності (3)-(7), знаходимо складові системи рівнянь (8):

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} &= M\dot{y}; \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) = M\ddot{y}; \frac{\partial T}{\partial y} = 0; \frac{\partial \Pi}{\partial y} = c_y \cdot y; \frac{\partial D}{\partial \dot{y}} = n_y \cdot \dot{y}; \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{z}} &= M\dot{z}; \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) = M\ddot{z}; \frac{\partial T}{\partial z} = 0; \frac{\partial \Pi}{\partial z} = c_z \cdot z; \frac{\partial D}{\partial \dot{z}} = n_z \cdot \dot{z}; \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} &= J_x\dot{\alpha}; \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) = J_x\ddot{\alpha}; \frac{\partial T}{\partial \alpha} = 0; \frac{\partial \Pi}{\partial \alpha} = c_\alpha \cdot \alpha; \frac{\partial D}{\partial \dot{\alpha}} = n_\alpha \cdot \dot{\alpha}. \end{aligned} \quad (9)$$

Підставляючи вирази (9) до системи рівнянь (8), одержимо:

$$\begin{cases} M\ddot{y} + c_y \cdot y + n_y \cdot \dot{y} = F \cos \varphi; \\ M\ddot{z} + c_z \cdot z + n_z \cdot \dot{z} = F \sin \varphi; \\ J_x\ddot{\alpha} + c_\alpha \cdot \alpha + n_\alpha \cdot \dot{\alpha} = FL \cos \varphi. \end{cases} \quad (10)$$

Усталені вимушені коливання робочого органа віброплощинки описуються окремими частинними розв'язками кожного з цих диференціальних рівнянь:

$$y = Y \cos(\omega t - \varphi_y); z = Z \sin(\omega t - \varphi_z); \alpha = A \cos(\omega t - \varphi_x), \quad (11)$$

де  $Y, Z, A$  – амплітудні значення відповідно лінійних і кутового вимушених гармонійних коливань за узагальненими координатами  $y, z, \alpha$ ;

$t$  – час;

$\varphi_y, \varphi_z, \varphi_x$  – кути зсуву фаз між амплітудою змушувальної сили та амплітудами відповідних вібропереміщень [9].

$$\varphi_y = \arctg \frac{2h_y \Omega}{\Omega_{\epsilon_y}^2 - \Omega^2}; \varphi_z = \arctg \frac{2h_z \Omega}{\Omega_{\epsilon_z}^2 - \Omega^2}; \varphi_x = \arctg \frac{2h_\alpha \Omega}{\Omega_{\epsilon_\alpha}^2 - \Omega^2}. \quad (12)$$

У табл. 1 наведено числові значення інерційно-жорсткісних параметрів досліджуваного обладнання для віброформування малогабаритних бетонних виробів.

Таблиця 1 – Числові значення параметрів установки

№ з/п	Параметр	Числові значення
1	Маса рухомої рами, кг	30
2	Маса нерухомої рами, кг	40
3	Маса форми, кг	30
4	Маса бетонної суміші, кг	70
5	Маса віброзбуджувача, кг	10
6	Маса дебалансу, кг	2
7	Коливна маса, кг	70
8	Коефіцієнт приєднання бетонної суміші	0,3
9	Статичний момент дебаланса, кг·м	0,0334

Джерело: розроблено авторами.

Амплітудні значення вібропереміщень відповідно дорівнюють:

$$Y = \frac{F}{M \sqrt{\left(\frac{c_y}{M} - \omega^2\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{n_y}{2M} \cdot \omega\right)^2}} = \frac{F}{M \sqrt{\left(\Omega_{\epsilon_y}^2 - \omega^2\right)^2 + 4h_y^2 \cdot \omega^2}};$$

$$Z = \frac{F}{M \sqrt{\left(\frac{c_z}{M} - \omega^2\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{n_z}{2M} \cdot \omega\right)^2}} = \frac{F}{M \sqrt{\left(\Omega_{\epsilon_z}^2 - \omega^2\right)^2 + 4h_z^2 \cdot \omega^2}}; \quad (13)$$

$$A = \frac{M_x}{J_x \sqrt{\left(\frac{c_\alpha}{J_x} - \omega^2\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{n_\alpha}{2J_x} \cdot \omega\right)^2}} = \frac{F_y \cdot L}{J_x \sqrt{\left(\Omega_{\epsilon_\alpha}^2 - \omega^2\right)^2 + 4h_\alpha^2 \cdot \omega^2}},$$

де  $\Omega_{\epsilon_y}, \Omega_{\epsilon_z}, \Omega_{\epsilon_\alpha}$  – власні колові частоти вимушених коливань системи на віброізоляторах у напрямку координатних осей;

$\omega$  – миттєва колова частота вимушених коливань;

$h_y, h_z, h_\alpha$  – частоти дисипації механічної енергії в системі на віброізоляторах у напрямку координатних осей;

$J_x$  – момент інерції коливної маси відносно осі  $x$ .

$$J_x = \frac{M(a^2 + c^2)}{12}, \quad (14)$$

де  $a, c$  – відповідно довжина і висота робочого органа із середовищем завантаження.

$$\Omega_{\epsilon_y} = \sqrt{\frac{c_y}{M}}, \Omega_{\epsilon_z} = \sqrt{\frac{c_z}{M}}, \Omega_{\epsilon_\alpha} = \sqrt{\frac{c_\alpha}{J_x}}; \quad (15)$$

$$h_y = \frac{n_y}{2M}, h_z = \frac{n_z}{2M}, h_\alpha = \frac{n_\alpha}{2J_x}. \quad (16)$$

Дебаланс обертається навколо осі  $Ox$  за годинниковою стрілкою. Унаслідок дії відцентрової сили інерції на робочий орган, останній, крім лінійних вібропереміщень у фронтальній площині, здійснює ще й крутильні коливання навколо осі  $Ox$  як тіло із симетрично розподіленою масою. Унаслідок такого руху спочатку, наприклад, обидві праві віброопори III і IV під дією ваги робочого органа із середовищем завантаження зазнають більшого стиснення, а обидві ліві I і II – відповідно меншого, а при повороті дебалансу на величину свого центрального кута навколо осі дебалансного вала ситуація змінюється на протилежну. Через проміжок часу, що дорівнює періоду обертання дебалансу, усе повториться спочатку. Тому згинальну жорсткість віброопор у напрямку осі  $Oy$  можна обчислити як суму лінійних жорсткостей обох лівих і обох правих віброопор, а крутильну жорсткість навколо осі  $Ox$  – відповідно як різницю їхніх лінійних жорсткостей.

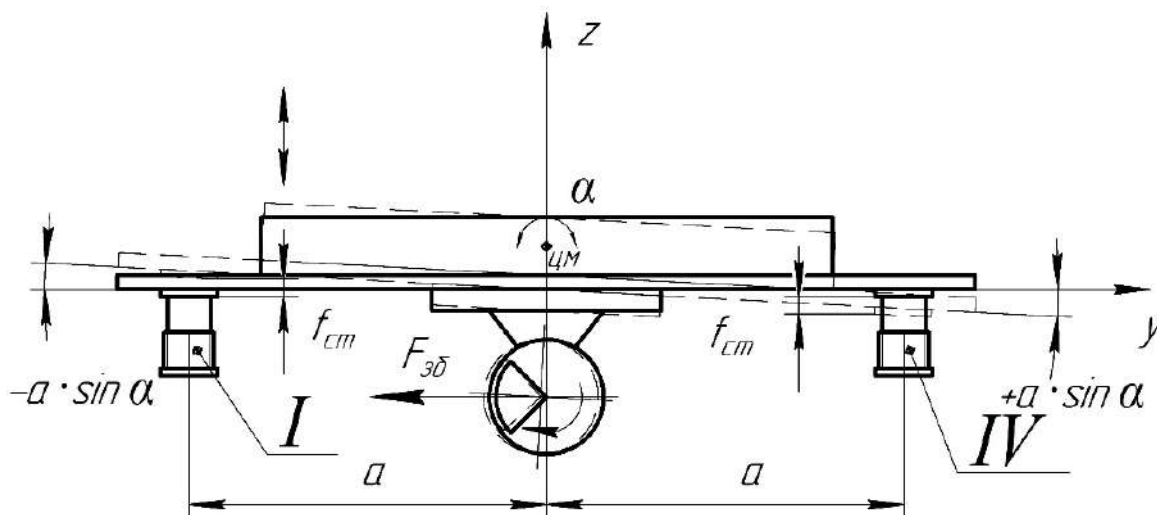


Рис. 2. Схема деформацій віброізоляційних опор

Джерело: розроблено авторами.

Обчислюємо числові значення лінійних та крутильних коефіцієнтів жорсткостей віброопор у напрямку координатних осей та відповідних коефіцієнтів їхнього в'язкого опору, які відображають розсіювання енергії у пружному віброізоляційному вузлі [9].

$$c_z = M \left( \frac{\Omega}{z} \right)^2; c_y = 2(c_1 + c_4) = \frac{2Mgf_{ct}}{f_{ct}^2 - Z^2}; c_\alpha = 2(c_1 - c_4) = \frac{2MgZ}{f_{ct}^2 - Z^2}; \quad (17)$$

$$n_z = 0,05\sqrt{2c_z \cdot M}; n_y = 0,05\sqrt{2c_y \cdot M}; n_\alpha = 0,05\sqrt{2c_\alpha \cdot M}. \quad (18)$$

Згідно з обчисленнями, виконаними за формулами (13), амплітуда робочого органу вздовж вертикальної осі становить  $Z = 0,536$  мм на коловій частоті обертання  $\omega = 298,5$  рад/с. Для цього випадку перевантаження на робочому органі машини становить 4,86 g.

Це значення відповідає необхідним технічним параметрам вібраційної машини при роботі в гармонійному режимі. Амплітуди коливань робочого органу вздовж горизонтальних осей відповідно становлять:  $Y = 0,524$  мм;  $A = 0,0002357$  рад = 0,013°.

Таблиця 2 – Жорсткісні параметри вібраційної опори

$c_z, \text{H/м}$	$c_y, \text{H/м}$	$c_a, \text{H}\cdot\text{м/рад}$	$n_z, \text{H}\cdot\text{с/м}$	$n_y, \text{H}\cdot\text{с/м}$	$n_a, \text{H}\cdot\text{с/м}\cdot\text{рад}$
$2,49\cdot 10^5$	$5,17\cdot 10^5$	$1,01\cdot 10^5$	295,5	425,382	188,016

Джерело: розроблено авторами.

Нижче наведені амплітудно-частотні характеристики коливної системи вібраційної площадки для формування малогабаритних бетонних виробів та графіки часових залежностей вібропереміщень робочого органа за відповідними узагальненими координатами. Для побудови було використано математичне програмне забезпечення Mathcad Prime.

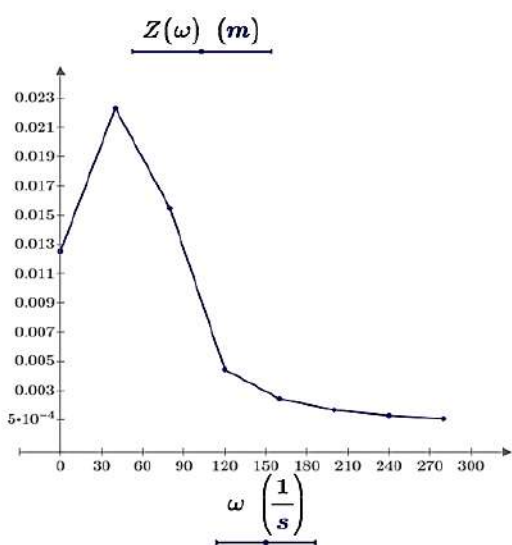


Рис. 3. Амплітудно-частотна характеристика вібропереміщення за узагальненою координатою z

Джерело: розроблено авторами.

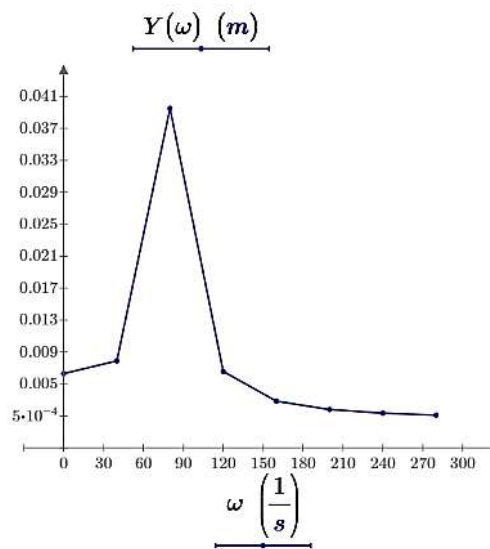


Рис. 4. Амплітудно-частотна характеристика вібропереміщення за узагальненою координатою y

Джерело: розроблено авторами.

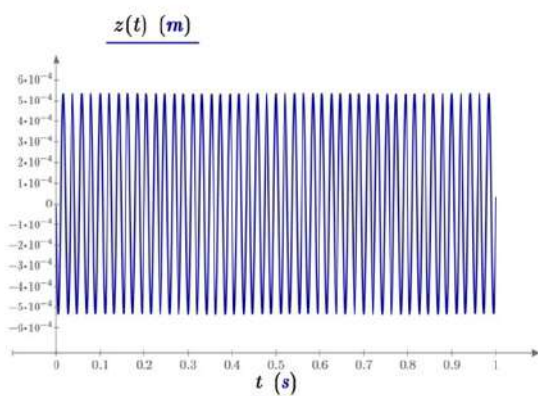


Рис. 5. Часова залежність руху коливної маси віброплощадки за узагальненою координатою z

Джерело: розроблено авторами.

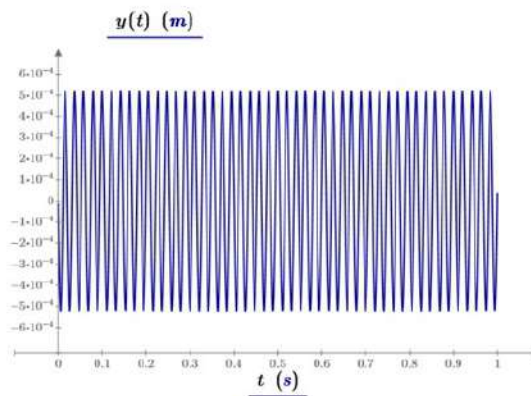


Рис. 6. Часова залежність руху коливної маси віброплощадки за узагальненою координатою y

Джерело: розроблено авторами.

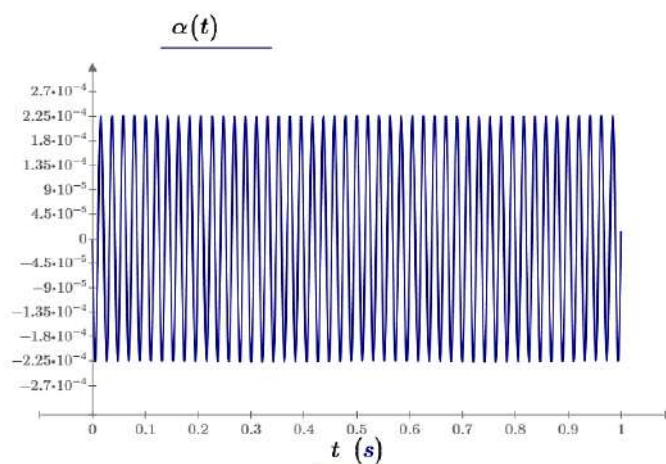


Рис. 7. Часова залежність руху коливної маси віброплощадки за узагальненою координатою  $\alpha$

Джерело: розроблено авторами.

Отримані амплітудно-частотні характеристики цієї математичної моделі підтверджують ефективність застосування запропонованих методів розробки віброплощадки для формування малогабаритних бетонних виробів, що працює на циклічній частоті вимушених коливань 47,5 Гц і забезпечує закладені технологічні параметри. Перевантаження на робочому органі становить майже п'ять земних прискорень, що відповідає усталеним коливанням робочого органа у вертикальній площині з необхідною амплітудою коливань.

**Висновки.** У статті розроблена математична модель одномасової вібраційної площадки для формування малогабаритних бетонних виробів, яка дозволяє визначати амплітуди вимушених коливань робочого органу при заданій коловій частоті. Ця модель враховує конструктивні та технологічні параметри системи, що робить її корисною для проектування та оптимізації вібраційних установок подібного типу.

Обчислено числові значення коефіцієнтів лінійної і кутової жорсткостей та дисипації пружних елементів віброізоляційного вузла. Дотримання параметрів жорсткості віброізоляційних опор забезпечує задані технологічні показники роботи віброплощадки та мінімізує її динамічні навантаження на фундамент.

Проведено розрахунки амплітуд вібропереміщень робочого органа за узагальненими координатами за умови забезпечення далеко зарезонансного режиму роботи віброплощадки. Ці величини є важливими для визначення ефективності процесу ущільнення бетонних сумішей та забезпечення рівномірного розподілу вібраційного впливу на формувальні вироби.

Результати моделювання можна використати для розробки нових та оптимізації існуючих вібраційних площадок, що застосовуються для виробництва малогабаритних бетонних виробів. Це дозволить підвищити якість формувальної продукції та знизити експлуатаційні енергозатрати.

#### Список використаних джерел

1. Назаренко, І. І. Вібраційні машини і процеси будівельної індустрії : навч. посіб. / І. І. Назаренко. – Київ : КНУБА, 2007. – 230 с.
2. Дудар, І. Н. Теоретичні основи технології виробів із пресованих бетонів : монографія / І. Н. Дудар. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 89 с.
3. Гусев, Б. В. Вібраційна технологія бетону / Б. В. Гусев, В. Г. Зазимко. – Київ : Будівельник, 1991. – 230 с.

4. Назаренко, І. І. Огляд і аналіз вібраційного обладнання для формування плоских залізобетонних виробів / І. І. Назаренко, О. П. Дєдов, О. С. Дьяченко, А. Т. Свідерський // Будівельні машини і технологічне обладнання. – 2017. – Вип. 90. – С. 49-58.
5. Назаренко, І. І. Обґрунтування алгоритму розрахунку вібраційної установки для ущільнення бетонних сумішей зі змінним режимом роботи / І. І. Назаренко, О. П. Дєдов, О. С. Дьяченко // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2019. – Вип. 93. – С. 19-26.
6. Сівко, В. Й. Основи механіки віброємих бетонних сумішей / В. Й. Сівко. – Київ : Вища школа, 1988. – 168 с.
7. Назаренко, І. І. Високоєфективні віброформуванняльні машини / І. І. Назаренко. – Київ : Вища школа, 1988. – 140 с.
8. Гурський, В. М. Синтез нелінійних полічастотних вібраційних машин з резонансними режимами роботи : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.02.02 / Гурський Володимир Миколайович. – Львів, 2018. – 474 с.
9. Ланець, О. С. Основи розрахунку та конструювання вібраційних машин: Книга 1. Теорія та практика створення вібраційних машин з гармонійним рухом робочого органа : навч. посіб./ О. С. Ланець. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018.– 612 с.
10. Дудар, І. Н. Технологія роздільного віброімпульсного формування каменобетонних виробів : монографія / І. Н. Дудар, В. П. Загребя, А. О. Коваленко. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 92 с.
11. Нестеренко, М. П. Розроблення пружних опор вібраційних площадок для формування залізобетонних виробів / М. П. Нестеренко, О. П. Воскобійник, А. М. Павленко // Збірник наукових праць. Серія : Галузеве машинобудування, будівництво. – 2015. – Вип. 1(43). – С. 238-243.
12. Нестеренко, М. П. Дослідження руху віброплощадки з конічними опорами / М. П. Нестеренко, Т. О. Склярєнко // Вісник КДПУ. – Вип. 6 (53). – Ч. 1. – 2008. – С. 91-93.
13. Нестеренко, М.П. Дослідження руху віброплощадки із циліндричними та конічними опорами / М.П. Нестеренко, Т.О. Склярєнко, С.М. Малинський // Збірник наукових праць. Серія : Галузеве машинобудування, будівництво. – 2009. – Вип. 23. Т. 2. – С. 56-62.
14. Назаренко, І. І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем : навч. посіб / І. І. Назаренко. – 2-ге вид. – Київ : Слово, 2010. – 440 с.
15. Sweeney J. Mechanical Properties of Solid Polymers / John Sweeney, Ian M. Ward. – Wiley & Sons, 2012. – 480 p.
16. Géradin M. Mechanical vibrations: Theory and application to structural dynamics / Michel Geradin. – Hoboken, New Jersey : Wiley, 2014. – 616 p.

### References

1. Nazarenko, I.I. (2007). *Vibratsiini mashyny i protsesy budivelnoi industrii [Vibration machines and processes of the construction industry]*. KNUBA Publ.
2. Dudar, I.N. (2006). *Teoretychni osnovy tekhnolohii vyrobiv iz presovanykh betoniv [Theoretical foundations of the technology of products from pressed concrete]*. Vunnytsia: UNIVERSUM-Vunnytsia.
3. Husev, B.V. (1991). *Vibratsiina tekhnolohiia betonu [Concrete Vibration Technology]*. Budivelnyk.
4. Nazarenko, I.I., Diedov, O.P., Diachenko, O.S., & Sviderskyi, A.T. (2017). Ohliad i analiz vibratsiinoho obladdannia dlia formuvannia ploskykh zalizobetonnykh vyrobiv [Review and analysis of vibration equipment for the formation of flat reinforced concrete products]. *Zbirnyk naukovykh prats. Budivelni mashyny i tekhnologichne obladdannia – Collection of scientific works. Construction machinery and process equipment*, 90, 49-58.
5. Nazarenko, I.I., Diedov, O.P., & Diachenko, O.S. (2019). Obgruntuvannia alhorytmu rozrakhunku vibratsiinoi ustanovky dlia ushchilnennia betonnykh sumishei zi zminnym rezhymom roboty [Justification of the algorithm for calculating the vibration installation for compacting concrete mixtures with a variable operating mode]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, construction, road and reclamation machines*, 93, 19-26.
6. Sivko, V.Y. (1988). *Osnovy mekhaniky vibruiemykh betonnykh sumishei [Fundamentals of mechanics of vibrating concrete mixtures]*. Vyscha shkola Publ.
7. Nazarenko, I.I. (1988). *Vysokoefektyvni vibroformovalni mashyny [High-efficiency vibration forming machines]*. Vyscha shkola Publ.



8. Gursky, V.M. (2018). *Syntezy nelineiniykh polichastotnykh vibratsiinykh mashyn z rezonansnykh rezhymamy roboty. Synthesis of the nonlinear poly-frequency vibratory machines with resonance modes*. [Doctoral dissertation: 05.02.02, Lviv Polytechnic National University].
9. Lanets O. S. (2018). *Osnovy rozrakhunku ta konstruiuvannya vibratsiinykh mashyn: Knyha 1. Teoriia ta praktyka stvorennia vibratsiinykh mashyn z harmoniynym rukhom robochoho orhana [Basics of calculation and design of vibration machines: Book 1. Theory and practice of creating vibration machines with harmonious movement of the working organ]*. NU «Lvivska politekhnika» Publ.
10. Dudar, I.N., Zahreba, V.P., & Kovalenko, A.O. (2012). *Tekhnolohiia rozdilnoho vibroimpulsnoho formuvannya kamenebetonnykh vyrobiv [Technology of separate vibroimpulse forming of stone concrete products]*. VNTU.
11. Nesterenko, M.P., Voskobiinyk, O.P., & Pavlenko, A.M. (2015). Rozroblennia pruzhnykh opor vibratsiinykh ploshchadok dlia formuvannya zalizobetonnykh vyrobiv [Development of elastic supports for vibration platforms for forming reinforced concrete products]. *Zbirnyk naukovykh prats. Serii: Haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo – Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 1(43), 238-243.
12. Nesterenko, M.P., Sklyarenko, T.O. (2008). Doslidzhennia rukhu vibroploshchadky z konichnykh oporamy [Investigation of the movement of the vibration platform with conical supports]. *Visnyk KDPU – Bulletin of the KDPU*, 6(53)(1), 91–93.
13. Nesterenko, M.P., Sklyarenko, T.O., & Malynskyy, S.M. (2009). Doslidzhennia rukhu vibroploshchadky iz tsylindrychnykh ta konichnykh oporamy [Investigation of the movement of the vibration platform with cylindrical and conical supports]. *Zbirnyk naukovykh prats. Serii: Haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo – Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 23(2), 56–62.
14. Nazarenko, I. I. (2010) *Prykladni zadachi teorii vibratsiinykh system [Applied problems of vibration systems theory]*. (2nd ed.). Slovo Publ.
15. Ward, I.M., & Sweeney, J. (2012). *Mechanical Properties of Solid Polymers*. John Wiley & Sons, Ltd.
16. Gérardin, M. (2014). *Mechanical vibrations: Theory and application to structural dynamics*. Wiley.

Отримано 27.07.2024

UDC 621.928:531.391:519.6

**Oleksandr Orysenko<sup>1</sup>, Oleksandr Sheka<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:** [oleksandr.orysenko@gmail.com](mailto:oleksandr.orysenko@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3103-0096>

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

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

**E-mail:** [ascheka51@gmail.com](mailto:ascheka51@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-1328-1416>

## MATHEMATICAL MODELING OF VIBRATION PLATFORM WITH RIGIDITY-ADJUSTABLE ELASTIC SUPPORTS

*The article is the next stage of solving the actual applied problem, which consists of the scientific justification of the parameters of vibration-insulating elastic units for vibration sites of small load capacity.*

*The production of modern building materials, concrete, and reinforced concrete products and structures, requirements for their quality determine the constant introduction of the latest technologies into construction practice, the development of new samples of vibration equipment and vibration-forming equipment. The efficiency of vibration machines of various types depends on the reliability and durability of their elastic vibration isolation units. In single-mass vibration machines with an unbalanced drive, these units provide their over-resonance mode of operation, characterized by a minimum dynamic effect of the oscillating mass on the foundation.*

*Vibration platforms with forced harmonic fluctuations of working bodies became most widespread. The main characteristics of vibration sites with this mode of operation are the amplitude and frequency of forced vibrations, which are set technologically depending on the composition of the concrete mixture and the overall dimensions of the molding products. Insufficient efficiency of vibration platforms for the formation of small-sized building products is manifested, for example, in cases of uneven distribution of vertical amplitudes of vibration displacements of points on the horizontal surface of the mold,*



*unsatisfactory quality of surfaces of molded products, heterogeneity of strength indicators by height of products, etc. One of the possible ways to solve these shortcomings is the use of vibration-insulating elastic supports with adjustable variable stiffness and units created on the basis of composite materials.*

*The article describes a mathematical model of a vibration platform for forming small-sized concrete products, which connects the amplitudes of forced vibrations of the working organ at a given circular frequency of forced vibrations with its structural and technological parameters. The mathematical model of the vibration platform was created using the generalized Lagrange motion equation of the second kind. To describe the free motion of the oscillatory mass, several hypotheses were adopted that made it possible to simplify mathematical calculations without compromising the accuracy of the final results. The obtained mathematical model in the form of a system of three differential equations describes the spatial motion of a working organ with a loading medium as the motion of an absolutely solid body. On the basis of calculated numerical values of stiffness coefficients and viscous resistance for elastic vibration-insulating elements satisfying the condition of adjustment of the over-resonance mode of operation, amplitude values of linear and angular vibration displacements of the working component are calculated, amplitude-frequency characteristics of the oscillating system and graphs of temporal dependences of motion of the oscillating mass by corresponding generalized coordinates are constructed. Based on the analysis of the obtained amplitude values of the vibration displacements of the working body, it was concluded that the rigidity parameters of the vibration insulation supports comply with the technological requirements for ensuring high-quality vibration compaction of concrete mixtures.*

**Keywords:** *vibration platform; working organ; vibration exciter; mathematical model; oscillatory system; forcing force; frequency; amplitude.*

*Fig.: 7. Table: 2. References: 16.*

**Peter Tuleja**

Eng., Ph.D., Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automation, Mechatronics, Robotics and Production Systems, Department of Production Systems and Robotics, Technical University in Kosice (Kosice, Slovakia)

E-mail: [peter.tuleja@tuke.sk](mailto:peter.tuleja@tuke.sk). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6390-3109>. Scopus Author ID: 55570858300

## REDUCING THE CARBON FOOTPRINT IN THE USE OF COMPRESSED AIR IN AUTOMATION

*Production process projects are constantly confronted with the level of ecological burden (the so-called carbon footprint) of a specific technology. Since automated production is largely realized using compressed air, the question arises as to what extent the production and use of this medium burdens our environment. During the energy audit of the operation, it is possible to determine a number of areas in which, with the right solution, interesting results can be achieved in saving compressed air.*

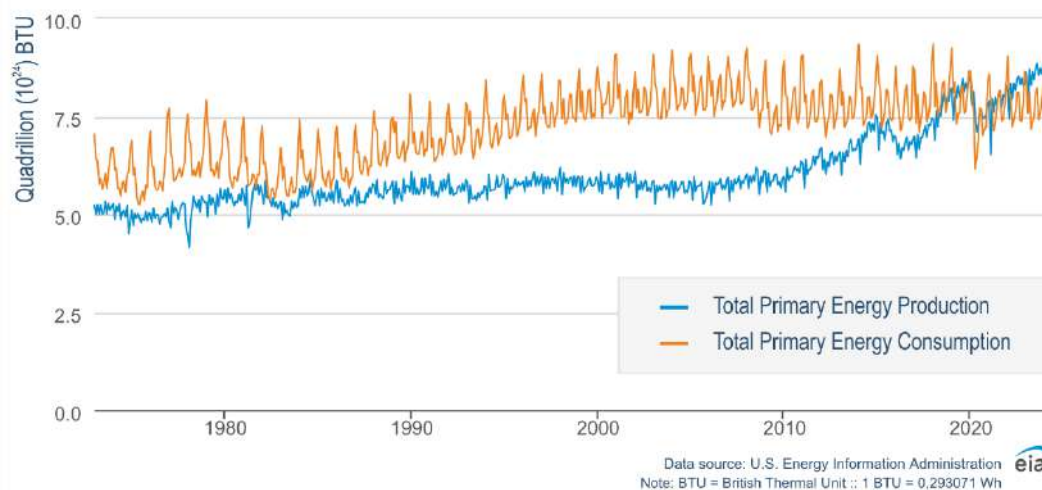
*The article offers an overview and indicates the possibilities of solving the uneconomical handling of produced compressed air, for example by using tools provided by manufacturers of pneumatic components.*

*The information presented in the article is an overview.*

**Keywords:** compressed air; energy audit; compressed air saving; means for monitoring.

*Fig.: 7. References: 12.*

**Urgency of the research.** The need for energy is a permanent phenomenon in industrial production. At the same time, its consumption and production are not always in proper balance (Fig. 1) [1].



*Fig. 1. Primary Energy Overview*

Source: edited by author [1].

In industrial sectors, electricity is the most frequently used energy. Various types of primary energy are used for its production, until recently they were solid fossil fuels, mainly coal, today their dominance is being strongly overtaken by the use of natural gas. The use of fossil fuels, however, is connected to the fundamental problem of today, the share of carbon emissions in the production of electricity, Fig. 2 [1].

After the Kyoto Conference on Climate Change (held in December 1997), to stop global warming, individual industrialized countries, especially in Europe, began to seriously consider reducing the share of emissions released into the atmosphere (the originally intended 6% reduction of CO<sub>2</sub> emissions in the period between 1990 and 2010; unfortunately not yet fully achieved), the use of coal for electricity production began to be strongly suppressed. However, many countries started using natural gas as a fuel in power plants, which reduced the amount of CO<sub>2</sub> in the air, but not to the required extent (Fig. 2).

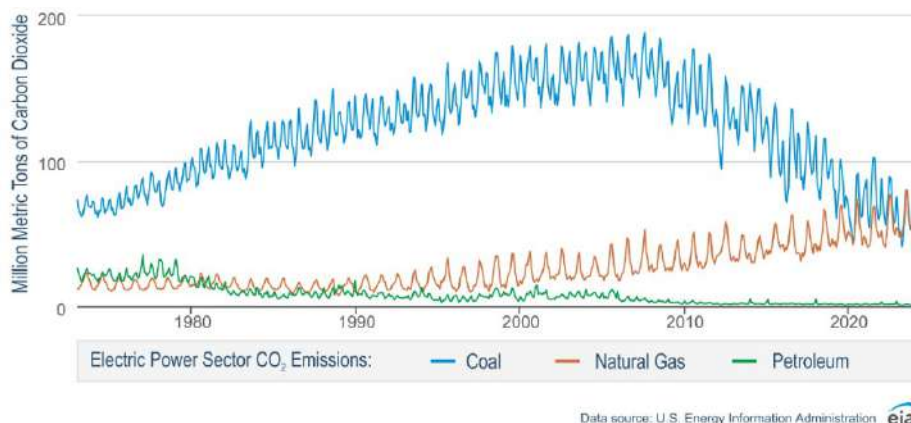


Fig. 2. Primary Energy Overview

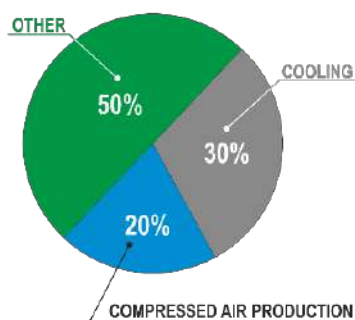
Source: edited by author [1].

Therefore, as a possible solution, strict saving of electrical energy is offered, regardless of the sources from which it was produced. This leads modern companies to reevaluate the energy balance both from the point of view of cost and carbon footprint.

**Problem statement.** Since the production and treatment of compressed air is predominantly (and in the industrial sphere almost absolutely) used electrical energy and in total volume represents up to 20% of global consumption (Fig. 3, a), inappropriately consumed compressed air energy is a negative item of the total operating costs, while it also has a direct impact on ecology.

**Proportions of electricity consumption and compressed air consumption:**

a) Electrical Energy Consumption (total)



b) Compressed Air Consumption (total)

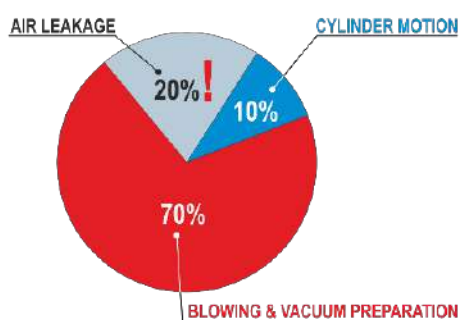


Fig. 3. Consumption of electrical energy and compressed air

Source: edited by author [2; 3].

If we analyze the second graph in Fig. 3, b, it is perhaps a surprising fact that only 10% of the total produced and treated compressed air is used for the force and movement action of pneumatic drives (cylinders).

Alarming is the percentage value of the share of produced compressed air attributable to leaks (leakage) in distribution systems and operating circuits. Many operators of large-scale compressed air operations solve this problem by regularly inspecting the compressed air distribution in the operation. Subsequently, they establish shutdowns in individual sections and solve leaks according to their nature.

However, the biggest "consumers" of compressed air are technologies using compressed air for blowing, possibly drying, and generating negative pressure for the implementation of manipulation tasks from the category of so-called one-sided grasping with an active suction cup.

It is quite difficult to determine the exact percentage of applications using compressed air for blowing/drying and for creating a vacuum. In terms of the total flow volumes required for blowing or drying (in some cases there will be a need to heat the used compressed air) with the

volumes of compressed air for handling active suction cups, the relevant estimate is a ratio of 2:1 in favor of blowing/drying. Due to the specifics of both subgroups, it is possible to apply only some of the 12 air saving areas listed. Nevertheless, we will primarily focus on saving air during the generation of negative pressure.

Conscious companies are increasingly approaching strict energy audits as a tool to uncover areas with the potential to reduce the energy intensity of production.

In reality, there are quite a large number of areas for saving compressed air. The standard VDMA 24581 (Pneumatic fluid power - Application notes for the optimization of the energy efficiency of pneumatic systems), issued by the strongest organization uniting engineering companies operating in Germany (in the original: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) defines a total of 12 areas (Fig. 4), in which savings can be achieved in the use of compressed air. More than half of them allow more than 15% energy savings of compressed air.

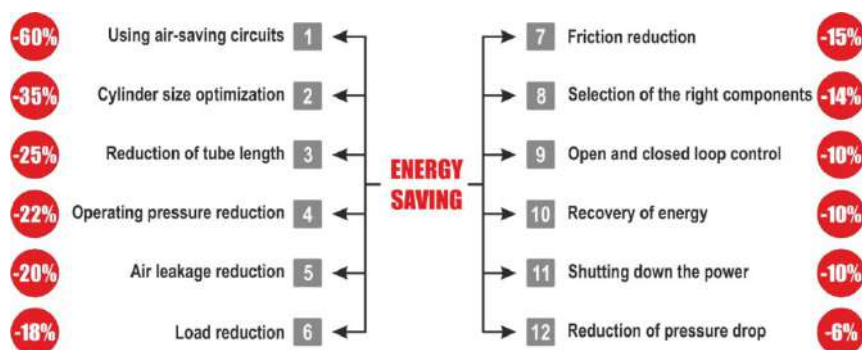


Fig. 4. Areas for compressed air energy saving

Source: edited by author [4; 5].

**Analysis of recent research and publications.** Based on this standard, companies producing components that use or modify compressed air (FESTO, Parker, EMERSON/AVENTICS, SMC, AtlasCopco [6]) began to offer their customers integrated services focused on saving compressed air energy. They present them either as system applications, auditing services [7], or systems enabling the monitoring of compressed air consumption in operations [8; 9] (Fig. 5, a and Fig. 5, b).



Fig. 5. Means for monitoring the consumption of compressed air in operation  
 a – The AVENTICS Smart Pneumatic Analyzer and AF2 Series airflow sensor;  
 b – Air Management System – SMC AMS20/30/40/60 Series

Source: edited by author [10; 11].

These systems have the possibility of connection and data communication through various types of bus solutions (Ethernet, Io-Link, etc.) according to the needs and habits of the end user.

**Isolation of previously unexplored parts of the general problem.** In this article, we will not deal with the solution of general problems related to the energy requirement of the vacuum generated in volume vacuum generators, as it is a fundamentally different method of preparation. This means that the negative pressure that we are analyzing in our considerations is mainly

created in the form of ejectors, which fundamentally need a stream of compressed air for their function (see also the Venturi phenomenon - the principle of the ejector [12]).

**Research objectives.** To be able to save compressed air energy, we need to determine the areas where we have the highest potential for savings, and of course, we cannot avoid constantly measuring the value of the compressed air consumed during operation and comparing it with the calculated or modeled (predicted) consumption (Fig. 6).

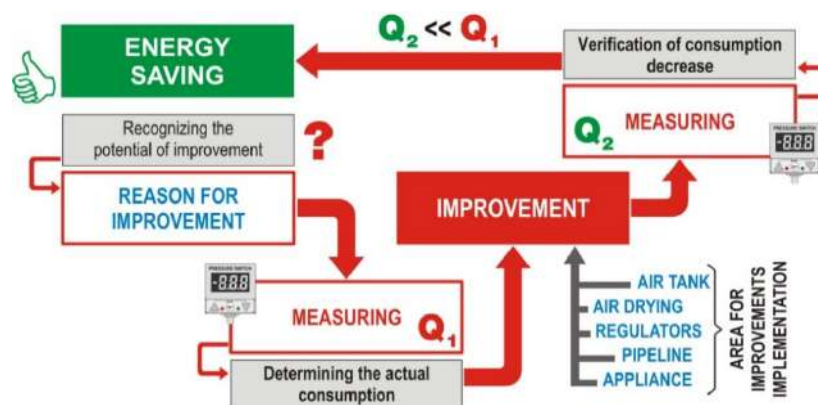


Fig. 6. Procedure for the application of the energy saving system

Source: edited by author [5].

Let us now analyze the individual areas for saving compressed air (Fig. 4).

**1. Using air-saving circuits.** When creating a pneumatic circuit, especially in applications for manipulation tasks with one-sided grasping with an active suction cup, it is possible to use a suitable addition to the classic arrangement of the circuit and its control so that the generation of negative pressure by the ejector does not have to be realized during the entire manipulation task (see Fig. 6).

**2. Cylinder size optimization.** Designers of pneumatic equipment often choose excessively robust drives in an attempt to prevent a decrease in the performance of the equipment in case of insufficient pressure in the circuit. This necessarily leads to an increase in the diameter of the piston, which increases the volume of compressed air consumed during one double stroke. This increases the operating costs of the equipment.

**3. Reduction of tube length.** The length of the hoses used is often not taken into account when circuits are implemented in operations. The filling volume of the hoses must also be included in the total consumption of compressed air during operation because when changing the direction of the airflow through the valve, this air must necessarily be vented. Optimizing the length of the hoses can save up to 25% of compressed air.

**4. Operating pressure reduction.** In the distribution of compressed air in automated operations, the pressure maintained by the operator is often higher than optimal (it should be in the range of 0.4-0.6 MPa at workplaces, optimally up to 1.0 MPa in the distribution network of the production hall. Any necessary higher pressures need to be solved with a booster.

More and more often, in the recommendations of companies, you can meet savings in the way that significantly lower air pressure is used in the compressed air distribution network (on the order of 0.3-0.4 MPa) and it is increased on the power element by including a booster (pressure multiplier). However, it entails additional costs for purchasing the necessary amount of boosters. Without an assessment of costs and savings, one cannot agree with such a procedure.

**5. Air leakage reduction.** Losses of produced compressed air due to leaks in the distribution network of the operation and at the workplaces themselves often reach more than 20%. The average cost of preparing 1m<sup>3</sup> of Class B compressed air (solid particles ≤0.3 μm, compressor oil content ≈1%, condensate ≈4%) is currently around €0.06 – €0.07.

The annual cost of producing compressed air at a working pressure of 0.6 MPa at this price and an operating time of 6,000 h/year and with a consumption of 20 m<sup>3</sup>/min of compressed air is approximately €500,000, of which 20% is €100,000.



**6. Load reduction.** It is not always possible to reduce the load on the working cylinders, but optimization is always in place.

**7. Friction reduction.** In this area, companies offering pneumatic drives have in their portfolio linear pneumatic drives with integrated sliding or rolling guides, which reduces the start-up of the mechanism's performance due to resistances in incorrect mass routing. Although these drives have a higher purchase price, the final savings combined with an extended service life are not negligible.

**8. Selection of the right components.** Components included in the pneumatic circuit should have their justification. For example, it makes no sense to add a microfilter or submicrofilter to the air conditioning unit intended for ordinary chip blowing in chip machining operations, which will necessarily reduce the flow through the main supply channel and thus cause a decrease in performance, which will necessarily lead to an increase in the value of the input pressure by the operator.

**9. Open and closed loop control.** It is necessary to train the operator in operation so that they use energy only as long as it is necessary. If, for example, it is enough to blow a turned part with compressed air for, say, 2 seconds, it is pointless to do so for 15 seconds. This is directly related to point 1, when by appropriate modification of the circuit using the ejector to generate a vacuum, we achieve a reduction in the time when the ejector is active and thereby save the air that would have to flow through it during the manipulation task, fig. 7.

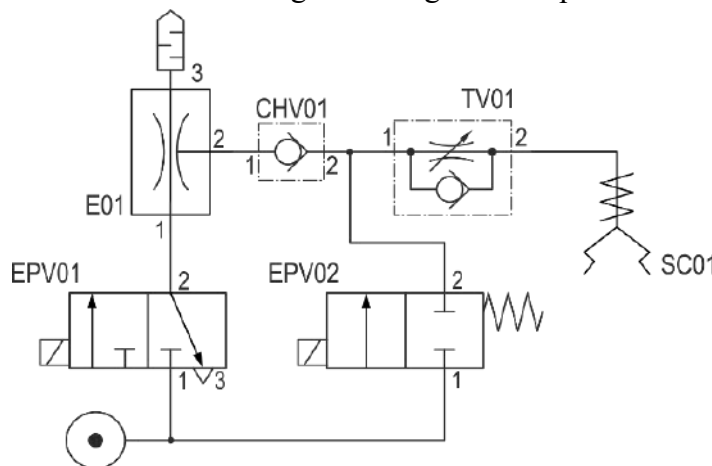


Fig. 6. Compressed air saving circuit arrangement for gripping with an active suction cup

**10. Recovery of energy.** Some solutions recommend "capturing" the used compressed air and re-compressing it with a lower energy load. However, the solution is quite demanding in terms of component equipment for such a modification.

**11. Shutting down the power.** This procedure is much more effective. It is possible to include a valve in air treatment units (FRL units), which disconnects the given workplace from the distribution network in operation at zero consumption.

**12. Reduction of pressure drop.** Just as it is not good for the optimal operation of the device to sharply reduce the flow channel, neither is the opposite procedure desirable. This mainly concerns the diameter of pipes and hoses and their reduction in workplace connection nodes. It is always necessary to look for the optimum depending on the needs.

**Conclusions.** The problem of saving compressed air, regardless of whether it is done for economic reasons or in the interest of improving the environment, will be a challenge to future generations for a long time to come. It is, therefore, appropriate to save energy of all kinds, because the vast majority of resources are exhaustible and carry a dangerous carbon footprint.

**Acknowledgements.** The contribution was created within the framework of the KEGA project 1/0215/23 Research and development of robotic workplaces equipped with industrial and collaborative robots.

### References

1. U.S. Energy Information Administration. (October 21, 2024). *Today in Energy*. The U.S. Energy Information Administration (EIA). <https://www.eia.gov/>
2. Sukop, M., Tuleja, P., Janos, R., Jurus, O., Marcinko, P., Semjon, J., and Vagas, M. (2017). Using the Vacuum in Handling Tasks in the Context of Operating Cost Savings. *Journal of Automation and Control*, 5(2), 85-88. DOI 10.12691/automation-5-2-12.
3. Tuleja, P., Semjon, J. (2015). Energy audit of automated operation. *Transfer inovácií*, 31, 147-150. <http://www.sjf.tuke.sk/transfervinovacii/pages/archiv/transfervinovacii/31-2015/pdf/147-150.pdf>.
4. Festo. (2022). Druckluft-Energieeffizienz-Audit GFAA-AA. <https://www.festo.com/media/pim/798/D15000100156798.PDF>.
5. SMC (<http://www.smceu.com>).
6. Atlas Copco. (2024). 5 tipov, ako znížiť náklady na energiu zo stlačeného vzduchu, ak znižujete výrobu. <https://www.atlascopco.com/sk-sk/compressors/air-compressor-blog/how-to-reduce-compressed-air-energy-costs-if-you-are-reducing-your-production>.
7. Festo. (n.d.). Audit energetickej účinnosti stlačeného vzduchu. [https://www.festo.com/sk-sk/e/podpora/sluzby-pre-usporu-energii/audit-energetickej-ucinnosti-stlaceneho-vzduchu-id\\_2012747](https://www.festo.com/sk-sk/e/podpora/sluzby-pre-usporu-energii/audit-energetickej-ucinnosti-stlaceneho-vzduchu-id_2012747).
8. Emerson. (n.d.). AVENTICS™ Smart Energy Panel. <https://www.emerson.com/sk-sk/catalog/aventics-smart-energy-panel-en-gb>
9. SMC. (n.d.). Monitorovanie, nalogovanie a grafické spracovanie dát z Vašej jednotky série AMS20/30/40/60. [https://www.smc.eu/sk-sk/produkty-a-podpora/konfiguratory-a-software/air\\_management\\_system\\_monitorovaci\\_software](https://www.smc.eu/sk-sk/produkty-a-podpora/konfiguratory-a-software/air_management_system_monitorovaci_software).
10. Emerson. (2022). Leadership in Engineering. <https://www.emerson.com/documents/automation/article-smart-pneumatics-higher-efficiency-design-world-en-8071118.pdf>.
11. Air Management System. (n.d.). [https://content2.smcetech.com/pdf/AMS-C\\_EU.pdf](https://content2.smcetech.com/pdf/AMS-C_EU.pdf).
12. Hajduk, M., Tuleja, P. (2013). *Základy pneumatických mechanizmov*. Výroba, úprava a rozvod stlačeného vzduchu a vákua, TU v Košiciach, Košice.

Отримано 20.09.24

УДК (07)621.7.621.8

*Петро Тулея*

доцент, доцент кафедри виробничих систем і робототехніки, Технічний університет Кошице, (Кошице, Словачія)  
E-mail: [peter.tuleja@tuke.sk](mailto:peter.tuleja@tuke.sk), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6390-3109>, Scopus Author ID: 55570858300

## ЗМЕНШЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ В АВТОМАТИЗАЦІЇ

Під час проектування та експлуатації поточних виробничих процесів все більше аналізується ступінь екологічного навантаження, пов'язаного з конкретною технологією. Це зазвичай називають вуглецевим слідом.

Оскільки автоматизоване виробництво значною мірою реалізується за допомогою стисненого повітря, доцільно поставити запитання, наскільки виробництво та використання цього середовища обтяжує наше середовище.

Якщо взяти до уваги той факт, що стиснене повітря виробляється в промисловому виробництві за допомогою компресорів, які працюють від електрики, вуглецевий слід, що виникає в результаті виробництва електроенергії, автоматично переноситься на вироблене стиснене повітря.

Під час енергоаудиту автоматизованої роботи зони економії стисненого повітря застосовуються відповідно до стандарту VDMA 24581 (*Pneumatic fluid power - Application Notes for the optimization of energy efficiency of pneumatic systems*) у виробництві та використанні стисненого повітря, де можна досягти дуже цікавих результатів за допомогою правильних рішень, що призводить до економії стисненого повітря.

У статті пропонується огляд і вказуються можливості вирішення проблем, що спричиняють марнотратне поводження з виробленим стисненим повітрям, наприклад, за допомогою інструментів, запропонованих у технічній практиці виробниками пневматичних компонентів.

Також представлено методику процедури проведення енергоаудиту та технічні засоби, які пропонують провідні виробники пневматичних компонентів.

Ефективність і коефіцієнт економії при використанні відповідних технічних засобів різна для різних територій, при цьому коливається в межах 10% - 60% економії.

Інформація, представлена у статті, є оглядовою.

**Ключові слова:** стиснене повітря, енергоаудит, економія стисненого повітря, засоби моніторингу.

Рис.: 7. Бібл.: 12.

**Віктор Сергійович Плис<sup>1</sup>, Іван Михайлович Дегтярьов<sup>2</sup>,  
Анна Олександрівна Нешта<sup>3</sup>, Олександр Миколайович Метенко<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів  
Сумський державний університет (Суми, Україна)

**E-mail:** [v.plys@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:v.plys@tmvi.sumdu.edu.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-1635-3839>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів  
Сумський державний університет (Суми, Україна)

**E-mail:** [ivan\\_dehtiarov@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:ivan_dehtiarov@tmvi.sumdu.edu.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8535-987X>

**Scopus Author ID:** [57192084069](https://orcid.org/0000-0001-8535-987X)

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів  
Сумський державний університет (Суми, Україна)

**E-mail:** [anna\\_neshta@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:anna_neshta@tmvi.sumdu.edu.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4072-5439>

**Scopus Author ID:** [55884734500](https://orcid.org/0000-0003-4072-5439)

<sup>4</sup>студент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів  
Сумський державний університет (Суми, Україна)

**E-mail:** [sashamet14@gmail.com](mailto:sashamet14@gmail.com)

## **РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ВЕРСТАТНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ КАНАЛІВ АПАРАТІВ СПРЯМОВУВАЛЬНИХ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ**

*На основі використання методик проектування верстатних пристроїв, заснованих на локальній фіксації заготовок силами закріплення на мінімальній кількості поверхонь та технологічних можливостей сучасних металорізальних верстатів розроблено конструкцію верстатного пристрою для встановлення деталей типу апарат спрямовувальний при обробленні каналів на фрезерних або багатопільових верстатах вертикального компоновання. Уперше визначено статичну жорсткість верстатного пристрою на основі розтискної цанги для оброблення каналів апаратів спрямовувальних. Виконано чисельне моделювання напружено-деформованого стану розробленого верстатного пристрою та отримані значення величин переміщень і напружень.*

**Ключові слова:** точність; чисельне моделювання; методика; жорсткість, відхилення; похибка; резонанс; напруження; переміщення; базування.

*Табл.: 1. Рис.: 10. Бібл.: 20.*

**Актуальність теми дослідження.** Згадка про перші механічні насоси в житті людства з'явилася ще в I столітті нашої ери, їх використовували для подачі води при гасінні пожеж. З появою електричних і парових двигунів насоси почали набувати більшого поширення і популярності.

Насос – це гідравлічна машина, яка використовується для перекачування і створення напорів рідин, суспензій або зріджених газів за допомогою штучно створеного тиску. Відцентрові насоси є найбільш поширеними не лише в Україні, а й у всьому світі серед усіх інших видів насосів. Їхню популярність можна пояснити максимальною продуктивністю, високою надійністю та широкими можливостями застосування. Вони використовуються в багатьох галузях промисловості як для комерційного, так і для домашнього застосування, тому що вони можуть переміщувати більшу кількість рідини порівняно з іншими типами насосів на ринку.

Відцентрові насоси можуть бути різних розмірів – від малогабаритних (потужністю до 1 кВт, що використовуються зазвичай у побутових або малих промислових системах) до великогабаритних потужних (потужністю понад 50 кВт, які використовуються в комунальних, промислових і великих інфраструктурних системах, а також на водосховищах, електростанціях) і можуть мати різну конструкцію, але їх принцип дії та гідродинамічні характеристики завжди будуть подібними. Серед основних конструктивних елементів відцентрового насоса можна виділити наступні: ротор із робочими колесами, секції зі спрямовувальними апаратами, ущільнення та підшипники.



Найважливішою частиною секції відцентрового насоса є апарат спрямовувальний (АС), бо ця деталь направляє потік рідини у вихідний трубопровід, тому профіль його каналів і мінімальний спротив течії є основними показниками, що впливають на КПД. Проте такий конструктивний елемент АС як його канали викликає найбільші складнощі в процесі виготовлення через геометричну форму та розташування, їхню тонкостінність і погану інструментальну доступність при обробці. АС в основному виготовляють з чавунів, високолегованих корозійностійких жароміцних сталей мартенситного класу, високолегованих жароміцних нержавіючих сталей аустенітного класу. Проте останнім часом дедалі більшого поширення набуває виготовлення великої кількості деталей, у тому числі і апаратів спрямовувальних, з композитних матеріалів, що вказує на інтенсивний розвиток технологій, а їх обробка [1] дає нові виклики науковцям і виробництвам.

Враховуючи форму АС та його геометричні особливості, раніше для виготовлення деталей такого типу використовували поворотний стіл та синусну плиту, або наклонно-поворотний стіл. Рідше розроблявся спеціальний верстатний пристрій (ВП), який можна було використати для виготовлення лише конкретного АС і не можна було використовувати для виготовлення інших [2; 3]. Також ці пристрої занадто громіздкі, недостатньо жорсткі через велику кількість елементів конструкції і висоту встановлення апарату відносно столу верстата, а також під час оброблення витрачається велика кількість часу на додаткові переміщення і повороти, що призводить до суттєвого збільшення допоміжного часу, який за даними технологічних карт, що були проаналізовані на підприємствах, складав від 20 до 30 хвилин залежно від конструкції апарату, кількості каналів тощо.

Останніми роками дедалі більшої популярності й застосування набули верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК), які мають більшу точність і більш широкі можливості. Використання верстатів з ЧПК зробило процес виготовлення АС простішим, дозволило скоротити час і підвищити точність, а також суттєво зменшити габарити спеціальних ВП чи взагалі від них відмовитись, закріпивши заготовку для оброблення безпосередньо до столу верстата, використовуючи Т-подібні пази. При такому варіанті виготовлення АС базування заготовки відбувається за допомогою спеціальної оправки, яка хоч і має значно компактніші розміри в порівнянні зі спеціальними чи стандартними ВП, проте може бути використана лише для обробки конкретного апарату. Будь-який з вищеперелічених варіантів базування і закріплення заготовки все одно має недоліки, оскільки при обробці заготовка має бути перезакріплена, а це призводить до суттєвих витрат допоміжного часу, що для АС середніх розмірів становить від 10 до 15 хвилин [2]. Також можливості обробити всі канали за одне закріплення перешкоджають прихвати, через які суттєво зменшується інструментальна доступність.

Підприємствам постійно необхідно оновлювати обладнання та технології, а також запроваджувати новітні підходи до виробничого процесу для виготовлення конкурентоспроможної продукції. Номенклатура насосів, а відповідно і АС, постійно зростає, оновлюються моделі та змінюються технічні характеристики і при цьому скорочується час, відведений для виходу продукції на ринок. Тому актуальним завданням є розроблення переналагоджуваних ВП.

Зазвичай верстатний парк підприємств, що виготовляють чи обслуговують відцентрові насоси, містить досить велику номенклатуру різноманітних верстатів і обробних центрів – як універсальні, так і з числовим програмним керуванням. Враховуючи, що постійно відбувається модернізація насосного обладнання з метою підвищення міжремонтних інтервалів, ефективності його роботи та ККД, а також існує широка номенклатура встановлених насосів і багато варіантів їх модернізації, то тримати на складах таку кількість запасних частин усіх типорозмірів, яка б могла задовольнити всі потреби не тільки економічно не вигідно, а й не має жодного сенсу з технічного погляду, бо після модернізації ці запасні частини не будуть потрібні.

У цій статті акцент буде зроблено саме на виготовленні деталей та запасних частин типу АС відцентрового насоса. Є дуже широка номенклатура АС, але розглядатися в даній статті будуть саме тонкостінні АС середніх діаметрів, які за обсягом виготовлення є найбільш поширеними [2]. Виробництво тонкостінних АС ускладнюється тим, що окрім вищеперерахованих викликів при їх виготовленні ще необхідно запобігти відхиленню від форми, яке можна зробити при затисканні через прихвати.

Тому при конструюванні технологічного оснащення потрібно враховувати всі вищеперелічені моменти.

Важко переоцінити роль відцентрових насосів у житті людства, адже вони набули настільки значного поширення, що неможливо уявити життя без них. Виробники насосної продукції DALGAKIRAN [4] та ASCO Pompe [5] з багаторічним стажем розповідають про переваги саме відцентрових насосів, а також наочно показують їхню номенклатуру.

Вимоги до проектування, виготовлення, постачання, монтажу та експлуатації відцентрових насосів, а також технічні умови регламентуються стандартами [6-9].

Відцентрові насоси є найбільш поширеним типом насосів. Від чутливих промислових – таких як насоси живильної води для котлів або насоси для охолодження води на атомній електростанції – до простіших – таких як насоси підвищення тиску питної води в житлових комплексах. Правильний вибір відцентрового насоса є важливим, тому в публікації [10] автори представляють методологію вивчення та розпізнавання відцентрових насосів.

У статті [11] зазначається, що ВП є ключовим обладнанням у виробництві, яке виконує завдання позиціонування, підтримки та фіксації компонентів, а також проводиться систематичний огляд літератури щодо всіх концепцій верстатних пристроїв, які нині використовуються, а також усіх нових розробок і досліджень за останні 10 років. Підсумовуючи аналіз, автори зазначають, що верстатні пристрої є дуже важливою частиною виробничого процесу й в окремих галузях витрати на їх розробку й виробництво можуть складати до 29 % від загальних інвестицій.

Іванов та інші в роботі [12] зазначають, що обробка деталей на металорізальних верстатах не може бути забезпечена без використання ВП. Вони є невід'ємною частиною замкнутої технологічної системи «верстат – ВП – різальний інструмент – заготовка» і істотно впливають на точність і якість обробки поверхонь деталей машин. Також у роботі представлено структурні етапи автоматизованого проектування ВП та визначено потоки даних між ними для забезпечення комплексного підходу.

Про важливість гнучких ВП у сучасному виробництві є інформація у статті [13] авторів Віталія Іванова та Йозефа Зайця. Вони наголошують на тому, що ВП відіграють важливу роль у виробництві високоякісної та конкурентоспроможної продукції в багато-профільному виробництві, а також описують шляхи підвищення ефективності механічної обробки деталей, які сприяють підвищенню ефективності планування виробництва.

У роботі [14] висвітлюється те, що різноманітність продукції збільшується, а її життєвий цикл скорочується, тому, щоб бути ефективними, підприємствам необхідно адаптувати різні підходи до розробки – на зміну класичному проектуванню ВП приходять проектування на основі методів оптимізації із застосуванням штучного інтелекту, що включає в себе: планування налаштування, планування кріплень, проектування та перевірка. Для кожної з цих сфер розробляються різні методології. Основною метою цієї дослідницької роботи є інтеграція сегментованих методологій в одну інтегровану методологію.

Гнучкі ВП застосовуються в багатьох сферах, приклад їх використання у виробництві частин літака, а також при його збиранні описують Hui Li та ін. [15] у своїй публікації. Вони роблять висновки, що завдяки використанню гнучкого ВП значно знижується вартість виробництва та підвищується його ефективність, а також підвищується точність.

Сучасні тенденції, спрямовані на скорочення часу виходу продукції на ринок, а також збільшення її асортименту, неможливі без використання переналагоджуваних ВП. На прикладі дизайну пристрою автори роботи [16] представляють підхід, який дозволяє виконати гнучке забезпечення та реконфігурацію обладнання завдяки конструкції верстатного пристрою.

Гнучкі верстатні пристрої знаходять широке застосування при обробці тонкостінних деталей. У роботі [17] висвітлюється питання реконфігурації гнучких ВП, а також спосіб зменшення деформації, і, як результат, підвищення якості кінцевої продукції при виготовленні тонкостінних деталей.

Автори роботи [18] запатентували переналагоджуваний ВП для оброблення деталей типу шатуни, що свідчить про важливість проектування і використання гнучких переналагоджуваних ВП для деталей різних типів.

Основною проблемою під час закріплення АС на верстаті або у пристрої є великий обсяг поверхонь каналів, що підлягають обробленню та при цьому залишається досить мало поверхонь для закріплення.

Також ВП має бути достатньо жорстким для реалізації можливостей сучасних метало-різальних верстатів та різальних інструментів, при цьому бути переналагоджуваним для встановлення заготовок у максимально можливому завчасно розрахованому діапазоні розмірів згідно з конструктивними характеристиками з мінімальними затратами часу та коштів.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх публікацій та досліджень показав, що питанням виготовлення верстатних пристроїв, які вирішують масу існуючих проблем, займалися багато науковців і воно дуже актуальне. Проте серед маси технічних рішень чи часткових рекомендацій щодо проектування ВП для обробки тонкостінних АС середнього розміру при огляді багатьох літературних джерел (як статей, так і підручників), виявилось недостатньо для розроблення конструкції ВП, що забезпечує необхідні технічні параметри операції. Також саме для таких ВП не проводився їх розрахунок за допомогою методів чисельного моделювання.

**Постановка завдання.** Враховуючи нестачу ВП для обробки тонкостінних спрямовувальних апаратів середнього розміру основним завданням буде розроблення конструкції такого пристрою, який буде мати достатню інструментальну доступність, жорсткість, точність та надійність закріплення протягом усього процесу оброблення та не деформує оброблювану заготовку при цьому.

**Метою статті** є розроблення конструкції ВП для оброблення каналів АС за один установа та доведення його працездатності шляхом чисельного моделювання.

**Методика дослідження.** АС (рис. 1) є одним з найважливіших елементів відцентрового насоса, який безпосередньо впливає на термін експлуатації насоса та виконання ним службового призначення. АС здійснює відведення рідини від робочого колеса попереднього ступеня з мінімальними втратами та підведення потоку до колеса наступного ступеня, таким чином перетворюючи кінетичну енергію в тиск.

Враховуючи, що відцентрові насоси є різних типорозмірів починаючи від малогабаритних і закінчуючи великогабаритними промисловими, то розміри і конструкція АС відповідно можуть бути різними. Для визначення розмірів найбільш розповсюджених насосів, а відповідно і АС, а також для актуальності дослідження при співпраці з інженерами машинобудівних підприємств Сумської області, які займаються виготовленням насосного обладнання – АТ «Сумський завод «Насосенергомаш», ПрАТ «Свеський насосний завод», АТ «СМНВО - ІНЖІНІРИНГ» та ТОВ «ТРІЗ ЛТД», які надали доступ до своїх креслень насосів, що виробляються на їх базі, було проаналізовано мінімум по десять найменувань креслень кожного з видів насосів різних габаритів.

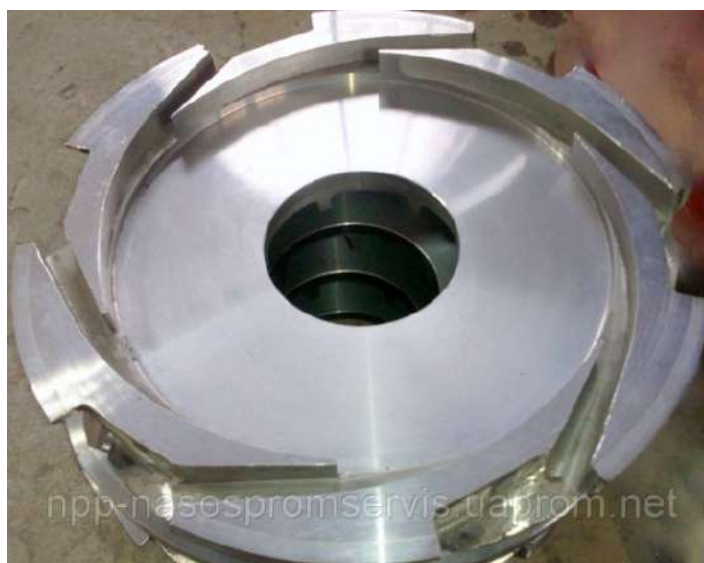


Рис. 1. Приклад (фотографія) реального АС [19]

Джерело: <https://nasos-2005.com/ua/p239219255-zapchasti-nasosam-tsns.html>.

Аналіз креслень (рис. 2) на виробництвах вищеперелічених машинобудівних заводів Сумської області, що займаються виготовленням насосного обладнання, дозволив розподілити АС за габаритними розмірами. Серед обсягу апаратів, що були проаналізовані, а це від малих (діаметром 150 мм) до великих (діаметром 600 мм), більшість апаратів, а саме  $\frac{2}{3}$ , або ж приблизно 66 %, складають апарати середнього розміру діаметром від 220 мм до 380 мм, що корелює з законом нормального розподілу випадкових величин [3]. У зв'язку з цим можна зробити висновок, що більшість насосів, які виробляються в нашому регіоні, належать до насосів так званого середнього класу, відповідно АС можна також віднести до апаратів середніх розмірів.

Об'єктом дослідження було обрано АС. АС залежно від службового призначення насоса, мають досить різні розміри, серед яких було обрано апарат середнього розміру, що вже згадувалось вище вони є найбільш поширеними. При цьому максимальна увага приділяється конструкції, яка виглядає найбільш складною з погляду виготовлення через досить тонкі стінки каналів і великий внутрішній діаметр (рис. 3), що своєю чергою ускладнює процес закріплення та перезакріплення, а також перешкоджає інструментальній доступності при обробці.

Цей АС входить до складу гідродинамічного вузла відцентрового насоса ЦН 35/400, який призначений для перекачування дихлоретану при виробництві хлорвінілу. Основні параметри АС (рис. 4):

- кількість каналів – 6;
- зовнішній діаметр – 290 мм;
- внутрішній (посадочний/посадковий) діаметр – 210 мм;
- товщина – 44 мм;
- найменша товщина стінки каналу – 3 мм;
- найбільша товщина стінки каналу – 27,25 мм;
- ширина каналів – 12,5...16,6 мм;
- точність перелічених розмірів – IT14;
- матеріал – корозійностійка сталь 20X13 ДСТУ 5632-2016;
- маса – 4,79 кг.

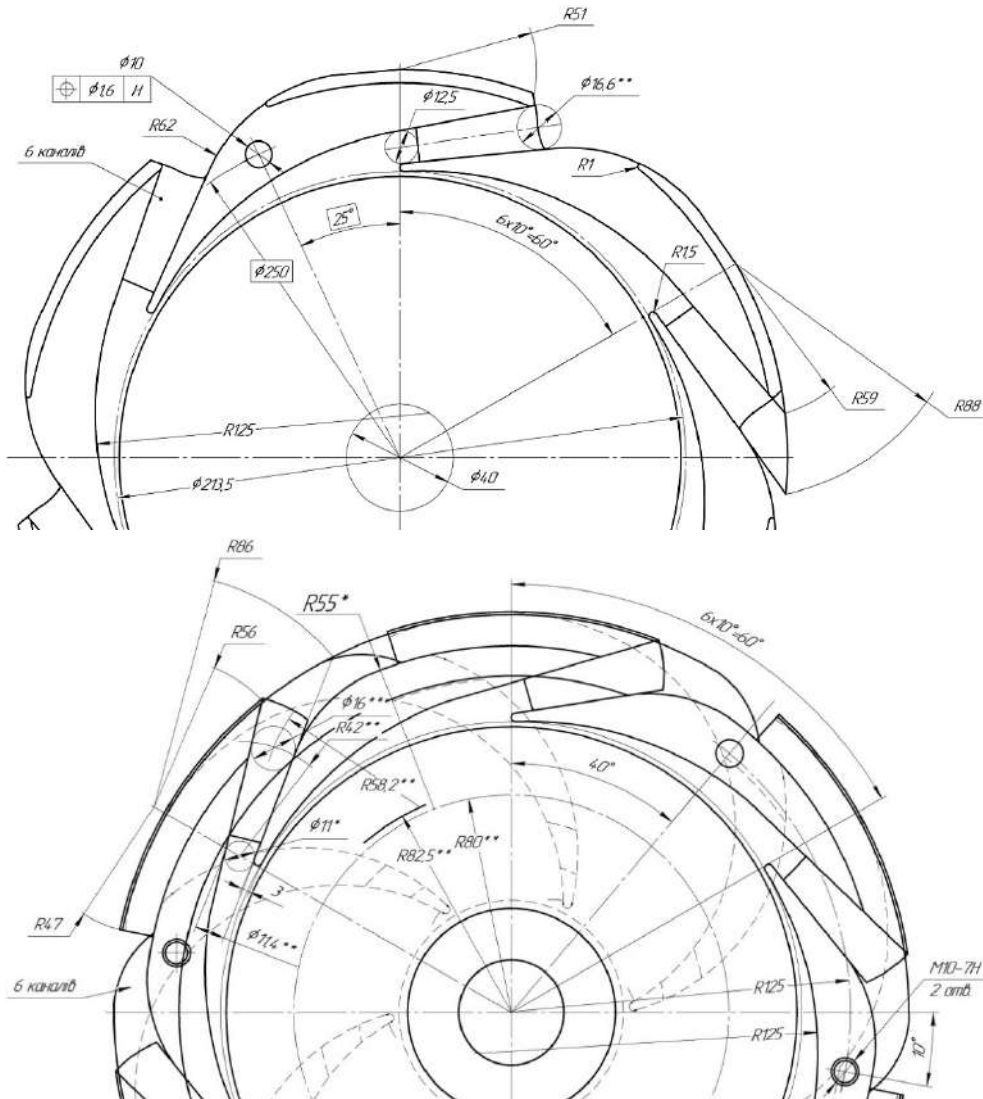


Рис. 2. Приклади (фрагменти креслень) АС середніх типорозмірів  
Джерело: розроблено авторами.

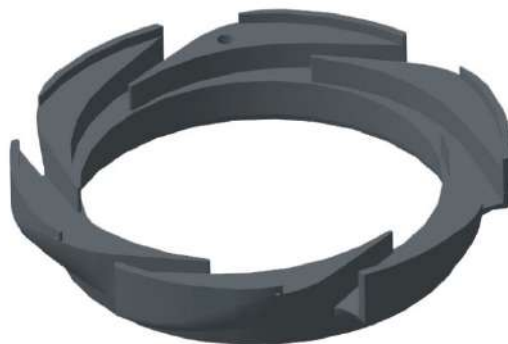


Рис. 3. 3D-модель АС, який обраний як об'єкт дослідження  
Джерело: розроблено авторами.

За даними базового (заводського) технологічного процесу допоміжний час на установку на вертикально-фрезерній із ЧПК операції становить 12 хвилин.

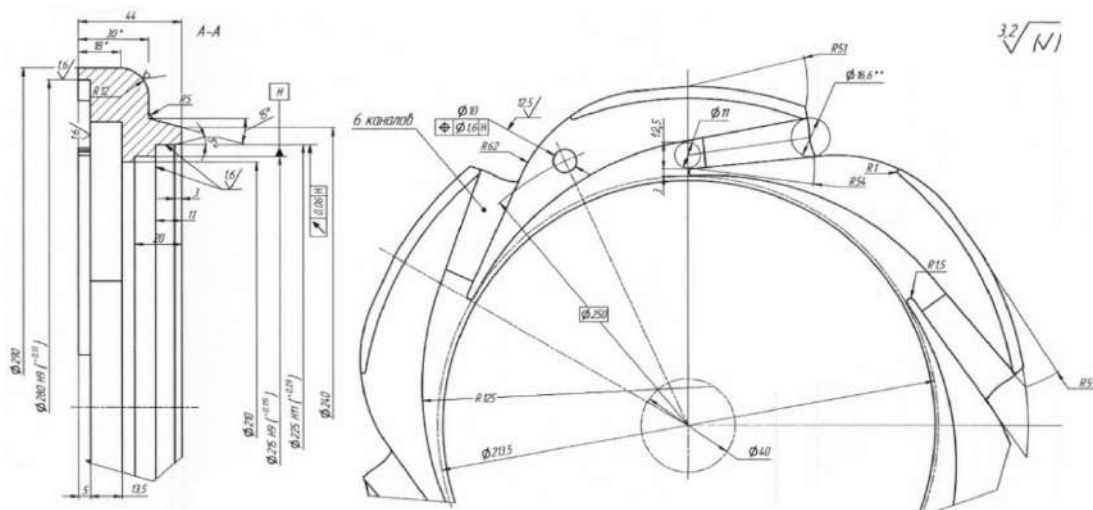


Рис. 4. Фрагмент креслення АС з розмірами каналів

Джерело: розроблено авторами.

Для забезпечення можливості обробки всіх каналів АС за один установ має бути здійснений безперешкодний доступ до всіх оброблюваних поверхонь. Це може забезпечуватись за рахунок схеми базування (рис. 5). При цьому виникає установка база по торцю  $\phi 213H9/\phi 209^*$  і подвійна опорна база по циліндричній поверхні  $\phi 213H9$  на всю її довжину. Закріплення відбуватиметься одночасно по всім точкам внутрішнього циліндра  $\phi 213H9$  на розтискання за рахунок використання цанги спеціальної конструкції.

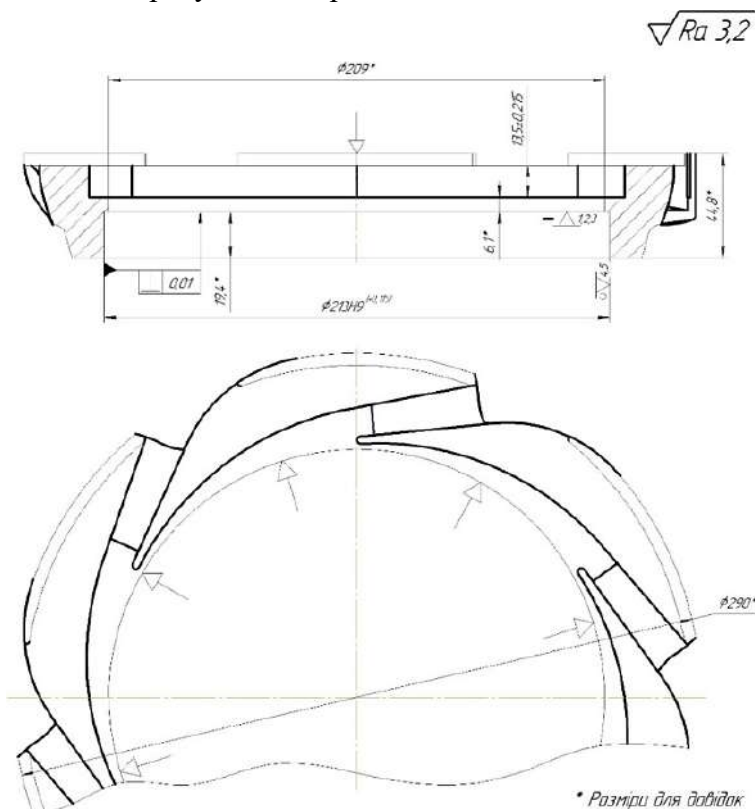


Рис. 5. Теоретична схема установки заготовки АС

Джерело: розроблено авторами.



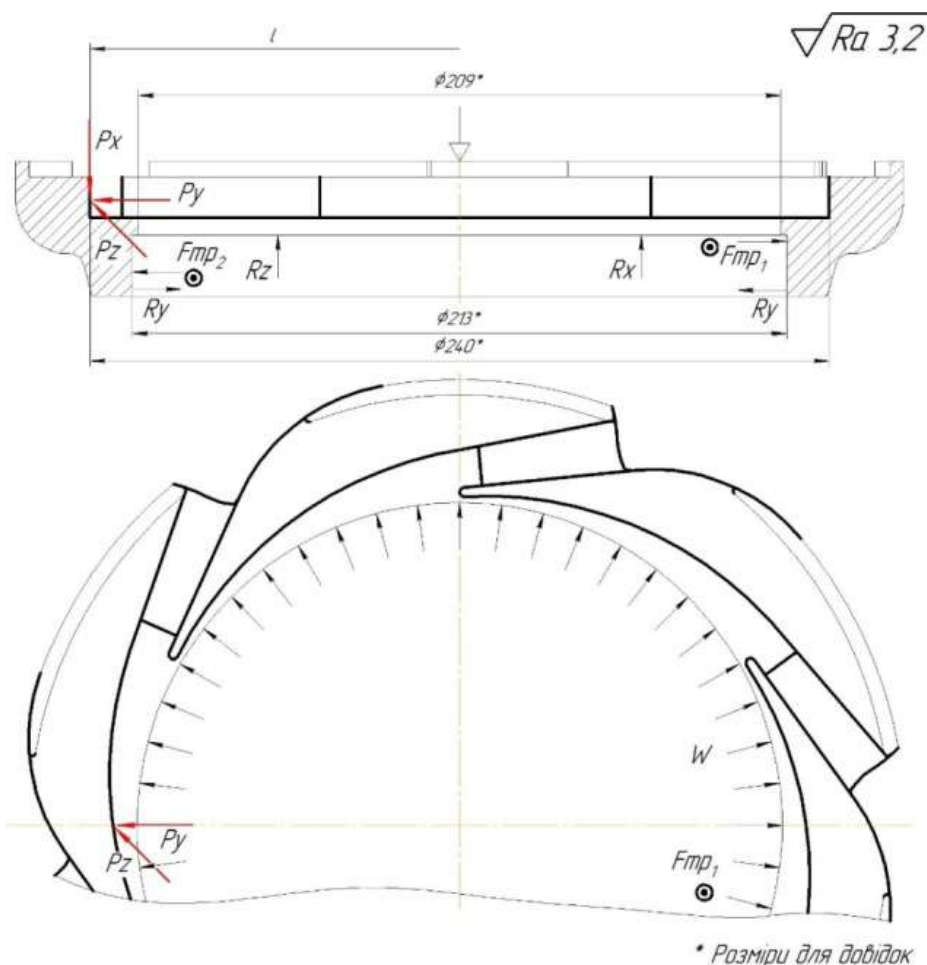


Рис. 6. Розрахункова схема визначення величини осьової сили закріплення  
Джерело: розроблено авторами

У зв'язку з тим, що закріплення у нас відбувається за внутрішню поверхню  $\phi 213$ , то рух АС буде обмежуватись лише силами тертя і, власне, перешкоджати його зрушенню силами різання лише за рахунок сил тертя, то для розрахунку необхідної сили в контактній взаємодії «циліндрична поверхня – пелюстки цангової оправки» необхідно розрахувати величину докладання осьового зусилля, яке буде спричинятися шляхом втиснення конуса в цангову частину оправки. Для цього була розроблена розрахункова схема дії сил різання і сил опору (сил закріплення) для цієї схеми обробки.

З рис. 6 складаємо рівняння сил та моментів і визначаємо силу  $W$ .

$$W = \frac{K \times l \times P_y}{f \times \left( \left( R_1 + \frac{209}{2} \right) + \left( R_2 + \frac{213}{2} \right) \right)} = 2509 \text{ Н}, \quad (1)$$

де  $K$  – коефіцієнт запасу для заданих умов обробки та режимів різання [20];

$l = 120$  мм – плече дії сили  $P_y$ ;

$P_y = 682$  Н – складова сили різання;

$f = 0,25$  – коефіцієнт тертя по поверхнях оправка-цанга – заготовка;

$R_1 = 106,5$  мм – радіус циліндричної поверхні оправки-цанги;

$R_2 = 104,5$  мм – менший радіус торця оправки-цанги.

На основі теоретичної схеми встановлення для можливості виконання чисельного моделювання з метою перевірки сталості закріплення та визначення точності обробки в статичному режимі розробимо 3D модель конструкції ВП.

Далі на основі цього концепту була спроектована 3D-модель ВП (рис. 7). Механізм затиску для попередніх розрахунків обираємо гвинтовий, що дозволить затискати апарат швидко та надійно, при цьому допоміжний час складе 1,5 хвилини [19]. Але механізм затиску також може бути реалізований різними способами – пневмо, гідро, електро – що не є принциповим у контексті цього дослідження. Конструкція самих установчих та затискних елементів ВП повинна забезпечувати необхідну жорсткість, відповідно мінімальні вібрації, точність обробки, яка має відповідати допускам на рис. 4.

Для цього треба виконати чисельне моделювання розробленої конструкції ВП. З метою скорочення часу на розрахунки усі елементи моделі при побудові були максимально спрощені.

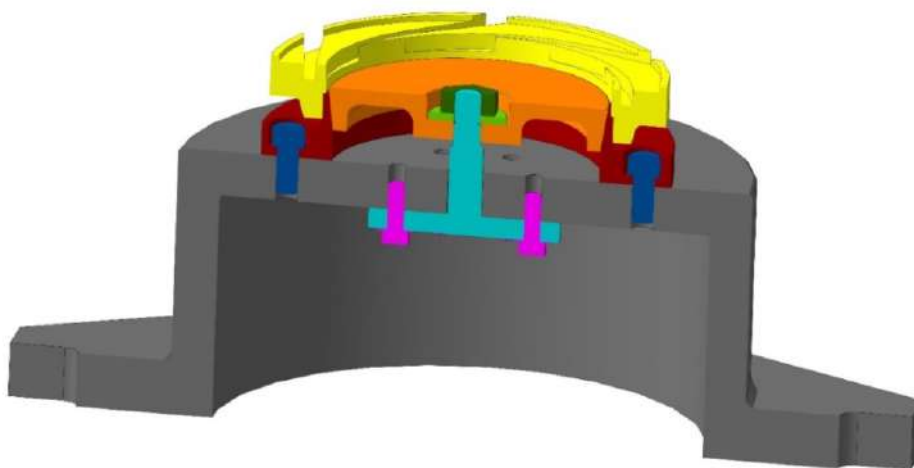


Рис. 7. 3D-модель ВП для чисельного моделювання

Джерело: розроблено авторами.

Саме така конструкція корпусу ВП вибрана для того, щоб ми могли мати можливість встановлення механізованого приводу будь-якого типу, а також перспективу розширення номенклатури оброблюваних деталей подібної форми в значно більшому діапазоні розмірів з мінімальними затратами шляхом заміни установчих елементів, а саме оправки цангової і притискного конуса.

Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) виконуємо для тих деталей ВП, які будуть безпосередньо впливати на показники міцності та точності при обробці деталі. На цьому етапі дослідження перевіряються еквівалентні напруження, що виникають у місцях контакту заготовки та установлювально-затискних елементів як результат дії сил закріплення та дії моментів та сил в процесі різання, а також умови за допустимими напруженнями для деталей із конкретних матеріалів.

Для виконання розрахунків використовуємо ANSYS Workbench. Під час дослідження визначаємо частоти власних коливань і порівнюємо з частотами, що можуть виникнути в процесі різання при обробленні заготовки. Ці результати допоможуть нам зрозуміти чи правильно розроблена конструкція ВП та за необхідності удосконалити її, для того щоб підвищити точність та запобігти явищу резонансу. Оскільки всі деталі розробленого ВП виготовляються зі сталі 45, то механічні властивості матеріалу, який використовується у моделі, взяті аналогічно як і в дослідженні [20]. Матеріалом заготовки АС є сталь 20X13 ДСТУ 5632-2016, механічні властивості якого також задавались у програмі.

У табл. 1 наведена розрахункова схема прикладення навантажень на систему «ВП – заготовка» у програмі ANSYS.



Таблиця 1 – Групи з'єднань контактних пар досліджуваного ВП

ВП і схема розташування контактів				
Базова поверхня / тип закріплення	Параметри реалізованих груп з'єднань			
	Контакт	Поверхні, що контактують	Вид поверхонь, що контактують	Коефіцієнт тертя $f$
Нижня площина / fixture support	1	Конічна поверхня притискного фланця / конічна поверхня цанги	гладкі / гладкі	0,1
	2	Циліндрична поверхня цанги / базовий отвір заготовки	гладкі / гладкі	0,1
	3	Торцева поверхня цанги / базовий торець заготовки	гладкі / гладкі	0,1

Джерело: розроблено авторами.

Для виключення будь-яких можливих переміщень обов'язковою умовою під час моделювання було закріплення ВП за нижню поверхню основи корпусу ВП, що імітує фіксацію на столі вертикально-фрезерного з ЧПК верстата, а також об'єднано всі поверхні між собою з типом контактів «Bonded». У місцях посадок задані контакти типу «Frictional» із зазначенням параметрів тертя та врахуванням технічних характеристик кожної з них (табл. 1). Це зроблено для чіткішого відображення деформацій, що можуть виникнути в процесі обробки та для отримання більш точних результатів.

**Результати дослідження.**

У результаті моделювання було отримано графічні дані по розподілу максимальних напружень (рис. 8, а) та переміщень (рис. 8, б).

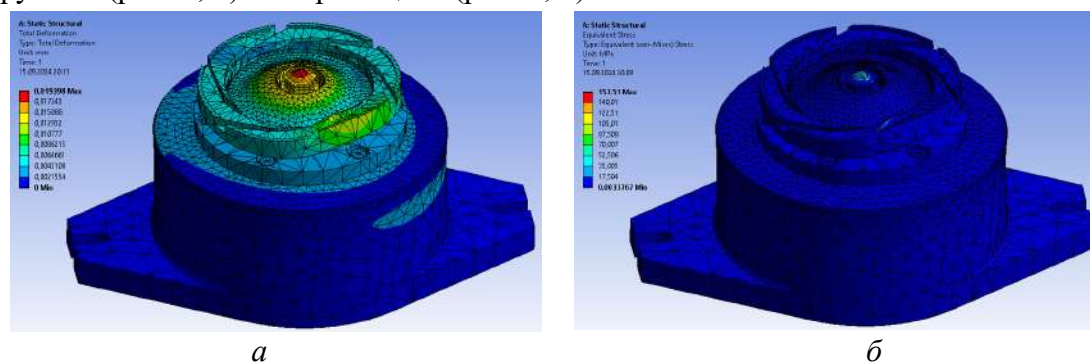


Рис. 8. Ілюстрація розподілу:

а – максимальних напружень і б – максимальних переміщень

Джерело: розроблено авторами.

Для більш точного аналізу характеру переміщень елементів системи «ВП – заготовка» за осями координат на рис. 9 частково представлені ілюстрації переміщень, які виникають при закріпленні та фрезеруванні заготовки. При цьому переміщення за віссю Х становлять 0,00002 мм, що є дуже малим значенням у порівнянні з допуском на обробку та величинами переміщень за іншими двома осями, тому вони не показані.

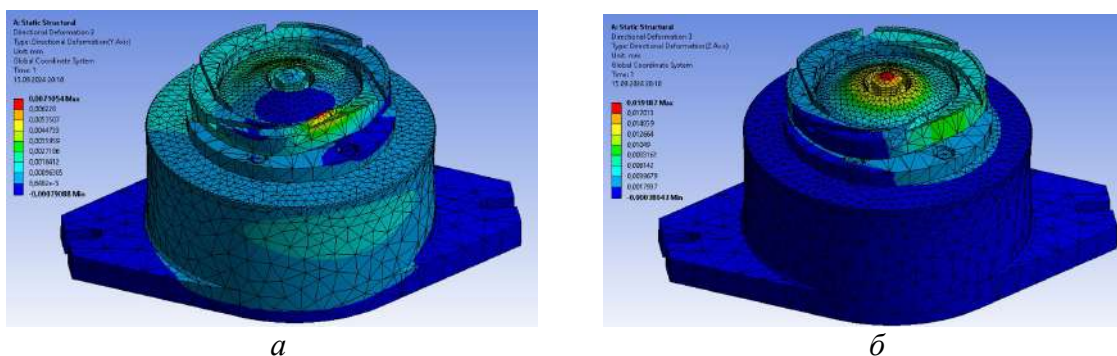


Рис. 9. Деформації по осях:  
а – по осі Y і б – по осі Z

Джерело: розроблено авторами.

Проаналізувавши отримані результати величин напружень та переміщень, можна зробити висновок, що розроблений ВП буде працездатним під час реального експерименту та точність обробки буде забезпечена. Отримані при аналізі значення переміщень не виходять за межі допусків, оскільки найбільш точний розмір на даній операції – ширина каналу в найтоншому його місці становить 12,5 (+0,43; 0) мм, а загальні деформації не перевищують 0,02 мм. Враховуючи це, допустимий запас за величиною переміщень складає 0,41 мм, що, безумовно, необхідно, адже інші складові похибок обробки також будуть впливати на точність. Максимальні напруження під час чисельного моделювання показали 158 МПа, що менше допустимих для матеріалів деталей ВП. При цьому ці напруження виникають на різьбовій ділянці штока, для якого була задана сила затяжки 10 000 Н, що в 4 рази перевищує силу затиску W, розраховану за схемою.

Для перевірки роботи ВП на розрахункових режимах різання з погляду опору частотам коливання, що при цьому виникають за допомогою функції Modal Analysys, що вбудований у програмному комплексі ANSYS визначено частоти його власних коливань. Дані значення частот було порівняно з частотами, які виникають у процесі механічної обробки, що за потреби дозволить здійснити оброблення на інших режимах, щоб запобігти резонансу. На рис. 10 зображені три перших форми власних коливань досліджуваної системи «ВП – заготовка».

Отримані значення величини коливань за результатами інженерного дослідження частот (мод) становлять 1488, 1525 та 1659 Гц для першої, другої та третьої критичних частот відповідно.

Враховуючи, що на даній операції максимальна частота процесу різання не перевищує 141 Гц, то з впевненістю можна сказати, що при обробці явище резонансу виникати не буде, позаяк вона значно менша за значення моди № 1.

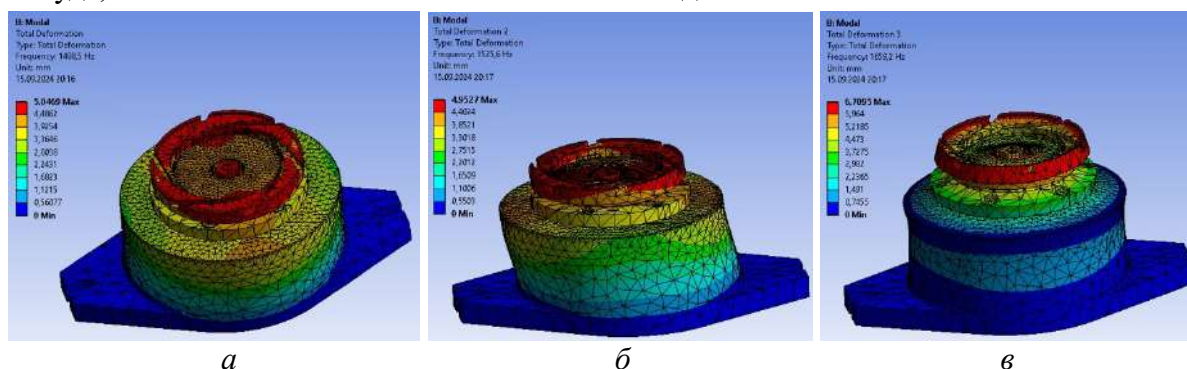


Рис. 10. Ілюстрації критичних частот коливань ВП:  
а – першої; б – другої; в – третьої

Джерело: розроблено авторами.

За результатами проведених розрахунків встановлено, що перша критична частота власних коливань ВП суттєво перевищує максимальну частоту процесу різання, а це значить, що явище резонансу не виникне для запропонованої конструкції ВП.

За результатами модального аналізу можна припустити, що в реальних умовах динамічна жорсткість спроектованого ВП буде достатньою для виконання механічного оброблення без виникнення явища резонансу, що і буде перевірено в наступних дослідженнях.

**Висновки.** У результаті роботи було розроблено конструкцію ВП для оброблення каналів АС за один установ та доведено його працездатність шляхом порівняння отриманих результатів чисельного моделювання з допустимими значеннями параметрів оброблення. Теоретично доведено, що величини напружень в елементах конструкції ВП значно менші за допустимі значення характеристик матеріалів системи «ВП – заготовка», а переміщення не перевищують значення допуску на ширину каналу. При цьому коефіцієнт запасу за напруженнями становить 3,8, а загальні деформації не перевищують 0,02 мм, що суттєво менше за допуск. Величини переміщень за осями координат, вздовж яких було прикладене навантаження, також не перевищують заданих конструктором значень.

Вперше теоретично доведено, що конструкція розробленого ВП для фрезерування каналів АС з використанням принципу затиску із розтискною цангою та притискним фланцем за внутрішню циліндричну поверхню АС, що забезпечує повну інструментальну доступність для обробки, здатна забезпечувати необхідну точність оброблення при статичному навантаженні, адже величини переміщень не перевищують допустимих значень.

Встановлено, що допустимий запас по переміщеннях становить 0,41 мм, а отже, залишається певний запас на можливі похибки, що виникають під час оброблення.

Теоретично доведено, що резонансу під час оброблення не виникне, адже перша критична частота коливань розробленої конструкції в 10,5 раза перевищує частоту процесу різання, що в перспективі дозволить застосовувати більш продуктивні режими оброблення і ВП не буде найслабшою ланкою в технологічній системі.

Встановлено, що розроблена конструкція ВП дозволяє скоротити допоміжний час на базування та закріплення з 12 хвилин до 1,5 хвилини, або ж у 8 разів, що дозволить підвищити ефективність обробки в реальному виробництві.

Отримані результати вказують на потенційні можливості застосування ВП з використанням принципу затиску із розтискною цангою за внутрішню циліндричну поверхню АС при обробці за одне встановлення та загалом про доцільність проектування ВП, заснованих на подібному принципі для інших класів деталей, що мають короткий циліндричний отвір великого діаметру та малу жорсткість. Тому подальші дослідження будуть спрямовані на експериментальне підтвердження теоретичних даних під час здійснення процесу оброблення.

### Список використаних джерел

1. Колесник, В. А. Прогнозирование микрорельефа обработанной резанием поверхности волоконистых полимерных композиционных материалов / В. А. Колесник; рук. Д. В. Криворучко // Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фак-ту технічних систем та енергоефективних технологій, м. Суми, 23-26 квітня 2013 р. : у 2-х ч. / ред. кол.: О.Г. Гусак, В.Г. Євтухов. – Суми : СумДУ, 2013. – Ч. 1. – С. 23.
2. Яковенко, І. Е. Технологічні основи машинобудування : навч. посібник / І. Е. Яковенко, О. А. Пермяков, А. В. Фесенко ; Нац. техн. ун-т «Харків. політех. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – 421 с.
3. Добрянський, С. С. Технологічні основи машинобудування [Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / С. С. Добрянський, Ю. М. Малафеев ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 379 с.
4. Загальнопромислові відцентрові насоси - замовити в Dalgakiran [Електронний ресурс] // DALGAKIRAN - промислове обладнання в Києві. Далгакіран - офіційний сайт представництва в Україні. – Режим доступу: <https://dalgakiran.ua/uk/products/vidcentrovi-nasosy-zagalnogo-zastosuvannya>.

5. Відцентровані Насоси Ціна (2024) Купити в Україні [Електронний ресурс] // Промислові Насоси + Обладнання (2024) купити в Україні - Аско Пампс. – Режим доступу: <https://ascopumps.com.ua/ua/pumps/tsentrobezhye.html>.
6. ДСТУ 3063-95. Насоси. Класифікація. Терміни та визначення. – [Чинний від 1995-04-21]. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 47 с.
7. ДСТУ 4132-2002 Насоси відцентрові загальнопромислового застосування. Вимоги до проектування, виготовлення, постачання, монтажування та експлуатування. Звід правил / розроб. О. Швідін [та ін.]. – Вид. офіц. – [Чинний від 01.01.2004]. – Київ : Держстандарт України, 2003. – III, 27 с. – (Національний стандарт України).
8. ISO 2858:1975. End-suction centrifugal pumps (rating 16 bar) – Designation, nominal duty point and dimensions.
9. ISO 9908:1993. Technical specifications for centrifugal pumps — Class III.
10. Centrifugal pumps transporting operations of food materials within food factories / Z. Mohammedi, F. Heidari, M. Fasamanesh, A. Saghafian, F. Amini, S. M. Jafari // In Unit operations and processing equipment in the food industry. – 2023. – Pp. 155-200. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818585-8.00006-4>.
11. Jigs and fixtures in production: A systematic literature review / F. Fiedler, J. Ehrenstein, C. Höltgen, A. Blöndrath, L. Schäper, A. Göppert, R. Schmitt // Journal of Manufacturing Systems. – 2024. – № 72. – Pp. 373-405. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.01.015>.
12. Advances in design, simulation and manufacturing / V. Ivanov, Y. Rong, J. Trojanowska, J. Venus, O. Liaposhchenko, J. Zajac, et al. // Cham: Springer International Publishing. – 2019. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-23064-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23064-7_6).
13. Ivanov, V. Flexible fixtures for CNC machining centers in multiproduct manufacturing / V. Ivanov, J. Zajac // EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems. – 2018. – № 4(12). – Pp. 153552. DOI: <https://doi.org/10.4108/eai.10-1-2018.153552>.
14. Kamble, V. D. Brief review of methodologies for creation of cohesive fixture design / V. D. Kamble, A. T. Mathew // Materials Today: Proceedings. – 2020. – № 22(4). – Pp. 3353-3363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.530>.
15. Li, H. Design and application of flexible fixture / H. Li, W. Chen, S. Shi // Procedia CIRP. – 2016. – № 56. – P. 528-532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.042>.
16. Design for automation: The rapid fixture approach / R. Förstmann, J. Wagner, K. Kreisköther, A. Kampker, D. Busch // Procedia Manufacturing. – 2017. – № 11. – Pp. 633-640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.093>.
17. Do, M. D. Optimal workpiece positioning in flexible fixtures for thin-walled components / M. D. Do, Y. Son, H.-J. Choi // Computer-Aided Design. – 2018. – № 95. – Pp. 14-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2017.10.003>.
18. Пат. 149174 U Україна, МПК (2021.01) B23В 39/00. Переналаджуваний верстатний пристрій для оброблення деталей типу шатуни [Електронний ресурс] / І. М. Дегтярьов, В. О. Іванов, І. О. Косов та ін. (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. - № u202103241; заявл. 10.06.2021; опубл. 20.10.2021, бюл. № 42. – Режим доступу: [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/89543/1/149174\\_Dehtiarov.pdf](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/89543/1/149174_Dehtiarov.pdf).
19. Selected aspects of precision machining on CNC machine tools / J. Peterka, M. Kuruc, V. Kolesnyk, I. Dehtiarov, J. Moravcikova, T. Vopat, P. Pokorny, F. Jurina, V. Simna // Machines. – 2023. – № 11. – Pp. 946. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11100946>.
20. Плис, В. С. Удосконалення технологічного процесу виготовлення апарата, що направляє, НЗ2.1300.007-03 шляхом інтенсифікації оброблення каналів на вертикально-фрезерній з ЧПК операції : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра : спец. 131 - прикладна механіка / В. С. Плис; наук. кер. І. М. Дегтярьов. – Суми : Сумський державний університет, 2023. – 60 с. <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/93926>.

## References

1. Kolesnyk, V. A. (2013). Prohnozirovanie mikrorel'efa obrabotannoi rezaniem poverkhnosti voloknystykh polimernykh kompozitsionnykh materialov [Forecasting the microrelief of the machined surface of fibrous polymer composite materials]. In D. V. Kryvoruchko (Ed.), *Suchasni tekhnologii u promyslovomu vyrobnytstvi: materialy naukovo-tekhnichnoi konferentsii vykladachiv, spivrobotnykiv, aspirantiv i studentiv faktu tekhnichnykh system ta enerhoefektyvnykh tekhnologii – Modern technologies in industrial production: Proceedings of the scientific and technical conference* (Vol. 1, p. 23). SumDU.

2. Yakovenko, I.E., Permyakov, O.A., & Fesenko, A.V. (2022). *Tekhnologichni osnovy mashynobuduvannia [Technological foundations of machine engineering]*. NTU "KhPI".
3. Dobryansky, S.S., & Malafeev, Y.M. (2020). *Tekhnologichni osnovy mashynobuduvannia [Technological foundations of machine engineering]*. KPI named after Igor Sikorsky.
4. Dalgakiran Compressor Ukraine LLC. (n.d.). Zahalnopromyslovi vidtsentrovni nasosy - zamovyty v Dalgakiran [Centrifugal pumps for general use]. <https://dalgakiran.ua/uk/products/vidcentrovi-nasosy-zagalnogo-zastosuvannya>.
5. ASKO PUMPS LLC. (n.d.). Vidtsentrovani Nasosy [Centrifugal pumps]. <https://ascopumps.com.ua/ua/pumps/tsentrobezhyne.html>.
6. DSTU 3063-95. (1995). Nasosy. Klasyfikatsiia. Terminy ta vyznachennia [Pumps. Classification. Terms and definitions].
7. DSTU 4132-2002. (2002). Nasosy vidtsentrovni zahalnopromysloвого zastosuvannia. Vymohy do proektuvannia, vyhotovliannia, postachannia, montazhuvannia ta ekspluatuvannia. Zvid pravyl [Centrifugal pumps for general industrial use. Requirements for design, manufacture, supply, installation, and operation. Code of rules].
8. ISO 2858:1975. End-suction centrifugal pumps (rating 16 bar) — Designation, nominal duty point and dimensions.
9. ISO 9908:1993. Technical specifications for centrifugal pumps — Class III.
10. Mohammadi, Z., Heidari, F., Fasamanesh, M., Saghafian, A., Amini, F., & Jafari, S. M. (2023). Centrifugal pumps transporting operations of food materials within food factories. In *Unit operations and processing equipment in the food industry* (pp. 155-200). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818585-8.00006-4>.
11. Fiedler, F., Ehrenstein, J., Höltingen, C., Blondrath, A., Schäper, L., Göppert, A., & Schmitt, R. (2024). Jigs and fixtures in production: A systematic literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, 72, 373-405. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.01.015>.
12. Ivanov, V., Rong, Y., Trojanowska, J., Venus, J., Liaposhchenko, O., Zajac, J., et al. (2019). *Advances in design, simulation and manufacturing*. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-23064-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23064-7_6).
13. Ivanov, V., & Zajac, J. (2018). Flexible fixtures for CNC machining centers in multiproduct manufacturing. *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, 4(12), Article 153552. <https://doi.org/10.4108/eai.10-1-2018.153552>.
14. Kamble, V.D., & Mathew, A.T. (2020). Brief review of methodologies for creation of cohesive fixture design. *Materials Today: Proceedings*, 22(4), 3353-3363. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.530>.
15. Li, H., Chen, W., & Shi, S. (2016). Design and application of flexible fixture. *Procedia CIRP*, 56, 528-532. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.042>.
16. Förstmann, R., Wagner, J., Kreisköther, K., Kampker, A., & Busch, D. (2017). Design for automation: The rapid fixture approach. *Procedia Manufacturing*, 11, 633-640. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.093>.
17. Do, M. D., Son, Y., & Choi, H.-J. (2018). Optimal workpiece positioning in flexible fixtures for thin-walled components. *Computer-Aided Design*, 95, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2017.10.003>.
18. Dehtiarov, I.M., Ivanov, V.O., Kosov, I.O., Lobov, Y.S., Pavlenko, I.V., & Parfentsev, I.S. (2021). Perenalahodzhuvanyi verstatnyi prystrii dlia obrobлення detalei typu shatuny [Reconfigurable machining device for processing crankshaft-type parts] (Ukrainian patent No. 149174). State Intellectual Property Office of Ukraine. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=278691>.
19. Peterka, J., Kuruc, M., Kolesnyk, V., Dehtiarov, I., Moravcikova, J., Vopat, T., Pokorny, P., Jurina, F., & Simna, V. (2023). Selected aspects of precision machining on CNC machine tools. *Machines*, 11, 946. <https://doi.org/10.3390/machines111100946>.
20. Plys, V.S. (2023). Udoskonalennia tekhnologichnoho protsesu vyhotovlennia aparata, shcho napravliaie, N32.1300.007-03 shliakhom intensyfikatsii obrobлення kanaliv na vertykalno-frezernii z ChPK operatsii [Improvement of the technological process for manufacturing the directing apparatus, N32.1300.007-03 by intensifying the processing of channels on a vertical milling machine with CNC operations] [Master's thesis in specialty 131 - applied mechanics]. Sumy State University. <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/93926>.

Отримано 20.09.2024

UDC 621.9.1

**Viktor Plys<sup>1</sup>, Ivan Dehtiarov<sup>2</sup>, Anna Neshta<sup>3</sup>, Olexandr Metenko<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD student, Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University (Sumy, Ukraine)  
**E-mail:** [v.plys@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:v.plys@tmvi.sumdu.edu.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-1635-3839>

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University (Sumy, Ukraine)  
**E-mail:** [ivan\\_dehtiarov@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:ivan_dehtiarov@tmvi.sumdu.edu.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8535-987X>  
**Scopus Author ID:** [57192084069](https://orcid.org/0000-0001-8535-987X)

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University (Sumy, Ukraine)  
**E-mail:** [anna\\_neshta@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:anna_neshta@tmvi.sumdu.edu.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4072-5439>  
**Scopus Author ID:** [55884734500](https://orcid.org/0000-0003-4072-5439)

<sup>4</sup>Student of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University (Sumy, Ukraine)  
**E-mail:** [sashamet14@gmail.com](mailto:sashamet14@gmail.com)

## THE DEVELOPMENT OF THE FIXTURE DESIGN FOR GUIDING APPARATUS CHANNELS MACHINING OF CENTRIFUGAL PUMPS

*The use of modern metal cutting machines with wide technological capabilities, the active development of multi-nomenclature productions and the demands of the modern market make it necessary to increase the efficiency of mechanical processing of parts with a complex configuration and low rigidity.*

*Typical methods and approaches to the design of fixtures do not always provide the opportunity to perform machining in one setup with high-performance cutting conditions when processing thin-walled parts with a small area of fixing surfaces, so it is necessary to move to new approaches that allow to realize maximum tool availability and increase productivity as per both in the machining and in auxiliary time.*

*Analysis of the latest research and publications on the design and numerical modeling of fixtures for machining thin-walled parts with a geometrically complex profile and low stiffness showed that insufficient attention has been paid to the research of stresses and movements in the "fixture-workpiece" system, especially for parts of the type of guiding apparatus in scientific literature. More specifically, there is no information on ensuring stability and reliability of fixation in the fixture with minimal deformations and maximum instrumental accessibility.*

*The purpose of the article is to develop the design of the fixture for machining the channels of the guiding apparatus for one setup and to prove its efficiency using numerical simulation.*

*The work presents for the first time a developed fixture for milling the channels of guiding apparatus using the principle of clamping with a compression collet for the inner cylindrical surface and carried out studies of its stress-strain state in a static mode by numerical modeling methods. The determined values of stresses and displacements preliminarily showed its efficiency according to indicators of bearing capacity for loads acting during machining and obtaining the required accuracy specified by the designer.*

*The presented results of the stress-strain state and natural oscillation frequencies of the developed fixture can be used for its manufacture and further research directly during machining.*

**Keywords:** accuracy; numerical simulation; methodology; rigidity; deviation; error; resonance; stress; deformation; location.  
*Table: 1. Fig.: 10. References: 20.*



**Ігор Олексійович Цимбаленко**

аспірант кафедри прикладної гідроаеромеханіки та механотроніки

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [tsymbalenko.i@gmail.com](mailto:tsymbalenko.i@gmail.com)**ГАЛЬМІВНІ СИСТЕМИ ПРОМИСЛОВИХ НАВАНТАЖУВАЧІВ**

У статті досліджено гальмівні системи промислових навантажувачів, зокрема крани-штабелери, важливість яких полягає в забезпеченні безпеки та ефективності роботи в промислових середовищах. Розглянуто основні проблеми й вимоги до цих систем, серед яких надійність, точність і безпека. Крім цього, проаналізовано гальмівні системи провідного виробника промислових навантажувачів компанії *Jungheinrich* та різні аспекти роботи гальмівних систем і сучасні технології, які використовуються для їх поліпшення. Здійснено огляд джерел, що містять корисну інформацію про гальмівні системи промислового обладнання, щоб допомогти фахівцям у цій галузі розширити свої знання та навички.

Стаття є оглядово-інформаційною.

**Ключові слова:** гальма; гальмівна система; кран-штабелер; штабелер; навантажувач; складське обладнання; складська безпека.

Табл.: 2. Бібл.: 8.

**Актуальність теми дослідження.** У сучасному промисловому середовищі роль промислових навантажувачів важко недооцінювати, оскільки ці машини мають підвищену ефективність і надійність. Одним з основних чинників надійності є гальмівні системи, що відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки та ефективності роботи, зокрема кранів-штабелерів.

**Постановка проблеми.** Недоліки в гальмівних системах призводять до серйозних наслідків для персоналу виробництва й майна. Своєчасне виявлення та вирішення проблем із гальмівними системами необхідно для запобігання аваріям і пошкодженням обладнання. Основними проблемами з гальмівними системами промислових навантажувачів є зношування гальмівних деталей, втрата тиску в гальмівній системі, витік гальмівної рідини або неправильне налаштування гальм. Проблеми з гальмівною системою призводять до небезпечних ситуацій, для уникнення яких необхідно вживати невідкладних заходів для перевірки й обслуговування гальмівних систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблеми гальмівних систем досліджувалися багатьма науковцями та інженерами, зокрема в галузях матеріалознавства, механіки та автомобільної інженерії. Дослідження цих проблем включає аналіз зношування, теплових характеристик, коефіцієнта тертя, шуму та вібрації. Деякі науковці, що здійснювали дослідження гальмівних колодок: Prof. Dr. Medeni Masjuki і його команда з *Universiti Malaya* (Малайзія) провели дослідження щодо впливу різних матеріалів на продуктивність гальмівних колодок, у тому числі їхня зносостійкість та вплив на довкілля; Prof. Dr. J. Tichý і Prof. Dr. M. Černý з Технічного університету в Ліберці (Чехія) досліджували аспекти термонавантажень гальмівних колодок і їх вплив на ефективність гальмування та довговічність; Prof. Dr. J. W. Newcomb та Prof. Dr. S. J. Kim з *University of Michigan* (США) зосереджували увагу на шумі та вібрації, що виникають під час гальмування, та їх зв'язок із матеріалом гальмівних колодок; інші команди науковців з усього світу досліджували питання гальмівних систем, матеріалів та технологій, що використовуються в гальмівних колодках, приділяючи особливу увагу питанням екології та ефективності.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми** гальмівних систем включає кілька ключових аспектів, що впливають на безпеку експлуатації промислових навантажувачів, а саме: стала гарантія безпеки роботи гальмівних систем промислових навантажувачів, зокрема кранів-штабелерів, під час використання новітніх технологій, застосування нетрадиційних матеріалів (композитних матеріалів, наноматеріалів та матеріалів

на основі біополімерів), що використовуються в елементах гальмівних систем. Багато досліджень уже було проведено щодо традиційних матеріалів, що використовуються в гальмівних системах, а реакції та вплив новітніх матеріалів усе ще перебуває в дослідницькому пошуку. Їхній вплив на безпеку роботи навантажувачів та пошук новітніх характеристик, що залишаються в процесі дослідження, потребує подальшого розгляду. З метою дотримання встановлених стандартів безпеки та подальшого використання новітніх матеріалів виникає необхідність у розробці більш ефективних методів випробувань, а саме: є потреба в розробці нових методів і технологій для тестування гальмівних систем, які могли б більш точно моделювати реальні умови експлуатації та довготривалі ефекти використання, зокрема в підвищених режимах випробувань. Ці напрями можуть стати основою для майбутніх досліджень і вдосконалення гальмівних систем у контексті їхньої надійності, ефективності та екологічної безпеки.

**Метою статті** є підвищення обізнаності щодо необхідного рівня безпеки в роботі з промисловими навантажувачами за допомогою вивчення основних проблем і способів їх уникнення (на прикладі кранів-штабелерів). Підвищення обізнаності з питань безпеки – це підвищення рівня ефективності складських приміщень. Під час дослідження використовувалися такі методи, як аналіз, синтез та спостереження.

**Виклад основного матеріалу.** Гальмівні системи кранів-штабелерів відіграють одну з провідних ролей у забезпеченні безпеки та ефективності роботи в промислових умовах. Гальмівні системи є гарантією уникнення аварійних ситуацій на завантаженому складі та забезпечують безпеку операторів і продуктивність роботи кранів-штабелерів у промисловому середовищі [2]. У статті наведено основні аспекти гальмівних систем кранів-штабелерів, включно з принципами роботи, типовими проблемами, методами обслуговування та важливістю правильного функціонування для безпеки й продуктивності.

До гальмівних систем кранів-штабелерів висуваються високі вимоги стандартів безпеки та ефективності. Гальмівні системи можуть бути оснащені різноманітними технологіями, наприклад, гідравлічними або електричними системами, що дозволяють забезпечити швидке й безпечне гальмування машин із вантажами у складських умовах. Оператори та виробники кранів-штабелерів в Україні приділяють велику увагу стандартам безпеки, зокрема профілактичному обслуговуванню гальмівних систем, щоб уникнути можливих несправностей і забезпечити надійну роботу складних та коштовних складських машин. Загалом гальмівні системи кранів-штабелерів в Україні відповідають сучасним європейським вимогам безпеки, які необхідні для продуктивної роботи в промислових умовах.

Стандарти безпеки та ефективності гальмівних систем кранів-штабелерів визначаються різними нормативними документами й рекомендаціями, які встановлюють вимоги до проектування, виробництва, експлуатації та обслуговування цих систем. Ось деякі з найбільш поширених стандартів: EN 1493:2001 – визначає загальні вимоги до безпеки та ефективності гідравлічних підйомників, включно з кранами-штабелерами; ISO 3691-1:2020 – встановлює загальні вимоги та методи випробувань для безпеки кранів-штабелерів, включно з гальмівними системами; OSHA 1910.178 – стандартні вимоги до безпеки кранів-штабелерів, які встановлюються Адміністрацією з охорони праці США; CE Marking – у ЄС гальмівні системи кранів-штабелерів повинні відповідати вимогам директиви 2006/42/EC та мати позначку CE, що підтверджує їх відповідність європейським стандартам безпеки. Ці стандарти встановлюють важливі вимоги до безпеки та ефективності гальмівних систем, що допомагають забезпечити надійну роботу кранів-штабелерів та запобігти аваріям [6].



Наприклад, якщо вантажопідіймальний кран або машина працюють на відкритому незахищеному від вітру місці, важливо встановити обов'язкові гальма на механізмах пересування кранів та машин, а також на їхніх вантажних візках.

Гальма механізмів пересування і повороту повинні забезпечувати надійну зупинку та утримування крана або машини, а також їхнього вантажного візка під впливом вітру під час робочого процесу. Швидкість пересування крана або машини повинна відповідати встановленим в інструкції нормам, а також урахувати допустимий нахил [1].

Ці заходи забезпечують безпеку робочого процесу й уникнення ризиків у разі роботи з вантажопідіймальними кранами та машинами на відкритому місці.

Основними проблемами гальмівних систем є:

1. Зношені гальмівні деталі: під час тривалої експлуатації гальмівні колодки, диски та інші компоненти можуть зношуватись, що призводить до зниження ефективності гальмування та збільшення часу зупинки.

2. Витік гальмівної рідини: витік або втрата гальмівної рідини може призвести до втрати тиску в гальмівній системі, що ускладнює гальмування та підвищує ризик аварій.

3. Пошкоджені гідравлічні лінії: пошкодження гідравлічних ліній може призвести до витіку рідини та втрати тиску, що впливає на ефективність гальмування.

4. Перегрів гальмівних систем: використання гальм в інтенсивному режимі або під час вантажних операцій може призвести до перегріву гальмівних систем, що може призвести до втрати їхньої ефективності.

Ці аспекти потребують ретельного контролю з боку персоналу промислових об'єктів, а саме: регулярного огляду, обслуговування і вчасних ремонтних робіт для забезпечення безпеки та ефективності роботи промислових навантажувачів, зокрема і кранів-штабелерів. Так, наприклад, при помітному збільшенні жорсткості гальмівної педалі необхідно аналізувати можливі дефекти підсилювача залежно від його типу:

– у вакуумного підсилювача може статися витік у впускній камері, пошкодження вакуумної трубки або самого підсилювача та його клапана;

– у гідравлічного підсилювача може відбуватися стирання приводного ремня, недостатній рівень рідини або її протікання у пристрої;

– іноді може перестати працювати сам гідропідсилювач.

Цей перелік не є вичерпним, проте він дає змогу водію оцінити серйозність ламання та своєчасно звернутися за допомогою [4].

Для уникнення проблем гальмівних систем кранів-штабелерів необхідно враховувати такі розрахунки:

1. Розрахунок тиску в гальмівній системі: підрахунок необхідного тиску в гальмівній системі для ефективного гальмування залежно від ваги та швидкості руху крана-штабелера.

2. Оцінювання зношування гальмівних деталей: розрахунок середнього часу служби гальмівних деталей на основі інтенсивності експлуатації та параметрів робочого середовища.

3. Визначення ефективності гальмування: розрахунок відношення відстані гальмування до швидкості руху крана-штабелера для оцінювання ефективності гальмівної системи.

4. Визначення впливу зношування на безпеку: підрахунок впливу зношування гальмівних деталей на відстань гальмування та час реакції оператора для оцінювання ризику небезпеки.

5. Оцінювання витрат на обслуговування: розрахунок витрат на запасні частини й ремонт гальмівної системи на основі прогнозованої тривалості служби та частоти обслуговування.

Розглянемо конкретний приклад розрахунку тиску в гальмівній системі:

Припустимо, що маємо гальмо з поршнем площею  $A = 50 \text{ см}^2$ , на яке діє сила  $F = 2000 \text{ Н}$ . Щоб розрахувати тиск у гальмівній системі, використовуємо формулу:

$$P = F / A.$$

Так, тиск у гальмівній системі становить 400 000 Па, або 400 кПа.

Зробивши розрахунок тиску в гальмівній системі крана-штабелера, ми бачимо, що отриманий тиск становить 400 кПа. Це висока величина тиску, що вказує на ефективність гальмування та здатність системи швидко зупинити машину або обладнання під час переміщення вантажів. Високий тиск у гальмівній системі також може свідчити про добре збалансовану роботу системи та належне функціонування гідравлічних компонентів.

Таблиця 1 містить орієнтовний перелік несправностей, можливі причини цих несправностей, а також варіанти їх усунення в автомобілях, які також притаманні й діагностиці гальмівних систем промислових навантажувачів.

Таблиця 1 – Причини та наслідки несправностей, а також способи усунення поломки [4]

Несправності	Можлива причина	Варіанти усунення поломки
Зниження рівня гальмівної рідини (далі – ГР)	1. Зношеність гальмівних колодок.	1. Замінити зношені елементи.
	2. Витік ГР з системи.	2. Перевірити, чи немає на елементах системи характерних слідів рідини.
Низька педаль гальма	1. Заклинює систему авторегулювання барабанних гальм, яка розводить колодки з урахуванням їх зношування.	1. Відрегулювати систему. Це тимчасово відновить рух педалі, однак якщо колодки будуть і далі зношуватися, проблема повернеться. Необхідно її почистити або замінити.
	2. Стирання колодок.	2. Замінити колодки.
	3. Витік ГР.	3. Заповнити нестачу рідини.
Занадто м'яка гальмівна педаль	1. Попадання повітря в систему.	1. Прокачати гальма, щоб усунути повітря.
	2. Ламання головного гальмівного циліндра (далі – ГГЦ)	2. Відремонтувати ГГЦ.
	3. Закипання рідини внаслідок підвищення температури робочого циліндра.	3. Замінити ГР.
Великий хід педалі гальма	1. Зношування гальмівних колодок.	1. Замінити колодки.
	2. Бульбашки повітря в системі.	2. Видалити повітря з системи.
Провал педалі гальма	1. Зношування одного з гальмівних циліндрів.	Замінити всі гумові ущільнювачі і ГР, а потім прокачати систему, щоб видалити з неї повітря.
	2. Розгерметизація гідросистеми.	
	3. Низька якість ГР.	
Скрегіт при натисненні педалі	Тертя зношеної колодки об гальмівний диск.	Замінити колодки і розточити робочі поверхні диска.
Нерівномірне або малоефективне гальмування	1. Протікання мастила або ГР на робочу поверхню колодки.	1. Усунути протікання і встановити нові колодки.
	2. Механічні пошкодження на верхніх дисках або барабанів.	2. Розточити або замінити диски.

Вплив зношування гальмівних деталей на безпеку промислового навантажувача, зокрема крана-штабелера, може серйозно впливати на здатність машини до ефективного гальмування. Ось декілька причин:

1. Збільшення відстані гальмування: при зношуванні гальмівних деталей відстань, яка необхідна для зупинки крана-штабелера, може збільшитися, що ускладнює вчасне реагування на небезпечні ситуації.

2. Погіршення ефективності гальмування: зношування гальмівних деталей знижує ефективність гальмування, що може призвести до того, що гальмівна система не зможе зупинити кран-штабелер відповідно до потрібного стандарту безпеки.

3. Ризик виникнення аварійних ситуацій: зношування гальмівних деталей призводить до недостатнього рівня гальмування та збільшення ризику виникнення таких аварійних ситуацій, як зіткнення з іншими об'єктами або падіння вантажу.

4. Зниження контролю за рухом машини: зношування гальмівних деталей призводить до погіршення контролю за рухом крана-штабелера, що може збільшити ризик виникнення зіткнень та руйнувань.

Отже, важливим етапом експлуатації кранів-штабелерів є регулярна перевірка стану гальмівних деталей та вчасна заміна для забезпечення безпеки робочого процесу.

Визначення ефективності гальмування має велике значення. Наприклад, оператор крана-штабелера активує гальма, коли транспортний засіб рухається зі швидкістю 5 м/с. Після активації гальм кран-штабелер зупиняється за 3 секунди. У цей час пристрій проходить відстань 10 метрів до повної зупинки.

Тепер ми можемо обчислити ефективність гальмування за допомогою виміряного часу та відстані:

Час зупинки: 3 с.

Відстань гальмування: 10 м.

Ефективність гальмування можна розрахувати, поділивши відстань гальмування на квадрат часу.

Ефективність гальмування = Відстань гальмування / (Час зупинки)<sup>2</sup>.

Ефективність гальмування  $\approx 1,11$  м/с<sup>2</sup>

Так, ефективність гальмування цього крана-штабелера становить приблизно 1,11 м/с<sup>2</sup>. Чим більше це значення, тим швидше пристрій може зупинитися, що важливо для забезпечення безпеки та ефективності роботи в промислових умовах. Тобто вимір ефективності гальмування крана-штабелера дозволяє фіксувати, наскільки швидко та ефективно гальмують пристрої під час роботи. Дані вимірів можуть бути корисними для оцінювання стану гальмівної системи, планування обслуговування та вдосконалення робочих процесів.

Оцінювання витрат на обслуговування гальмівних систем кранів-штабелерів може включати такі аспекти, як вартість запасних частин, робочої сили, регулярних технічних оглядів та вартість аварійних і ймовірних ремонтів.

Вартість запасних частин визначається витратами на покупку й заміну таких гальмівних деталей, як колодки, диски, шланги та інші компоненти в плановому порядку, а також витратами для вирішення форс-мажорних обставин.

Вартість робочої сили передбачає витрати на оплату праці технічного персоналу, який здійснює монтаж, регулювання та заміну гальмівних компонентів.

Також необхідно враховувати можливість несправності обладнання, що потребує витрат на непланові ремонти або витрати на технічну підтримку в разі аварій і відмови гальмівних систем. Отже, оцінювання витрат на обслуговування допоможе забезпечити ефективну експлуатацію гальмівних систем кранів-штабелерів і забезпечити їхню надійність та безпеку.

На сьогодні ми можемо спостерігати постійний розвиток технологій у галузі гальмування кранів-штабелерів. Деякі сучасні моделі кранів-штабелерів використовують електричні гальма замість традиційних гідравлічних систем. Це дозволяє точно керувати гальмуванням і зменшує зношування, що може відбуватися в гідравлічних системах. Багато сучасних моделей кранів-штабелерів оснащені системами регенеративного гальмування, які використовують енергію, що виникає під час гальмування, для зарядження акумуляторів. Це дозволяє економити енергію та збільшувати час автономної роботи пристрою. Також досить часто використовують магнітні гальма, які включаються за допомогою магнітного поля. Це може бути особливо корисно в умовах великих навантажень або вимогливих додаткових умов.

Варто зазначити, що є велика кількість сучасних кранів-штабелерів, які оснащені системами автоматичного гальмування, що активуються при виявленні перешкод або непередбачуваних ситуацій у робочій зоні. Це допомагає запобігти аваріям і забезпечити безпеку оператора та навколишніх.

Одна з концепцій розвитку гальмових систем – вбудовування засобів автоматизації в готові системи, що дозволяє скоротити витрати на впровадження автоматичних систем [2].

Гарним прикладом високотехнологічних рішень у сфері гальмівних систем є навантажувальне обладнання виробництва компанії Jungheinrich (Німеччина). Jungheinrich впроваджує провідні тенденції розвитку світових індустрій та спеціалізується на пошуку й розробці більш екологічних рішень у галузі електронавантажувачів. Компанія понад 20 років тому першою запровадила технології використання електродвигунів змінного струму для навантажувачів, що мають здатність до рекуперації енергії. Крім регенеративної системи також є гідравлічна система екстреного гальмування. Усі рішення такого типу супроводжуються обладнанням машин накопичувачами енергії – акумуляторними батареями.

Серед типів навантажувальної техніки, що має найбільше поширення, можна виокремити такі:

1. Електричні навантажувачі типів Jungheinrich EFG – гальмівна рекупераційна система на двигунах змінного струму [9].
2. Автоматичні електричні вертикальні комісionери EKS – гальмівна рекупераційна система на двигунах змінного струму [10].
3. Автоматичні стелажні крани-штабелери типу STS – гальмівна рекупераційна система на двигунах змінного струму із накопичувачами SuperCaps [11].

Варто зазначити, що Jungheinrich має зразки провідних розробок не лише в навантажувачах електричного типу. Так, наприклад, ефективно працюють дизельні навантажувачі з багатодисковим гальмівним вузлом [12]:

Безумовною перевагою обох систем є повністю герметична капсульована конструкція, яка не потребує ніякого обслуговування протягом усього терміну експлуатації. Така конструкція є ефективною з погляду безпеки та економічності обслуговування, але є кошовною і технологічно складною для виробництва та діагностики в разі виявлення проблем.

Рівень безпеки кранів-штабелерів Jungheinrich відповідає вимогам не лише національної системи безпеки, а також відповідає міжнародним стандартам: ISO 2328:2007, ISO 2330, ISO 3691-3, ISO 3795:1989, ISO 5053, ISO 6292:2008, ISO 13284:2003, ISO 13564-1, ISO 15870:2000, ISO 15871:2000, ISO 20898:2008, ISO 21281:2005, ISO 22915-1:2008, ISO 22915-2:2008, ISO 22915-3:2008, ISO 22915-4:2009, ISO 22915-7:2009, ISO 24134:2006, ISO 24135-1:2006, на які є посилання в національних стандартах, але які не застосовуються в Україні як обов'язкові.

Законодавство передбачає нормативні вимоги, пов'язані з обов'язковим обслуговуванням та перевіркою гальмівних систем кранів-штабелерів, а саме:

1. Стандарти безпеки: опис найважливіших стандартів безпеки, які регулюють використання та обслуговування гальмівних систем кранів-штабелерів; це міжнародні стандарти, наприклад, ISO 3691 (щодо безпеки й підвищення продуктивності штабелерів), а також місцеві правила та нормативні вимоги.
2. Частота обслуговування: рекомендації щодо регулярності обслуговування та перевірки гальмівних систем відповідно до встановлених строків. Наприклад, зазначення, що гальмівні системи повинні перевірятися та налаштовуватися щорічно або за певними кількісними / часовими інтервалами експлуатації.
3. Процедури обслуговування: опис процедур, які повинні виконуватися під час обслуговування гальмівних систем, включно з перевіркою стану гальмівних деталей, налаштуванням, заміною зношених елементів та технічним обслуговуванням.

4. Документація та звітність: зазначення необхідності ведення документації щодо обслуговування гальмівних систем, а також звітів про виконані роботи. Вказівка на обов'язковість зберігання цієї документації та готовність до перевірок з боку відповідних органів.

5. Відповідальність та штрафи: огляд правових наслідків порушення вимог щодо обслуговування гальмівних систем, включно з можливими штрафами й адміністративними санкціями для підприємств та операторів обладнання [7].

Варто зауважити, що важливе значення має періодичне обслуговування гальмівних систем кранів-штабелерів, що допомагає покращити основні вимоги до них:

- безпека: гальмівна система є критично важливим компонентом для безпеки робочого середовища; перевірка та підтримка гальм допомагає запобігти аваріям і травмам операторів та інших працівників;

- ефективність роботи: гальмівна система допомагає контролювати рух обладнання та забезпечує точність маневрування та зупинки; її належний стан підтримує ефективну й продуктивну роботу штабелерів;

- продовження терміну служби обладнання: регулярне обслуговування гальмівних систем сприяє підтримці робочого стану компонентів, що зменшує ризик виникнення серйозного ламання та підвищує загальний строк служби обладнання;

- відповідність законодавству та нормам безпеки: багато країн мають законодавчі вимоги, які стосуються обслуговування та безпеки обладнання на робочих місцях; періодичне обслуговування гальмівних систем допомагає підтримувати відповідність цим нормам;

- зниження витрат на ремонт: регулярне обслуговування дає змогу виявляти та усувати потенційні проблеми гальмівних систем на ранніх стадіях, що дозволяє уникнути дорогих ремонтних витрат у майбутньому [8].

*Таблиця 2 – Графік періодичного обслуговування гальмівних систем промислових навантажувачів на прикладі компанії Jungheinrich*

Тип обслуговування	Часовий інтервал	Кількісний інтервал
Перевірка гальмового стану	Раз на рік	Кожні 1000 годин роботи або кожні 12 місяців
Перевірка тиску гідравлічної системи	Раз на рік	Кожні 1000 годин роботи або кожні 12 місяців
Перевірка налаштування гальм	Кожні 6 місяців	Кожні 500 годин роботи або кожні 6 місяців
Заміна зношених гальмівних деталей	За потреби	Заміна за потребою або після досягнення мінімальної товщини або допустимого рівня зношеності

Джерело: розроблено автором.

Новітні технології в галузі гальмівних систем кранів-штабелерів розвиваються дуже стрімко.

Електронні системи контролю стабільності (ESC) використовуються для контролю над пошкодженням шин на дорозі. Вони можуть бути застосовані в гальмівних системах промислових навантажувачів для автоматичного регулювання тиску гальм для запобігання занадто сильному гальмуванню або ковзанню.

Системи регенерації енергії забезпечують перетворення кінетичної енергії, що виникає під час гальмування, у електричну енергію, яка може бути використана для живлення інших систем або збережена в батареях для подальшого використання. Автоматизовані системи навігації та керування використовуються для автоматизації процесу маневрування та регулювання швидкості руху промислових навантажувачів з урахуванням різних умов експлуатації та навантаження.

Антиблокувальна система гальм (ABS) допомагає уникнути блокування коліс під час гальмування, що покращує контроль і стабільність руху промислових навантажувачів, зокрема кранів-штабелерів на будь-яких поверхнях [2].

Останнім часом велика увага приділяється також мехатронним системам. Ці системи поєднують механічні й електронні компоненти для оптимізації роботи гальмівних систем, забезпечуючи вищу точність та ефективність гальмування [3].

Гальмівні системи промислових навантажувачів відіграють важливу роль у забезпеченні безпеки та ефективності роботи. Ці системи призначені для забезпечення точного та швидкого зупинення обладнання під час різних робочих процесів. Вони можуть використовувати такі технології, як гідравліка, пневматика або електроніка, залежно від типу обладнання і його функціональних потреб. Гальмівні системи промислового обладнання повинні відповідати високим стандартам безпеки та надійності, щоб уникнути аварійних ситуацій і зберегти інфраструктуру та персонал у безпеці [5]. Гальмівні системи кранів-штабелерів мають забезпечувати швидке та точне зупинення машини, а також уникнення таких небезпечних ситуацій, як зіткнення з іншими об'єктами або перевищення швидкості руху. Це є критично важливим для забезпечення безпеки персоналу та власності, а також для підтримання ефективності роботи в складських умовах.

**Висновок.** У статті наведені приклади різноманітних систем гальмування у промислових навантажувачах. На прикладі кранів-штабелерів розглянута важливість гальмівної системи й періодичного обслуговування гальмівних систем кранів-штабелерів, що є необхідною та важливою вимогою для роботи промислових об'єктів. Гальмівна система відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки та ефективності роботи обладнання на складі. Правильне обслуговування гальмівних систем допомагає запобігти аваріям, зменшити витрати на ремонт, продовжити термін служби обладнання та відповідати вимогам законодавства з питань безпеки на робочому місці.

Отже, розвиток таких новітніх технологій у гальмівних системах, як мехатронні системи та системи автоматичного регулювання, свідчить про постійні зусилля удосконалення безпеки й продуктивності роботи обладнання. Як приклад успішного й екологічного розвитку таких систем розглянуто діяльність міжнародного лідера компанії Jungheinrich. Увагу акцентовано на стандартах безпеки для промислових навантажувачів і сучасних технологіях, які впроваджуються для підвищення надійності, точності та швидкості реакції гальмівних систем, що робить їх ще більш ефективними в умовах сучасного виробництва. Так, підтримка та своєчасне обслуговування гальмівних систем є важливою складовою успішного й безпечного функціонування кранів-штабелерів.

#### Список використаних джерел

1. Про затвердження Правил охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання [Електронний ресурс] : Наказ Міністерства соціальної політики України від 19.01.2018 р. № 62. – Режим доступу: [https://zakononline.com.ua/documents/show/375195\\_\\_375260](https://zakononline.com.ua/documents/show/375195__375260).
2. Дудкін, Б. В. Аналіз систем автоматизації гальмівних систем / Б. В. Дудкін, Ю. А. Ткаченко // Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищ. освіти і молодих вчених, [Харків], 22 листопада 2023 р. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків, 2023. – С. 46–49.
3. Avtofishki. Несправність гальмівної системи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://avtofishki.com.ua/ua/articles/neispravnost-tormoznoj-sistemy>.
4. Eaton Corporation. Industrial Hydraulics Manual. Your Comprehensive Guide to Industrial Hydraulics / Eaton Corporation. – 6th edition. – Dublin : Eaton Corporation Industrial Sector-Hydraulics Group, 2015. – 640 p.
5. Swartz, G. Forklift Safety: A Practical Guide to Preventing Powered Industrial Truck Incidents and Injuries / G. Swartz. – 2nd edition. – Lanham : Government Institutes, 1999. – 327 p.

6. Materials Handling Handbook / ed. by A. Kulweic. 2nd edition. – USA : Wiley-Interscience, 1991. – 1488 p.
7. Jungheinrich. Електричні трьохопорні навантажувачі 1,3–2,0 т [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://is.gd/1R7g6g>.
8. Jungheinrich. Автоматичний вертикальний комісіонер 1,5 т [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://is.gd/0EwEsN>.
9. Jungheinrich. Автоматичний стелажний штабелер [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://is.gd/p1AJdz>.
10. Jungheinrich. Дизельні вилкові навантажувачі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://is.gd/zUpFi7>.

### References

1. Pro zatverdzhennia Pravyl okhorony pratsi pid chas ekspluatatsii vantazhopidiimalnykh kraniv, pidiimalnykh prystroiv i vidpovidnoho obladnannia [On the approval of the Rules of labor protection during the operation of load-lifting cranes, lifting devices and corresponding equipment], Order of Ukraine dated January 19, 2018 № 62. [https://zakono.nline.com.ua/documents/show/375195\\_\\_375260](https://zakono.nline.com.ua/documents/show/375195__375260).
2. Dudkin, B.V., Tkachenko, Yu.A. (2023). Analiz system avtomatyzatsii halmivnykh system [Analysis of automation systems of braking systems]. *Kompiuterno-intehrovani tekhnologii avtomatyzatsii tekhnologichnykh protsesiv na transporti ta u vyrobnytstvi: materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii здобувачів вищої освіти і молодих вчених – Computer-integrated technologies for automation of technological processes in transport and production: materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference of higher education graduates and young scientists* (pp. 46–49).
3. Avtofishki. Nespravnist halmivnoi systemy [Malfunction of the braking system]. <https://avtofishki.com.ua/ua/articles/neispravnost-tormoznoj-sistemy>.
4. Eaton Corporation. (2015). *Industrial Hydraulics Manual. Your Comprehensive Guide to Industrial Hydraulics*. Eaton Corporation Industrial Sector-Hydraulics Group.
5. Swartz, G. (1999). *Forklift Safety: A Practical Guide to Preventing Powered Industrial Truck Incidents and Injuries*. Government Institutes.
6. Ed. by Kulweic, A. (1991). *Materials Handling Handbook*. Wiley-Interscience.
7. Jungheinrich. Elektrychni trokhoporni navantazhuvachi 1,3–2,0 t [Electric three-support loaders 1,3–2,0 t]. <https://is.gd/1R7g6g>.
8. Jungheinrich. Avtomatychnyi vertykalnyi komisioner 1,5 t [Automatic vertical commission agent 1,5 t]. <https://is.gd/0EwEsN>.
9. Jungheinrich. Avtomatychnyi stelazhnyi shtabeler [Automatic rack stacker]. <https://is.gd/p1AJdz>.
10. Jungheinrich. Dyzelni vylkovi navantazhuvachi [Diesel forklifts]. <https://is.gd/zUpFi7>.

Отримано 01.09.2024

UDS 531.1

### **Igor Tsymbalenko**

PhD student, Department of Applied Hydroaeromechanics and Mechanotronics  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [tsymbalenko.i@gmail.com](mailto:tsymbalenko.i@gmail.com)

### **BRAKE SYSTEMS FOR INDUSTRIAL FORKLIFTS**

*The article is devoted to the consideration of braking systems of industrial forklifts, on the example of stacker cranes, in terms of identifying problems, finding effective ways to solve them, identifying ways to improve operational safety, indicating the most important areas of potential optimization and, as a result, improving the economic component of further use.*

*In general, the author's consideration is based on the idea of an integrated approach to the problem and aims to raise awareness of the required level of safety in the operation of industrial forklifts, using the example of stacker cranes as an example, by considering the main problems and ways to avoid them. Attention is drawn to the statutory safety standards for industrial forklifts. Raising awareness of the problems of industrial forklift braking systems is an increase in safety, as well as an increase in the level of efficiency of warehouses. The study used methods such as analysis, synthesis and observation.*

---

**TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES**

---

*The analysis of research and publications on the subject demonstrates the lack of disclosure of the problem of safety of industrial facilities, in particular due to the quality of preparation and operation of brake systems of industrial forklifts.*

*Creating a general picture of the current situation in accordance with the topic of the article is done by displaying such components as the fundamental structure of brake systems, with certain specifics by type of equipment, general principles and mechanisms of operation and typical shortcomings in operation. For informative completeness, the subject of further maintenance is also considered, not only the direct operation.*

*First of all, through the analysis of the problems present on the existing industrial equipment, the most important aspects that have a direct impact on improving both safety and efficiency in a broad sense are noted. Consistently, among the identified aspects, the most appropriate ones are identified that can be optimized and improved. The analysis of safety enhancement technologies is based on a combination of not only safety aspects, but also the identification of complex solutions that combine several components.*

**Key words:** *brakes; braking system; stacker crane; stacker; forklift; warehouse equipment; warehouse safety.*

*Table: 2. References: 8.*



**Ірина Володимирівна Чолак<sup>1</sup>, Антон Янович Карвацький<sup>2</sup>**<sup>1</sup>аспірантка, Національний технічний університет України

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

E-mail: [irena\\_om@ukr.net](mailto:irena_om@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4543-4761>

Scopus Author ID: 58601169500

<sup>2</sup>доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування

Національний технічний університет України

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

E-mail: [anton@rst.kpi.ua](mailto:anton@rst.kpi.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2421-4700>ResearcherID: [I-7822-2017](https://orcid.org/0000-0003-2421-4700), Scopus Author ID: 6506101039**ПРОГНОЗУВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАНОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ПОЛІЕТИЛЕНУ МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ДИНАМІКИ**

Виконано дослідження фізико-механічних властивостей наноккомпозитів поліетилен-графен залежно від температури та об'ємної частки наповнювача з використанням методів молекулярної динаміки. Для оперативного прогнозування поведінки матеріалів отримано двопараметричні залежності фізико-механічних властивостей у діапазоні температур (280–320) К та об'ємної частки графену (0–1,5) %. Одержані дані дадуть змогу виконувати моделювання термо-пружно-пластичного стану виробів в умовах експлуатації в континуальному наближенні.

**Ключові слова:** фізико-механічні властивості; полімерний композиційний матеріал; графен; моделювання; двопараметричні залежності.

Табл.: 2. Рис.: 8. Бібл.: 14.

**Актуальність теми дослідження.** Попит на розробку нових полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) призводить до необхідності визначення їхніх фізичних властивостей, адже полімери та їхні композити демонструють властивості, що сприяють їх використанню в різних галузях науки й техніки. Дослідження процесів та явищ у полімерних матеріалах на атомному рівні є джерелом важливої інформації про їхню поведінку на макrorівні. Використання сучасних обчислювальних ресурсів сприяє розумінню динамічних процесів у матеріалах часто значно краще, ніж класичні експериментальні методи, у тому числі й дослідження властивостей наноккомпозиційних матеріалів.

**Постановка проблеми.** Дослідження ПКМ армованих алотропами вуглецю, зокрема графеном (GR) [1], останнім часом привернуло значну увагу, а використання альтернативних підходів, таких як методи молекулярної динаміки (МД) для теоретичних досліджень фізичних властивостей на етапі їх розробки розширює можливості аналізу поведінки дослідних зразків незалежно від їхнього композиційного складу та розміщення наповнювача в полімерній матриці, що потрібно для подальших континуальних розрахунків.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [1] використано моделювання МД для дослідження механічних властивостей полімерів, армованих графеном та оксидом графену. Результати моделювання показали, що додавання наповнювачів значно покращило міцність на розрив та модуль пружності полімерних матриць порівняно з неармованими полімерами. Також композит з одним листом оксиду графену має більш високу міцність на розрив, ніж той зразок, що містить кілька листів через утворення агломератного зв'язку та дисперсії. Загалом, моделі молекулярної динаміки дали цінну інформацію про те, як мікроструктура впливає на механіку вказаних наноккомпозитів, пропонуючи рекомендації щодо розробки високоефективних полімерних матеріалів за допомогою раціональної будови та обробки наноплівки.

Стаття [2] присвячена дослідженню механізму деформації графенових листів у поліетиленовій матриці з масовою часткою графену 5 %. Визначено, що найбільше збільшення міцності та жорсткості спостерігається при випадковій орієнтації листів графену в матриці та при сильній міжатомній взаємодії графен-графен, що важлива в процесах пружної та пластичної деформації.

У статті [3] описані детальні атомістичні моделі декількох нанокompозитних систем на основі графену та поліетилену. Системи з графеновими листами різного розміру були модельовані при одній концентрації графену (~3 %). Крім того, було вивчено періодичний графеновий шар ("нескінченний лист"). Моделювання проводилося шляхом дотримання стратегії ієрархічного моделювання, що складається з генерації початкової структури, приведення в рівновагу гібридної системи, виконання моделювання МД тривалістю до 100 нс та детального аналізу атомістичних конфігурацій після врівноваження. Також у роботі представлено аналіз характеристик графенових листів з погляду конформаційних властивостей і мобільності.

Дослідження [3] показують, що чим менший графеновий аркуш, тим вище його рухливість. Однак, досить довгий аномальний режим дифузії спостерігався для всіх систем, тобто для визначення чіткого лінійного режиму недостатньо поточного часового вікна моделювання. Амплітуда коливань листів безпосередньо залежить від їхніх розмірів.

У роботі [4] вивчався вплив концентрації GR та його агломерацій на еластичні константи для композитів целюлоза-GR. Для МД моделювання використано полімерне послідовне силове поле (Polymer consistent force field (PCFF)). Система нанокompозитів целюлоза-GR перебувала під впливом ансамблю NVT (постійна кількість атомів, об'єму та температури) та NPT (постійна кількість атомів, тиску та температури) ансамблів із рівномірною деформацією під час МД моделювання. Результати показують значне поліпшення модуля Юнга для нанокompозитів целюлоза-GR порівняно з целюлозою. Результати МД моделювання добре узгоджуються з моделлю на основі мікромеханіки та наявними експериментальними даними.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Наразі недостатньо досліджено вплив нефункціалізованих нанонаповнювачів з їхнім довільним розміщенням у матриці на комплекс фізико-механічних властивостей ПКМ. Відсутні функціональні двопараметричні залежності фізико-механічних властивостей PE-GR від об'ємної частки наповнювача та температури.

**Метою статті** є визначення фізико-механічних властивостей нанокompозитів PE-GR залежно від температури та об'ємної частки наповнювача та побудова залежностей, що потрібно для прогнозування поведінки нанокompозитів шляхом моделювання термопружного стану виробів із цих матеріалів у континуальному наближенні.

**Виклад основного матеріалу.** Для дослідження фізико-механічних властивостей PE-pure і нанокompозиту PE-GR (без функціалізації GR) МД методами використано модель об'єданого атома (united atom (UA)) і силове поле Dreiding [4–8]. Для створення початкових молекулярних систем зразків PE-pure і нанокompозиту PE-GR, як і в [7; 8], використано програмне забезпечення Polymer Builder CHARMM-GUI [9] і Packmol [10]. Матриці початкових молекулярних систем PE-pure і PE-GR включали по 10 ланцюгів із 1000 мономерів  $[-C_2H_4-]$ . У вказаних моделях молекулярних систем використано нефункціалізовані листи графену з довільним розміщенням у матриці, взаємодія яких із молекулами матриці відбувається лише завдяки силі van der Waals [8]. Врівноваження початкових конфігурацій молекулярних систем PE-pure і нанокompозитів PE-GR за різних температур проведено за алгоритмом [11] з використанням вільно відкритого програмного коду LAMMPS [12]. Урівноважені молекулярні конфігурації PE-pure і нанокompозитів PE-GR з різною часткою наповнювача ( $\alpha$ ) за температури 300 K наведено на рис. 1.

При визначенні об'ємної частки GR в PE-GR товщина графенового листа приймалася рівною  $1,8 \text{ \AA}$  [13].

МД моделювання фізико-механічних властивостей проведено на сервері Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2690 0 @ 2.90GHz 16 Cores. Тривалість розрахунків одного варіанту з використанням 8 Cores становить (7–14,5) год CPU залежно від виду моделювання (визначення механічних або теплофізичних властивостей) та конфігурації молекулярної системи (PE-pure, PE-GR).

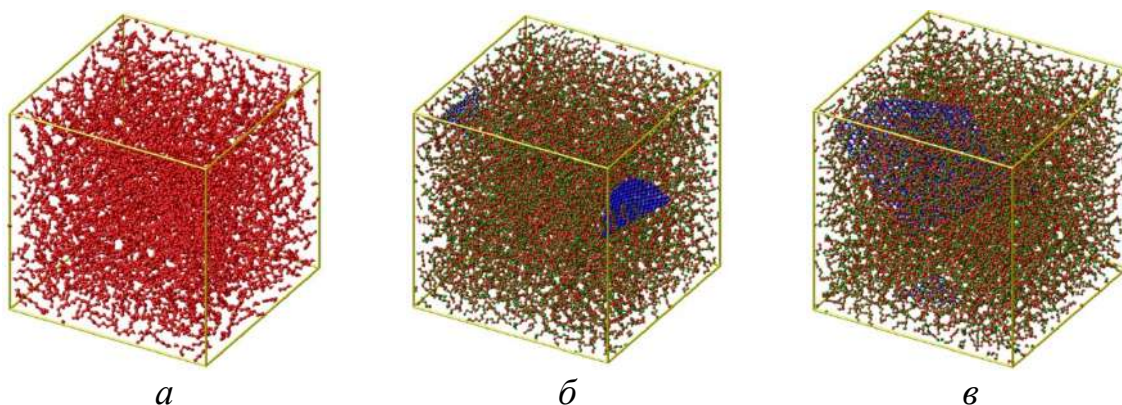


Рис. 1. Врівноважені молекулярні конфігурації PE-pure і PE-GR за температури 300 K:  
 а – PE-pure,  $\rho = 876 \text{ кг/м}^3$ ; б – PE-GR (GR –  $40,5 \times 40,5 \text{ \AA}$ ), 0,56 %,  $\rho = 886 \text{ кг/м}^3$ ;  
 в – PE-GR (GR –  $64,1 \times 64,1 \text{ \AA}$ ), 1,38 %,  $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$

Джерело: розроблено авторами.

Результати МД моделювання пружно-пластичної деформації нанокompозитів PE-GR ( $\alpha = 0,55; 1,36 \%$ ) під час одновісного розтягу за трьома нормальними напрямками з побудовою кривих напруження-деформація за швидкості деформації  $10^9 \text{ с}^{-1}$  і різної температури наведено на рис. 2.

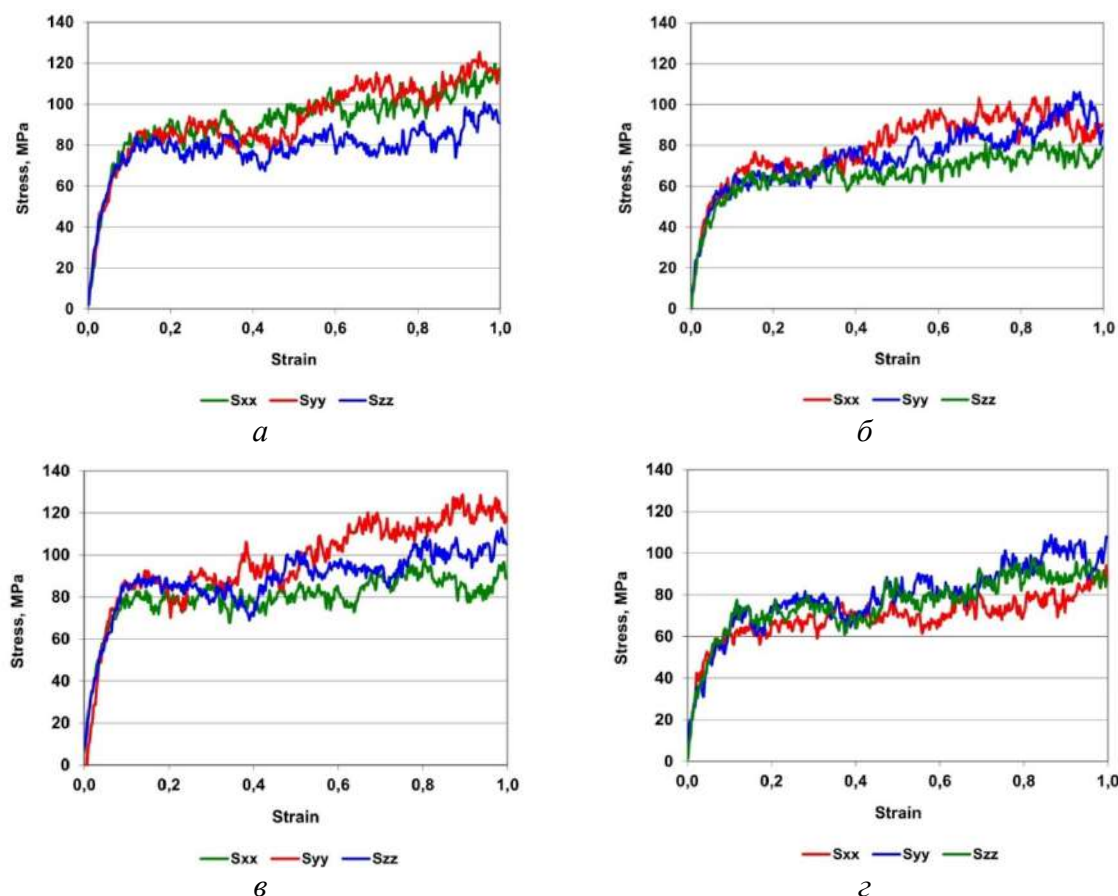


Рис. 2. Криві напруження-деформація нанокompозитів PE-GR ( $\alpha = 0,55; 1,36 \%$ ), підданих одновісному розтягу за трьома нормальними напрямками за різної температури зі швидкістю деформації  $10^9 \text{ с}^{-1}$ :

а, б – PE-GR ( $\alpha = 0,55 \%$ ); в, г – PE-GR ( $\alpha = 1,36 \%$ ); а, в – 275 K; б, г – 293 K

Джерело: розроблено авторами.

Порівняння даних МД моделювання пружно-пластичної деформації PE і PE-GR ( $\alpha = 1,36\%$ ) осереднених за нормальними напрямками за швидкості деформації  $10^9 \text{ c}^{-1}$  і температури 293 K наведено на рис. 3.

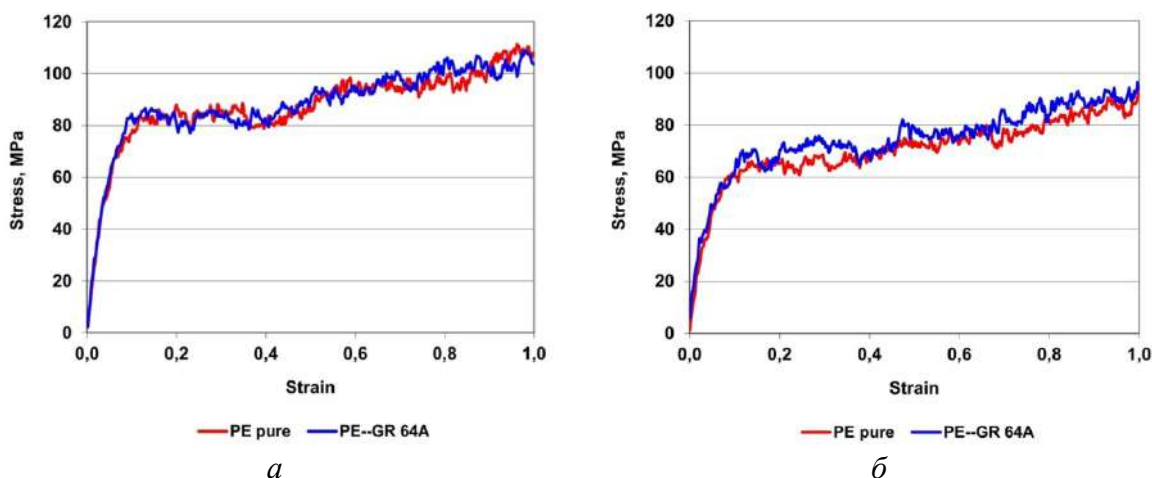


Рис. 3. Порівняння осереднених за трьома нормальними напрямками кривих напруження-деформація PE і нанокompозитів PE-GR ( $\alpha = 1,36\%$ ) за швидкості деформації  $10^9 \text{ c}^{-1}$  і різних температур: а – 275 K; б – 293 K

Джерело: розроблено авторами.

За даними МД моделювання кривих напруження-деформація під час одновісного розтягу за трьома нормальними напрямками визначено ефективні механічні властивості PE-pure і нанокompозиту PE-GR з використанням співвідношень ортотропного наближення:

– модуль пружності:

$$E = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \langle E_i \rangle, \tag{1}$$

де  $\langle E_i \rangle = \left\langle \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \right\rangle, i = 1, 2, 3$  – осереднений модуль пружності під час одновісного розтягу в нормальному напрямку  $i$  на інтервалі деформації 0,02–0,05;  $\sigma_i, \varepsilon_i$  – напруження і деформація в нормальному напрямку  $i$  відповідно;

– коефіцієнт Пуассона:

$$\nu = \frac{1}{6} \sum_{i \neq j} \left\langle \frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \right\rangle, i, j = 1, 2, 3, \tag{2}$$

де  $\varepsilon_j, \varepsilon_i$  – поперечна і повздовжня деформації відповідно;

– модуль зсуву:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \tag{3}$$

Температурні залежності ефективних механічних властивостей нанокompозитів PE-GR ( $\alpha = 0,55; 1,36\%$ ), визначені за формулами (1)–(3), наведено на рис. 4.

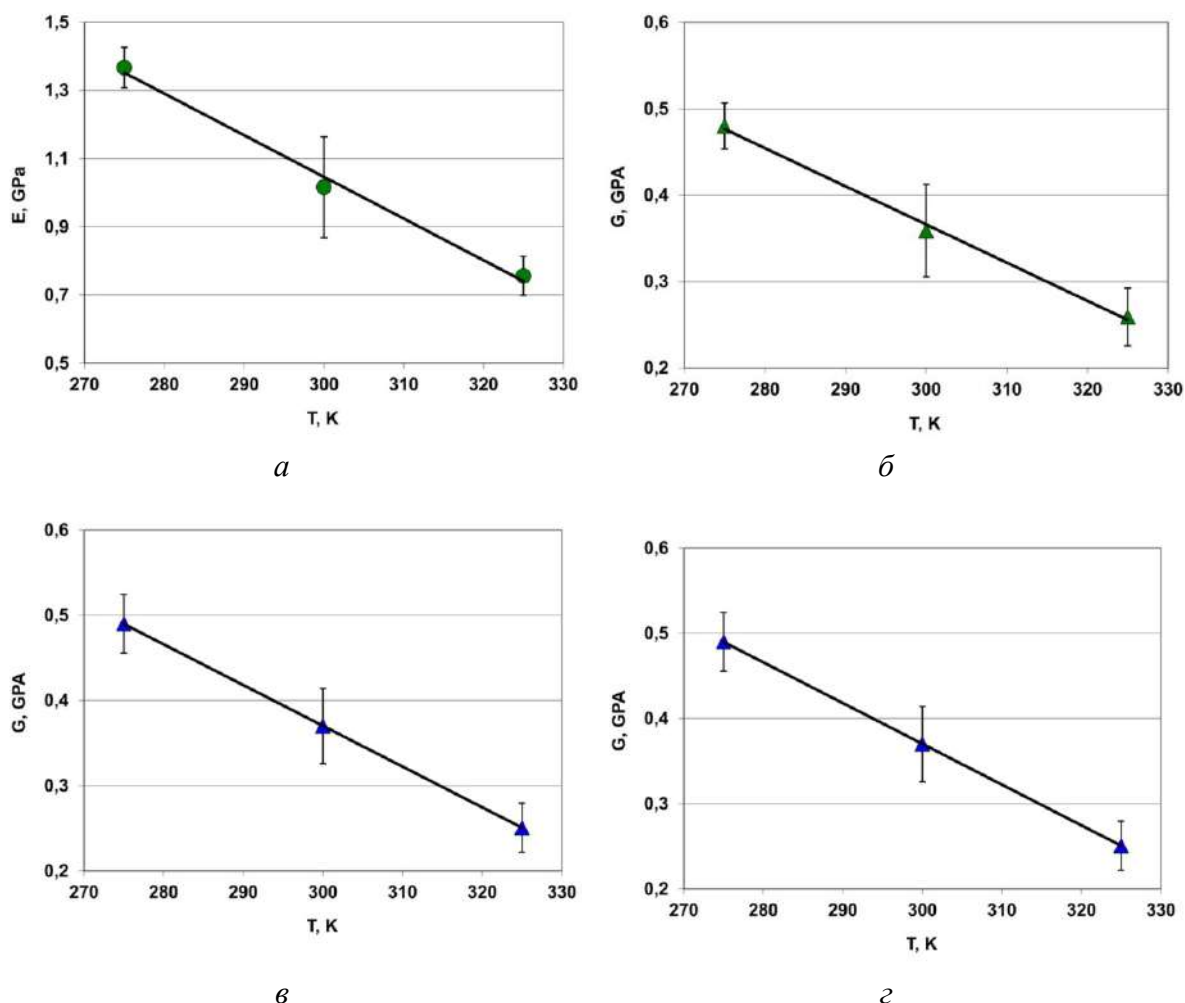


Рис. 4. Ефективні механічні властивості нанокompозиту PE-GR залежно від частки наповнювача і температури зі значеннями стандартного відхилення: а, в – модуль пружності; б, г – модуль зсуву; а, б –  $\alpha = 0,55\%$ ; в, г –  $\alpha = 1,36\%$   
Джерело: розроблено авторами.

Функціональні залежності ефективних механічних властивостей нанокompозиту PE-GR від температури на інтервалі (275–325) К (лінії тренду й коефіцієнти кореляції (рис. 4)):

- модуль пружності:
  - $\alpha = 0,55\%$  –  $E(T) = -0,0122T + 4,712, r = 0,996$  ;
  - $\alpha = 1,36\%$  –  $E(T) = -0,0134T + 5,083, r = 0,999$  ;
- модуль зсуву:
  - $\alpha = 0,55\%$  –  $G(T) = -0,00445T + 1,705, r = 0,998$  ;
  - $\alpha = 1,36\%$  –  $G(T) = -0,00485T + 1,829, r = 0,999$  .

Для визначення ефективних теплофізичних властивостей PE-ure і нанокompозитів PE-GR, що включають масову ізобарну теплоємність і коефіцієнт лінійного температурного розширення (КЛТР), використано центральні різницеві аналоги похідних [11]. За вказаною методикою масова ізобарна теплоємність ( $c_p$ ) визначається за формулою [3]

$$c_p = k \frac{\langle h_{i+1} \rangle - \langle h_{i-1} \rangle}{\langle T_{i+1} \rangle - \langle T_{i-1} \rangle}, i = \overline{2, n-1}, \quad (4)$$

де  $\langle h_i \rangle$  – середнє значення ентальпії за час відпалу молекулярної системи під баростатом Nose-Hoover (ізобарно-ізотермічного ансамблю – NPT) за середньої температури  $\langle T_i \rangle$  й середнього тиску 1 атм упродовж 300 пс з кроком інтегрування 0,5 фс;  $k = 4,184 \cdot 10^6 / m_{ms}$  – коефіцієнт переходу від системи одиниць Real [12] до SI;  $m_{ms}$  – атомна маса молекулярної системи;  $n$  – кількість температур відпалу молекулярної системи під ансамблем NPT на інтервалі (270–320) К з кроком 10 К.

КЛТР ( $\beta$ ) визначається за формулою [7]

$$\beta = \frac{1}{\langle L_i \rangle} \frac{\langle L_{i+1} \rangle - \langle L_{i-1} \rangle}{\langle T_{i+1} \rangle - \langle T_{i-1} \rangle}, i = \overline{2, n-1}, \quad (5)$$

де  $\langle L_i \rangle$  – середнє значення лінійного розміру кубічного зразка молекулярної системи за час відпалу під баростатом Nose-Hoover NPT за середньої температури  $\langle T_i \rangle$  і середнього тиску 1 атм упродовж 300 пс з кроком інтегрування за часом 0,5 фс.

Температурні залежності ефективних теплофізичних властивостей нанокompозитів PE-GR ( $\alpha = 0,55; 1,36 \%$ ), визначені за формулами (4)–(5), наведено на рис. 5.

Функціональні залежності ефективних теплофізичних властивостей PE-GR ( $\alpha = 0,55; 1,36 \%$ ) від температури на інтервалі (280–320) К (лінії тренду і коефіцієнти кореляції (рис. 5)):

– масова ізобарна теплоємність:

$$\alpha = 0,55 \% - c_p(T) = 6,76 \cdot 10^{-3} T + 0,125, r = 0,978;$$

$$\alpha = 1,36 \% - c_p(T) = 7,49 \cdot 10^{-3} T + 0,057, r = 0,82;$$

– КЛТР:

$$\alpha = 0,55 \% - \beta(T) = 2,17 \cdot 10^{-6} T - 5,23 \cdot 10^{-4}, r = 0,991;$$

$$\alpha = 1,36 \% - \beta(T) = 2,07 \cdot 10^{-6} T - 4,82 \cdot 10^{-4}, r = 0,85.$$

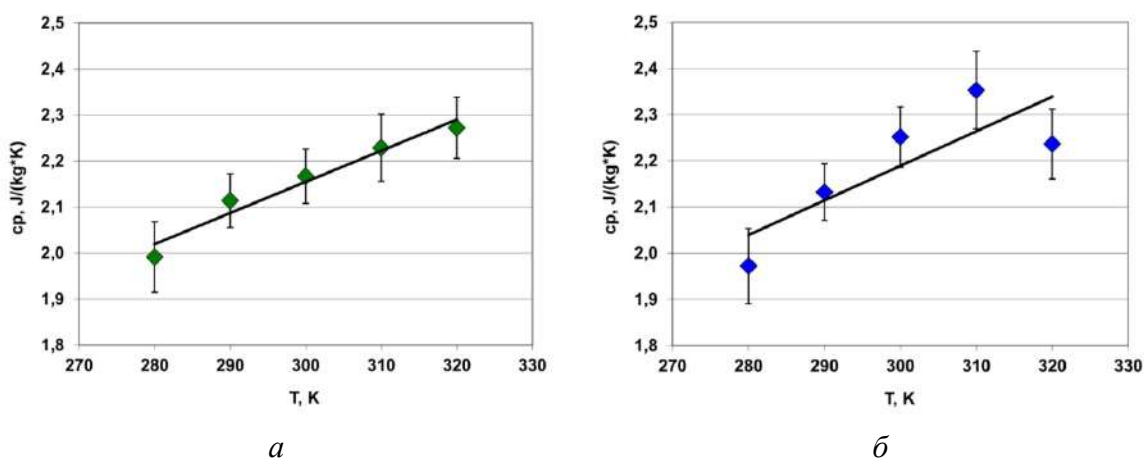


Рис. 5. Ефективні теплофізичні властивості нанокompозиту PE-GR залежно від частки наповнювача й температури зі значеннями стандартного відхилення: а, в – масова ізобарна теплоємність; б, г – КЛТР; а, б –  $\alpha = 0,55 \%$ ; в, г –  $\alpha = 1,36 \%$



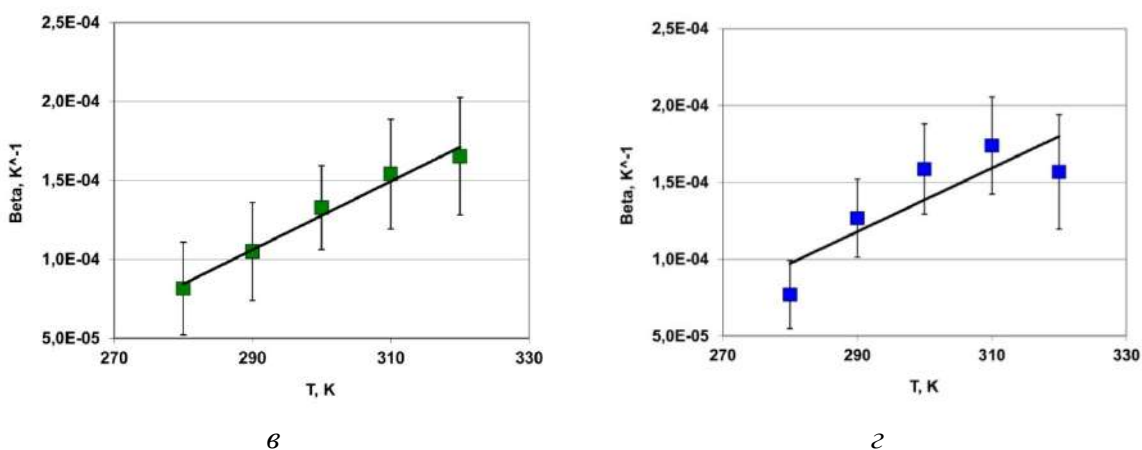


Рис. 5. Закінчення (початок на с. 94)

Джерело: розроблено авторами.

Порівняння ефективних фізико-механічних властивостей PE-pure і нанокompозиту PE-GR при 293 K наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння ефективних фізико-механічних властивостей PE-pure і нанокompозиту PE-GR при 293 K

Матеріал (поточні дані)	$E$ , ГПа	$G$ , ГПа	$\nu$	$\sigma_T$ , МПа за $\nu = 1 \times 10^9 \text{c}^{-1}$	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\beta \cdot 10^{-4}$ , К <sup>-1</sup>
PE-pure $\rho = 0,879 \text{ г/см}^3$	1,081 $\pm 0,081$	0,376 $\pm 0,029$	0,436 $\pm 0,039$	61,3	2,17 $\pm 0,079$	1,37 $\pm 0,26$
PE-GR $\alpha = 0,55 \%$ $\rho = 0,891 \text{ г/см}^3$	1,132 $\pm 0,062$	0,399 $\pm 0,029$	0,427 $\pm 0,113$	66,9	2,10 $\pm 0,058$	1,12 $\pm 0,31$
PE-GR $\alpha = 1,36 \%$ $\rho = 0,905 \text{ г/см}^3$	1,146 $\pm 0,093$	0,408 $\pm 0,020$	0,425 $\pm 0,122$	68,5	2,14 $\pm 0,061$	1,24 $\pm 0,25$

Джерело: розроблено авторами.

Порівняння ефективних механічних та теплофізичних властивостей PE-pure і нанокompозитів PE-GR ( $\alpha = 0,55; 1,36 \%$ ) наведено на рис. 6.

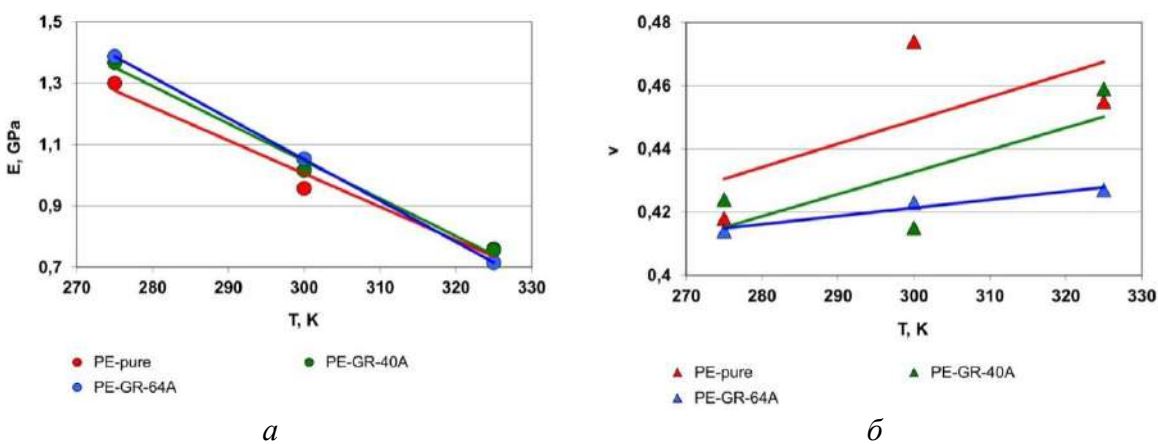


Рис. 6. Порівняння ефективних механічних та теплофізичних властивостей PE-pure і нанокompозитів PE-GR ( $\alpha = 0,55; 1,36 \%$ ):

а – модуль пружності; б – коефіцієнт Пуассона;  
в – масова ізобарна теплоємність; г – КЛТР

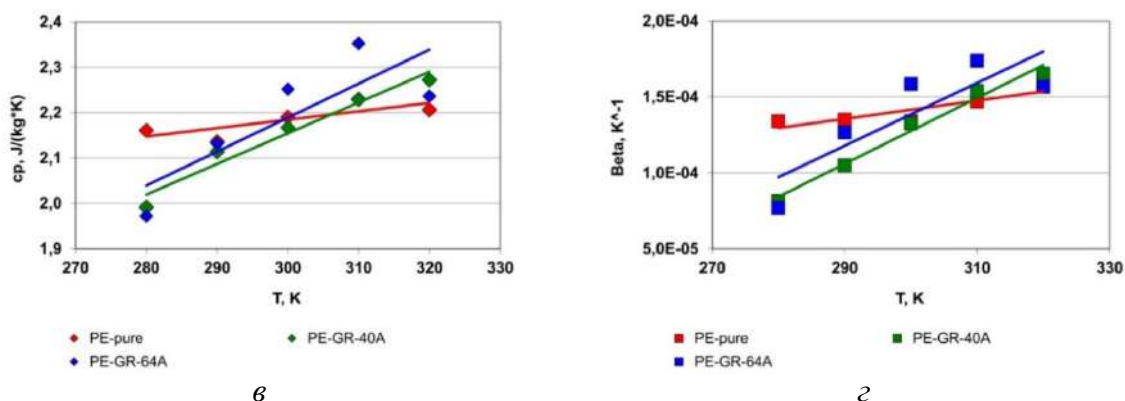


Рис. 6. Закінчення (початок на с. 95)

Джерело: розроблено авторами.

З використанням результатів МД моделювання відпалу молекулярних систем PE-pure і PE-GR під ансамблем NPT також визначено температури склування вказаних матеріалів на підставі аналізу їхніх функціональних залежностей зміни об'єму від температури ( $V(T)$ ) [14]. При цьому для побудови дотичних до графіків  $V(T)$  у периферійних точках на інтервалі (250–330) К використано точні аналітичні залежності. Графік залежності температури склування PE-GR від частки наповнювача наведено на рис. 7.

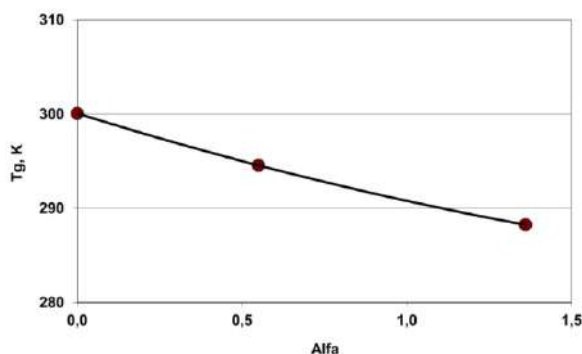


Рис. 7. Залежність температури склування нанокompозиту PE-GR від частки наповнювача:  $T_g(\alpha) = 1,661T^2 - 10,949T + 300,08$ ,  $R^2 = 1,0$

Джерело: розроблено авторами.

З використанням даних наведених на рис. 6 у програмі Mathcad отримано функціональні нелінійні двопараметричні залежності фізико-механічних властивостей PE-GR від температури та об'ємної частки наповнювача вигляду [7]

$$F(T, \alpha) = \sum_{i=1}^5 k_i T^{n_i} \alpha^{m_i} \quad F(T, \alpha) = \sum_{i=1}^5 k_i T^{n_i} \alpha^{m_i}, \quad (6)$$

де  $T$  – абсолютна температура, К;  $\alpha$  – об'ємна частка GR, %;  $k_i$ ,  $n_i$ ,  $m_i$  – коефіцієнти (табл. 2).

Таблиця 2 – Числові значення коефіцієнтів формули (6)

№	$E$ , ГПА			$\nu$			$c_p$ , Дж/(кг·К)			$\beta$ , К <sup>-1</sup>		
	$k_i$	$n_i$	$m_i$	$k_i$	$n_i$	$m_i$	$k_i$	$n_i$	$m_i$	$k_i$	$n_i$	$m_i$
1	-0,00188	1	1	$-5,116 \cdot 10^{-4}$	1	1	$4,367 \cdot 10^{-3}$	1	1	$9,831 \cdot 10^{-7}$	1	1
2	-0,05009	0	2	$8,199 \cdot 10^{-3}$	0	2	$4,025 \cdot 10^{-3}$	0	2	$2,867 \cdot 10^{-5}$	0	2
3	0,66594	0	1	0,1311	0	1	-1,3123	0	1	$-3,363 \cdot 10^{-4}$	0	1
4	4,31679	0	0	0,1721	0	0	1,8989	0	0	$-1,505 \cdot 10^{-4}$	0	0
5	-0,01111	1	0	$8,990 \cdot 10^{-4}$	1	0	$9,521 \cdot 10^{-4}$	1	0	$9,595 \cdot 10^{-7}$	1	0

Джерело: розроблено авторами.



Графіки двопараметричних залежностей фізико-механічних властивостей PE-GR від температури та об'ємної частки наповнювача наведено на рис. 8.

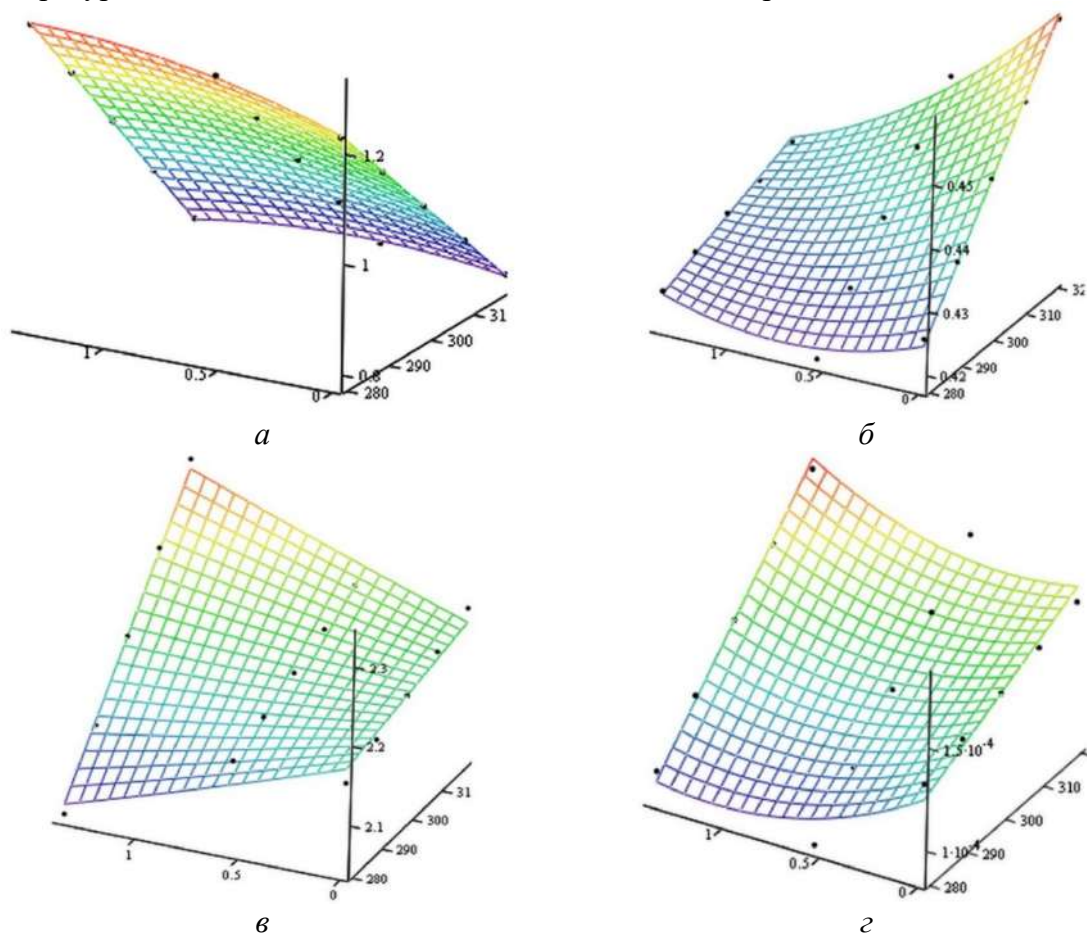


Рис. 8. Двопараметричні нелінійні залежності фізико-механічних властивостей PE-GR від температури та об'ємної частки наповнювача:

*а* – модуль пружності; *б* – коефіцієнт Пуассона;  
*в* – масова ізобарна теплоємність; *г* – КЛТР

Джерело: розроблено авторами.

Отримані залежності (рис. 7, 8) потрібні для оперативного прогнозування фізико-механічних властивостей PE-GR у діапазоні зміни температур (280–320) К та об'ємної частки наповнювачів (0–1,5) %, що дає змогу під час розробки нових композиційних матеріалів не виконувати достатньо складні й тривалі числові експерименти на базі МД моделювання.

**Висновки.** У програмі LAMMPS здійснено моделювання молекулярних структур чистого поліетилену PE-pure та нанокомпозитів PE-GR з об'ємною часткою наповнювача  $\alpha = 0,55; 1,36$  %. Отримані врівноважені моделі використано для моделювання пружно-пластичної деформації під час одновісного розтягу за трьома нормальними напрямками з побудовою кривих напруження-деформація за швидкості деформації  $10^9 \text{ c}^{-1}$  та температур 275 К і 293 К. Проведено МД моделювання фізико-механічних властивостей полімеру PE та нанокомпозитів PE-GR ( $\alpha = 0,55; 1,36$  %), таких як модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, масова ізобарна теплоємність, КЛТР та температура склування. Отримані дані було осереднено на заданих часових проміжках, що показало збіг із літературними даними та сприяє отриманню достовірних даних фізико-механічних властивостей нанокомпозитів PE-GR.

Встановлено, що на інтервалі температур (275–315) К модуль пружності нанокompозиту PE-GR перевищує відповідні значення PE-pure (рис. 3, а, табл. 1): на 6,0 % при 300 К і на 6,7 % при 275 К. Границя текучості PE-GR порівняно з PE-pure також підвищується (рис. 6, а, табл. 1): на 11,7 % при 300 К і на 8,9 % при 275 К для  $\alpha=1,36$  % і швидкості деформації  $10^9$  с<sup>-1</sup>. Графіки лінійних температурних залежностей масової ізобарної теплоємності і КЛТР PE-GR на відміну від модуля пружності мають зростаючі залежності і перетинають відповідні графіки PE-pure на інтервалі (300–310) К залежно від об'ємної частки графену (рис. 6, в, з). За температури 280 К значення  $c_p$  PE-GR порівняно з PE-pure менші на 5–6 %, а при 320 К – навпаки більші на 3,1–5,3 %. При 280 К значення КЛТР PE-GR порівняно з PE-pure менші на 25–35 %, а при 320 К – навпаки більші на 11–17 %. Для оперативного прогнозування фізико-механічних властивостей композитів PE-GR, отримано нелінійні двопараметричні залежності фізико-механічних властивостей у діапазоні зміни температур (280–320) К та об'ємної частки графену (0–1,5) %, що дає змогу під час розробки нових композиційних матеріалів не виконувати достатньо складні й тривалі числові експерименти на базі МД моделювання. Одержані дані дадуть змогу виконувати моделювання термо-пружно-пластичного стану виробів із нанокompозиту PE-GR в умовах експлуатації в континуальному наближенні.

#### Список використаних джерел

1. Molecular dynamics simulation of tension of polymer composites reinforced with graphene and graphene oxide / Khalfani Juma Mofu, Yi-Fan Wei, Jemal Fahmi Awol, Yan-Gao Hu // *Acta Mechanica*. – 2024. – № 6. – Pp. 4067-4087. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00707-024-03942-x>.
2. Molecular dynamics simulations of deformation mechanisms of amorphous polyethylene / D. Hossain, M. A. Tschopp, D. K. Ward, J. L. Bouvard, P. Wang, M.F. Horstemeyer // *Polymer*. – 2010. – Vol. 51, № 25. – P. 6071-6083. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.10.009>.
3. Rissanou A. Structural and Dynamical Properties of Polyethylene / A. Rissanou, A. Power, V. Harmandaris // *Graphene Nanocomposites through Molecular Dynamics Simulations*. *Polymers*. – 2015. – Vol. 7, № 3. – P. 390-417. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym7030390>.
4. Rahman, R. Molecular Dynamic Simulation of Graphene Reinforced Nanocomposites for Evaluating Elastic Constants / R. Rahman, A. Haque // *Procedia Engineering*. – 2013. – Vol. 56. – P. 789–794. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.197>.
5. Molecular dynamics simulation of plastic deformation in polyethylene under uniaxial and biaxial tension / Y. Zhang et al. // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. – 2021. – Vol. 236, № 2. – P. 389-403. DOI: <https://doi.org/10.1177/14644207211045821>.
6. Molecular dynamics simulations of deformation mechanisms of amorphous polyethylene / D. Hossain, M. A. Tschopp, D. K. Ward, J. L. Bouvard, P. Wang, M.F. Horstemeyer // *Polymer*. – 2010. – Vol. 51, Issue 25. – P. 6071-6083. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.10.009>.
7. Омельчук, І. В. Визначення фізико-механічних властивостей поліетилену та полімерних нанокompозитів методами молекулярної динаміки / І. В. Омельчук, А. Я. Карвацький // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2024. – № 3.
8. Омельчук, І. В. Визначення теплопровідності композиційних матеріалів з поліетиленовою матрицею методами молекулярної динаміки / І. В. Омельчук, А. Я. Карвацький // *Збірника наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. – 2024. – № 2 (494).
9. CHARMM-GUI. Polymer Builder [Electronic resource]. – Accessed mode: <http://www.charmm-gui.org/input/polymer>.
10. PACKMOL. Initial configurations for Molecular Dynamics Simulations by packing optimization [Electronic resource]. – Accessed mode: <https://m3g.github.io/packmol>.

11. Molecular Dynamics Simulation of Poly(ethylene terephthalate) Oligomers / Qifei Wang [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry B.* – 2010. – Vol. 114, №. 2. – P. 786–795. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp909762j>.
12. LAMMPS. Molecular Dynamics Simulator [Electronic resource]. – Accessed mode: <https://www.lammps.org>.
13. Accurate thickness measurement of graphene / C. J. Shearer et al. // *Nanotechnology.* – 2016. – Vol. 27, №. 12. – P. 125704. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/12/125704>.
14. Molecular Dynamics Simulation of the Thermomechanical and Tribological Properties of Graphene-Reinforced Natural Rubber Nanocomposites / Z. Wang et al. // *Polymers.* – 2022. – Vol. 14, no. 23. – Art. ID: 5056. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14235056>.

### References

1. Mofu, K. J., Wei, Y.-F., Awol, J. F., & Hu, Y.-G. (2024). Molecular dynamics simulation of tension of polymer composites reinforced with graphene and graphene oxide. *Acta Mechanica*, 235, 4067–4087. <https://doi.org/10.1007/s00707-024-03942-x>.
2. Rahman, R., & Foster, J. T. (2014). Deformation mechanism of graphene in amorphous polyethylene: A molecular dynamics based study. *Computational Materials Science*, 87, 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.02.023>.
3. Rissanou, A., Power, A., & Harmandaris, V. (2015). Structural and Dynamical Properties of Polyethylene/Graphene Nanocomposites through Molecular Dynamics Simulations. *Polymers*, 7(3), 390–417. <https://doi.org/10.3390/polym7030390>.
4. Rahman, R., & Haque, A. (2013). Molecular Dynamic Simulation of Graphene Reinforced Nanocomposites for Evaluating Elastic Constants. *Procedia Engineering*, 56, 789–794. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.197>.
5. Zhang, Y., Qiao, L., Fan, J., Xue, S., & Jar, P. B. (2021). Molecular dynamics simulation of plastic deformation in polyethylene under uniaxial and biaxial tension. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 236(2), 389–403. <https://doi.org/10.1177/14644207211045821>.
6. Hossain, D., Tschopp, M. A., Ward, D. K., Bouvard, J. L., Wang, P., & Horstemeyer, M. F. (2010). *Molecular dynamics simulations of deformation mechanisms of amorphous polyethylene*. *Polymer*, 51(25), 6071–6083. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.10.009>.
7. Omelchuk, I. V., Karvatskyi, A. Ya. (2024). Determination of physical and mechanical properties of polyethylene and polymer nanocomposites using the methods of molecular dynamics. *Herald of Khmelnytskyi national university. Series: technical sciences*, 3, 158-165.
8. Omelchuk I. V., Karvatskyi A. Ya. (2024). Determination of thermal conductivity of composite materials with a polyethylene matrix by molecular dynamics methods. *Collection of scientific papers of Admiral Makarov National Shipbuilding University*, 2(494).
9. CHARMM-GUI. Polymer Builder. URL: <http://www.charmm-gui.org/input/polymer>.
10. PACKMOL. Initial configurations for Molecular Dynamics Simulations by packing optimization. <https://m3g.github.io/packmol/>.
11. Wang, Q., et al. (2010). Molecular Dynamics Simulation of Poly(ethylene terephthalate) Oligomers. *The Journal of Physical Chemistry*, 114(2), 786–795. <https://doi.org/10.1021/jp909762j>.
12. LAMMPS. Molecular Dynamics Simulator. <https://www.lammps.org/>.
13. Shearer, C. J., Slattery, A. D., Stapleton, A. J., Shapter, J. G., & Gibson, C. T. (2016). Accurate thickness measurement of graphene. *Nanotechnology*, 27(12), 125704. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/12/125704>.
14. Wang, Z., Su, M., Duan, X., Yao, X., Han, X., Song, J., & Ma, L. (2022). Molecular Dynamics Simulation of the Thermomechanical and Tribological Properties of Graphene-Reinforced Natural Rubber Nanocomposites. *Polymers*, 14(23), 5056. <https://doi.org/10.3390/polym14235056>.

Отримано 25.07.2024

**Iryna Cholak<sup>1</sup>, Anton Karvatskii<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD student, National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [irena\\_om@ukr.net](mailto:irena_om@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4543-4761>

**Scopus Author ID:** [58601169500](https://orcid.org/0000-0003-4543-4761)

<sup>2</sup>Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Department of Chemical, Silica and Polymer Engineering,  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [anton@rst.kpi.ua](mailto:anton@rst.kpi.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2421-4700>

**ResearcherID:** [I-7822-2017](https://orcid.org/0000-0003-2421-4700). **Scopus Author ID:** [6506101039](https://orcid.org/0000-0003-2421-4700)

## PREDICTION OF PHYSICAL PROPERTIES OF POLYETHYLENE-BASED NANOCOMPOSITES USING MOLECULAR DYNAMICS METHODS

Recently, attention has been drawn to polymer materials reinforced with carbon allotropes, including graphene. Creating new nanocomposite materials in the conditions of growing demand is a difficult task and requires significant material and time costs. The use of computer resources for modeling become an increasingly attractive way to obtain the necessary information about the dynamics of phenomena and physical processes in materials. Currently, the influence of non-functionalized nanofillers with their arbitrary distribution in the matrix on the complex physico-mechanical properties of polymer nanocomposite materials is insufficiently researched. Molecular dynamics methods allow to deeper understand the dynamics and principles of structural changes in the material during its operation.

It has been established that in the temperature range of (275–315) K, the elastic modulus of the PE-GR nanocomposite exceeds the corresponding values of PE-pure by 6.0% at 300 K and 6.7% at 275 K. The yield strength of PE-GR compared to PE-pure also increases: by 11.7% at 300 K and 8.9% at 275 K for  $\alpha=1.36\%$  and a deformation rate of  $109\text{ s}^{-1}$ . The graphs of linear temperature dependencies of mass isobaric heat capacity and coefficient of linear thermal expansion (CLTE) of PE-GR have increasing dependencies and intersect the corresponding PE-pure graphs in the range of (300–310) K depending on the graphene volume fraction. At a temperature of 280 K, the heat capacity values of PE-GR are 5–6% lower than PE-pure, and at 320 K, they are 3.1–5.3% higher. At 280 K, the CLTE values of PE-GR are 25–35% lower than PE-pure, and at 320 K, they are 11–17% higher.

For the prediction of the physico-mechanical properties of PE-GR composites, nonlinear two-parameter dependencies of physico-mechanical properties in the temperature range of (280–320) K and the volume fraction of graphene (0–1.5) % have been obtained. These dependencies allow to develop new composite materials without conducting complex and time-consuming numerical experiments based on MD modeling. The obtained data will enable the modeling of the thermo-elastic-plastic state of PE-GR nanocomposite products in service conditions in a continuum approximation.

**Keywords:** physical and mechanical properties; polymer nanocomposites; graphene; simulation; two-parameter dependencies. Table: 2. Fig.: 8. References: 14.

**David Kovaluk<sup>1</sup>, Jan Semjon<sup>2</sup>, Matus Sabol<sup>3</sup>, Matus Hrabcak<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D student of the Department of Production Systems and Robotics  
Technical University of Košice (Košice, Slovakia)

**E-mail:** [david.kovaluk@student.tuke.sk](mailto:david.kovaluk@student.tuke.sk)

<sup>2</sup>Associate Professor, Associate Professor of the Department of production systems and robotics  
Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)

**E-mail:** [jan.semjon@tuke.sk](mailto:jan.semjon@tuke.sk). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9076-7808>

**ResearcherID:** AAH-6272-2019. **Scopus Author ID:** 55571411200

<sup>3</sup>Ph.D student of the Department of production systems and robotics  
Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)

**E-mail:** [matus.sabol@student.tuke.sk](mailto:matus.sabol@student.tuke.sk)

<sup>4</sup>Engineering student of the Department of production systems and robotics,  
Technical University of Košice (Košice, Slovakia)

**E-mail:** [matus.hrabcak@student.tuke.sk](mailto:matus.hrabcak@student.tuke.sk)

**DESIGN OF ROBOTIZED EDUCATIONAL WORKPLACE  
IN OFF-LINE ENVIRONMENT WITH YASKAWA ROBOT**

*The article deals with the creation of 3D models of individual parts of a robotic workplace in the Creo Parametric environment. The created models of the workplace components were subsequently imported into the MotoSim offline environment, where three variants of the assembly process were designed and simulated at the robotic workplace with the Yaskawa GP8 robot. The selected variant was then imported into a real workplace, where it was debugged and tested. The goal was to create an educational workplace where it would be possible to carry out teaching and training online or offline on a robot from Yaskawa.*

**Keywords:** off-line environment; Yaskawa GP8; MotoSim; educational workplace; Creo PTC.

**Fig.:** 6. **References:** 12.

**Relevance of the research.** The use of an off-line environment in the design of robotic workplaces brings a lot of advantages, which make it possible to increase the efficiency in the design of the workplace and shorten its installation and recovery time [1]. Renowned manufacturers of industrial robots in their offline environments offer customers specialized functions and tools that make it possible to use the potential of used industrial robots to the maximum extent [2; 3]. There are also more universal offline environments on the market in which it is possible to use robots from several competing manufacturers, but they have their limitations [4; 5].

**Problem statement.** The Yaskawa company has already installed over 600,000 robots worldwide, which creates a need for the use of appropriate tools to design, simulate and optimize robotic workplaces. In the eastern part of the Slovak Republic, new production facilities are being established, where Yaskawa industrial robots are also being deployed. Therefore, there was a need to ensure an educational process using online programming on Yaskawa robots, as well as a need to prepare graduates who would use the MotoSim offline environment. For this reason, a Yaskawa GP8 robot [6] was installed on the premises of the Technical University in Košice and 15 licenses for off-line programming in the MotoSim environment [7] were delivered.

**Analysis of recent research and publications.** In today's industry, robotic workplaces play a key role in increasing the efficiency and accuracy of production processes [8]. With the development of technologies, they become even more sophisticated and integrated, which allows better optimization of production procedures [9]. One of the main options that enables testing and simulation of these robotic workplaces is software programs for creating and programming these workplaces [10]. These programs provide the possibility of creating a virtual model of workplaces, which enables testing and tuning of their functionality and effectiveness before deployment in a real environment [11].

**Uninvestigated parts of a common problem.** Offline programming of robots is a method enabling programming based on the kinematic model of the robot in the CAD environment. Such an innovation is particularly important for tasks requiring high precision of movement and for minimizing downtime in a robotic workplace [12]. An active approach to programming provides additional options, allowing programmers to intuitively define the trajectory of the robot's movement and adapt it to the needs of the task at hand. The accuracy of the programming depends on the accuracy of the model in the 3D environment. This data is necessary for the implementation of the robot trajectory in a real environment. The use of offline programming is most effective for small and medium production systems, as it can provide a simpler and more efficient way to generate a robot program even in complex systems [10].

**Research objective.** The goal of the research was the optimal design of a robotic training workplace for online and offline programming of Yaskawa robots. In the first step, it was necessary to create 3D models of individual parts of the workplace in the Creo Parametric environment, which were subsequently imported into the MotoSim virtual environment. In the MotoSim environment, three variants of the assembly process were designed using two conveyors, a palletizer, a depalletizer, and an automatic tool changer. It was possible to test the designed and simulated variants in a real workplace so that the students also gained practical experience associated with the revival and launch of a robotic workplace.

**The statement of basic materials.** The robotic workplace consists of an industrial robot from Yaskawa GP8 and a control unit labeled YRC 1000 [6]. The robotic workplace has two conveyor belts, a workplace control cabinet, a palletizer and a depalletizer. The working space of the robot with the range of movement of the first axis of the robot  $\pm 170^\circ$  is shown in Fig. 1.

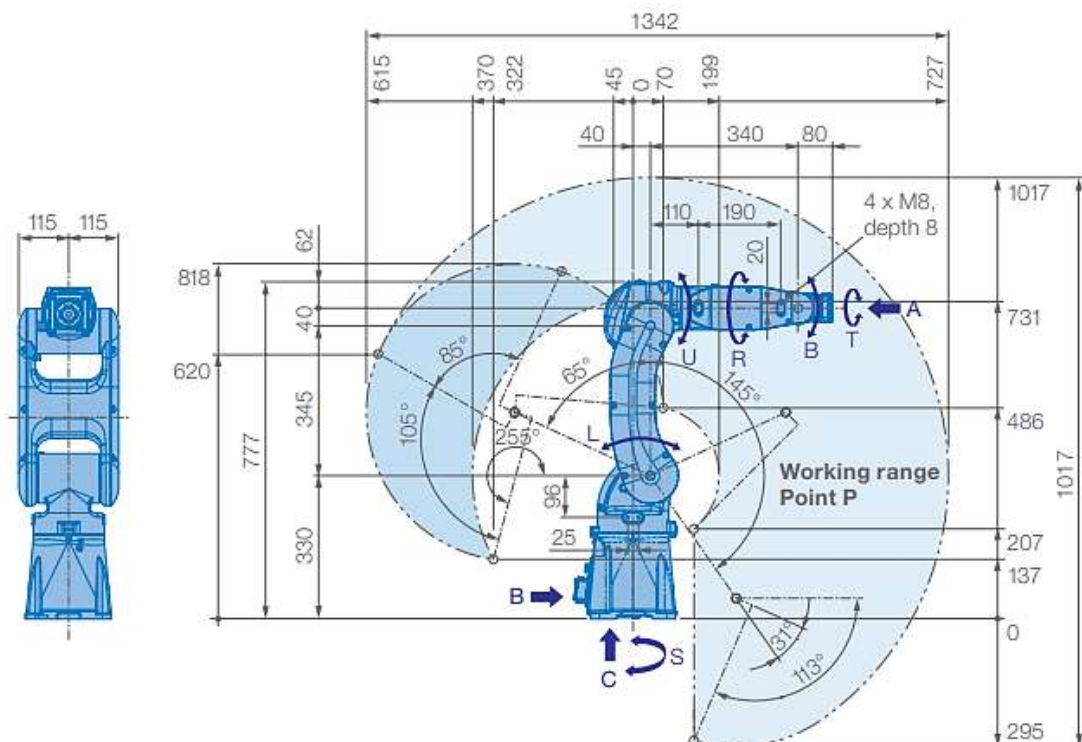


Fig. 1. Dimensions of the GP8 robot [6]

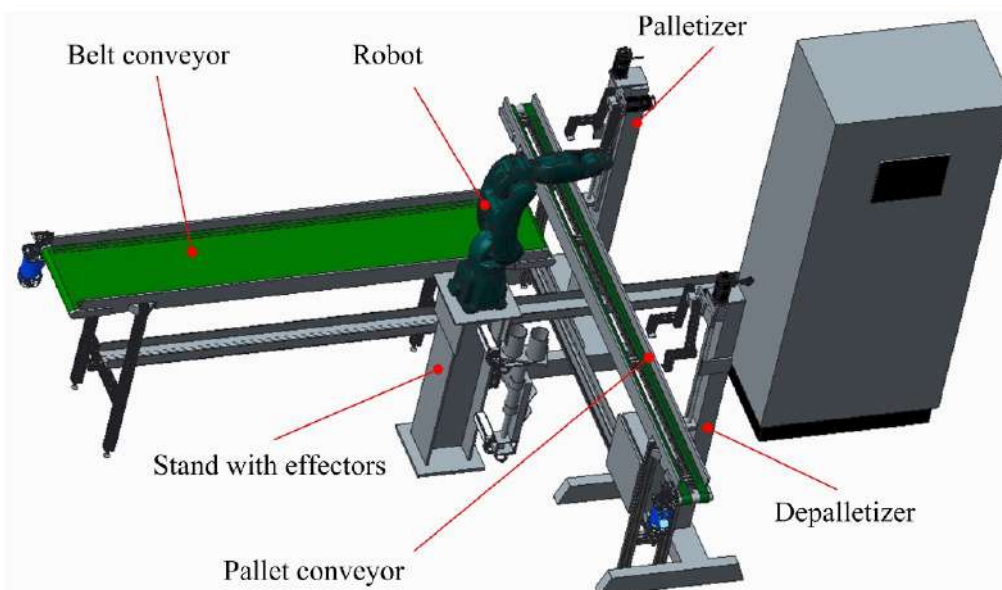
The robotic workplace contains a height-adjustable stand on which the robot is attached. The stand has a tool change system for two effectors, which is located on the side of the stand. It is capable of vertical displacement and rotation around the displacement axis. It contains cylindrical storage for effectors, which allows to increase the flexibility of the workplace. Two



pneumatic grippers are located in the SMC MA310 tool changer, the Parker KURODA GPR10A, which is used for gripping non-rotating parts, and the SMC MHS3-25D, which is used for gripping cylindrical parts.

The conveyors used at the workplace are of different constructions. The first conveyor is a belt conveyor with a belt width of 300 mm and a belt length of 2000 mm. The second type of conveyor is a belt conveyor, which is used to move pallets with a width of 150 mm, while the length of the active surface of the belts is 2300 mm. The workplace also includes a depalletizer that serves to store and feed pallets onto a belt conveyor. The function of the palletizer is the opposite, i.e. it removes pallets from the belt conveyor.

All the listed components of the robotic workplace were measured and their 3D model was created in the Creo Parametric environment with an accuracy of up to 1 mm. The developed models created the overall workplace, shown in Fig. 2, with a floor plan area of 2380×3970 mm.



*Fig. 2. Workplace model in Creo 3D environment*

All created models of individual components, except for the robot, were imported into the MotoSim EG-VRC environment. To ensure the exact positions between the individual components of the workplace, the construction of the virtual workplace model was solved directly in the MotoSim environment. The relative positions of particular parts of the workplace are created using tools (connection) used by MotoSim. The reason is the possibility of modifying the offline workplace (modularity) according to the modification implemented at the real workplace. Components in 3D that were imported from another environment are displayed in gray, elements that are in the library of the MotoSim environment can have any color.

To move the conveyor models, it was necessary to create external conveyors through a function located directly in the MotoSim environment. After creating the conveyor, it is necessary to adjust its size, speed, start and end of movement. Subsequently, it is necessary to insert this model of the "block" shape into the CAD model of the conveyor in order to merge the moving surfaces. If the "MotoSim Conveyor" is moved to a non-zero position of the world coordinate system and subsequently, its parameters are adjusted, it will be moved back to the zero position of this system. To start the conveyors through the program, it is necessary to connect these conveyors to the robot through the settings in the virtual pendant. These settings can be seen in fig. 3, where "MotoSim Conveyors" are shown in green.

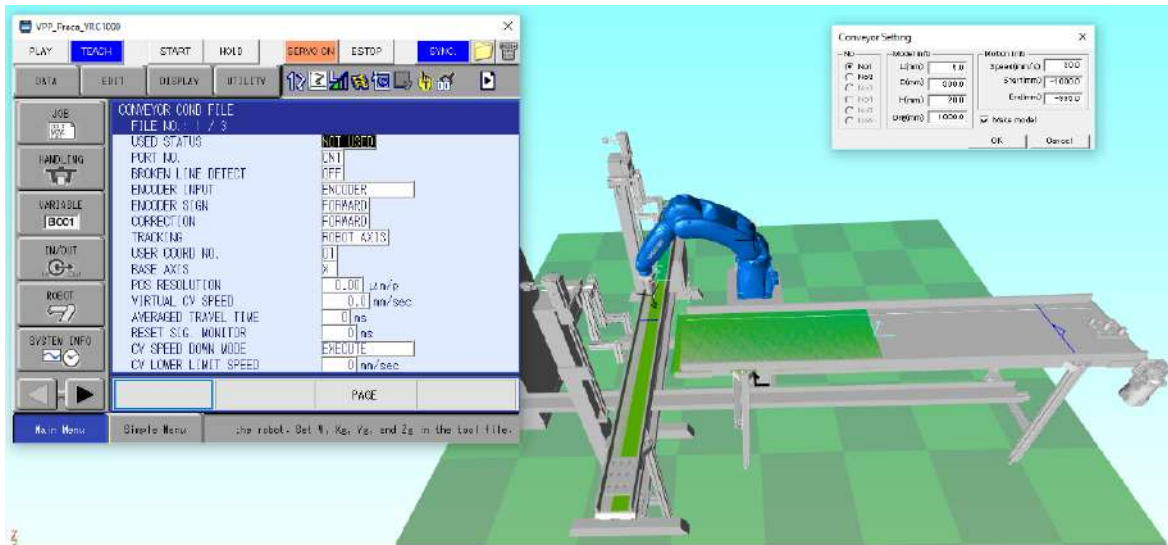


Fig. 3. Setting up the movement of conveyors in MotoSim

To test the workplace model, three proposals for simulations of work at this workplace were created. All three designs used different combinations of the available parts of the workplace, using the robot for manipulative activity with the test objects. The test objects were simple models of cylinders (cylinder size  $\phi 20 \times 50$  mm) placed on a pallet. Specifically, it was three cylinders placed diagonally on a pallet (pallet size  $150 \times 200$  mm), as can be seen in Fig. 4.

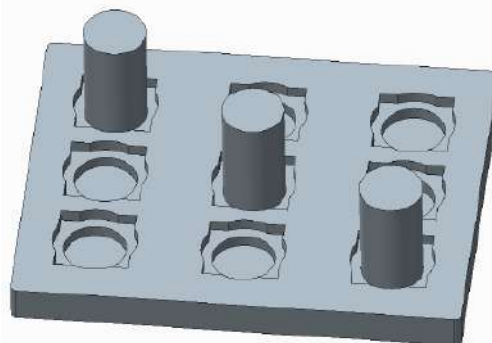


Fig. 4. Pallet with rotating parts

From the three simulation proposals, a proposal was selected and subsequently implemented, which included the use of a robot, both conveyors and a palletizer.

The MotoSim environment does not include the ability to create a "pick and place" function, which is necessary to develop the chosen simulation. It is also not possible to simulate the movement of uploaded CAD models. Exchange of effectors in the MotoSim program is not visually possible, but programmatically feasible [8]. For this reason, it was necessary to create a simulation differently. For this, the "Model script manager" function was used, through which it was possible to create a visual simulation of the design by hiding and displaying objects. For this reason, extra models of workplace equipment, pallets and cylinders were created. The SEE, HID and ACT functions were used in the created scripts. The SEE function is used to display the models, the HID function serves to hide the models, the ACT function moves the models in the direction of the selected axis by the selected length [9]. The RESET function is used to create a workplace model for the start of the line start-up. Models of the palletizer with a pallet at maximum height, an empty pallet on a belt conveyor, as well as hiding a loaded pallet on the conveyor and an empty pallet in the end position of the belt conveyor will be displayed. For the sake of testing the simulation, the other models of pallets and cylinders were also hidden.



Programming was done using a virtual pendant in the MotoSim program, robot movement points and script execution were written into it. The program was tested using a simplified version of the pendant called "Simple pendant". With a simplified pendant, it is possible to record robot movement points and run a program simulation. The virtual pendant, which fulfills the same functions as a real pendant, includes all the properties of a simplified pendant and allows adding functions, macros to the program, modifying the properties of the robot, conveyors and effectors. In fig. 5 shows a view of the robotic workplace in the MotoSim environment, where the location of the robot, effector, belt conveyor and depalletizer is visible. At the same time, a simplified version of the pendant with the created program is shown on the left side of the picture.

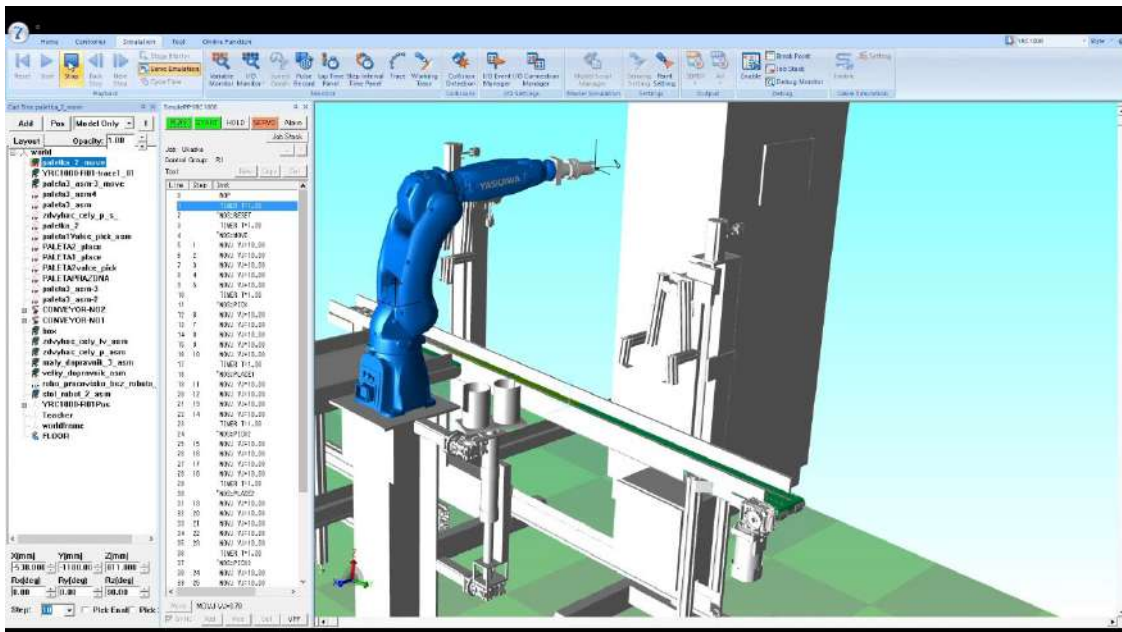


Fig. 5. A robotic workplace in the MotoSim environment

A view of a real robotic workplace equipped with a Yaskawa GP8 industrial robot, where the created program was verified in the MotoSim environment, is shown in Fig. 6.



Fig. 6. A view of a real robotic workplace

**Conclusions.** The problem solved was focused on creating a virtual robotic workplace in the MotoSim environment according to a real model. The goal of the work was to analyze the current state of the workplace, create its 3D model and then create a program for simulating the functionality of this environment. Due to the limitations of the MotoSim program in the area of creating 3D models, the workplace model was created in the CAD program Creo PTC. Off-line programming in the MotoSim environment is not the same as programming on a real robot. Manipulation functions cannot be simulated with the same program that would be created for real robot operations. Therefore, the created simulation could not be used for a real application, but it was necessary to modify the program so it could be imported into a real robot. After modifying the program, the proposed simulation was verified at a real workplace.

The proposed robotic workplace solution met the basic goal of a functional educational workplace for working with the Yaskawa robot, where it is possible to carry out teaching (training) online at the workplace, or offline from a computer room equipped with licenses for the MotoSim environment.

### Acknowledgements

This article was created thanks to the KEGA project support: 020TUKE-4/2022 Development and implementation of new approaches in teaching industrial and collaborative robotics and project VEGA: 1/0215/23 Research and development of robotic workplaces equipped with industrial and collaborative robots.

### References

1. Bedaka, A.K., Vidal, J. & Lin, C.Y. (2019). Automatic robot path integration using three-dimensional vision and offline programming. *Int J Adv Manuf Technol* 102, 1935–1950. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-03282-w>.
2. KUKA. *Smart simulation software KUKA.Sim*. [https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/software/planning-project-engineering-service-safety/kuka\\_sim](https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/software/planning-project-engineering-service-safety/kuka_sim).
3. ABB. *Offline programming tool for robotics Robot Studio*. <https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio/robotstudio-desktop>
4. RoboDK. *Simulate Robot Applications*. <https://robodk.com>.
5. Siemens. *Robotics programming and simulation TECNOMATIX*. <https://plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/robotics-programming-simulation/>
6. YASKAWA. *Industrial robot GP8*. <https://www.motoman.com/en-us/products/robots/industrial/assembly-handling/gp-series/gp8>.
7. YASKAWA. *Robot programming simulator MotoSim*. <https://www.motoman.com/en-us/products/software/simulation>.
8. Holubek, R., Delgado Sobrino, D.R., Košťál, P., Ružarovský, R. (2014). Offline Programming of an ABB Robot Using Imported CAD Models in the RobotStudio Software Environment. *AMM* 693, 62–67. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.693.62>.
9. Kaczmarek, W., Lotys, B., Borys, S., Laskowski, D., Lubkowski, P. (2021). Controlling an Industrial Robot Using a Graphic Tablet in Offline and Online Mode. *Sensors*, 21, 24-39. <https://doi.org/10.3390/s21072439>.
10. Guhl, J., Nikoleizig, S., Heimann, O., Hügler, J., Krüger, J. (2019). Combining the Advantages of On- and Offline Industrial Robot Programming, *24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Zaragoza, Spain, pp. 1567-1570, doi: 10.1109/ETFA.2019.8869495.
11. Marcinko, P., Kovaľuk, D. (2022). The use of SmartComponents in the design of complex robotic workplaces. *Technical Sciences and Technologies*, (2(29)), 52-58. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3\(33\)-76-82](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3(33)-76-82).
12. Robotmaster. <https://www.robotmaster.com/en/newsroom/offline-robot-programming-software>.

**Давид Ковалюк<sup>1</sup>, Ян Семйон<sup>2</sup>, Матус Сабол<sup>3</sup>, Матус Грабчак<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри виробничих систем і робототехніки  
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)  
**E-mail:** [david.kovaluk@student.tuke.sk](mailto:david.kovaluk@student.tuke.sk)

<sup>2</sup>доцент, доцент кафедри виробничих систем і робототехніки  
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)  
**E-mail:** [jan.semjon@tuke.sk](mailto:jan.semjon@tuke.sk), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9076-7808>  
**ResearcherID:** ААН-6272-2019, **Scopus Author ID:** [55571411200](https://orcid.org/0000-0002-9076-7808)

<sup>3</sup>аспірант кафедри виробничих систем і робототехніки  
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)  
**E-mail:** [matus.sabol@student.tuke.sk](mailto:matus.sabol@student.tuke.sk)

<sup>4</sup>інженер кафедри виробничих систем і робототехніки,  
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)  
**E-mail:** [matus.hrabcak@student.tuke.sk](mailto:matus.hrabcak@student.tuke.sk)

**ДИЗАЙН РОБОТИЗОВАНОГО НАВЧАЛЬНОГО РОБОЧОГО МІСЦЯ  
В ОФЛАЙН-СЕРЕДОВИЩІ З YASKAWA ROBOT**

У статті йдеться про створення 3D моделей окремих частин роботизованого робочого місця в середовищі *Creo Parametric*. Роботизоване робоче місце складалося з двох реверсивних конвеєрів, палетизатора, депалетизатора та системи автоматичної зміни інструменту. У лотку для інструментів було два пневматичних захвати від *SMC* і *Parker Kuroda*, здатні захоплювати як обертові, так і неповоротні частини за допомогою пальців, створених на 3D-принтері з матеріалом *PLA*. Система автоматичної заміни інструментів від компанії *SMC* забезпечувала пневматично кероване від'єднання фланців окремих захватів, а також передачу сигналів на датчики кінцевих положень окремих ефекторів. Створені моделі компонентів робочого місця були згодом імпортовані в офлайн-середовище *MotoSim*, де вони були зібрані у тому вигляді, в якому вони знаходяться на реальному робочому місці. У подальшому було реалізовано проектування трьох варіантів технологічного рішення монтажу з використанням б/в пневмозахватів. При виконанні моделювання в середовищі *MotoSim* в основному використовувалися об'єкти ротаційної форми розміром  $\varnothing 20 \times 50$  мм, що зберігалися на технологічних піддонах. Оскільки середовище *MotoSim* не містить функції «вибери та розмісти», необхідно було створити симуляцію за допомогою функції «Менеджер сценаріїв моделі». В якості робота використовувався промисловий робот компанії *Yaskawa* під назвою *GP8*, оснащений системою управління *YRC 1000*, здатний переносити вантаж на відстань 727 мм з максимальною вагою 8 кг. Обраний варіант з використанням палетайзера для штабелювання технологічних піддонів згодом був імпортований на реальне робоче місце, де був налагоджений та протестований. Мета пропозиції полягала в тому, щоб створити освітнє робоче місце, де можна було б проводити викладання або навчання онлайн безпосередньо за допомогою підвіски на роботі *Yaskawa GP8* або офлайн в освітньому середовищі *MotoSim EG-VRC*.

**Ключові слова:** офлайн середовище; *Yaskawa GP8*; *MotoSim*; навчальне робоче місце; *Creo PTC*.

Рис.: 6. Бібл.: 12.

**Jaroslav Melko<sup>1</sup>, Rudolf Jánoš<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD Student of the Department of Production Systems and Robotics  
Technical University of Košice (Košice, Slovakia)

E-mail: [jaroslav.melko@tuke.sk](mailto:jaroslav.melko@tuke.sk)

<sup>2</sup>Associate Professor, Associate Professor of the Department of production systems and robotics,  
Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)

E-mail: [rudolf.janos@tuke.sk](mailto:rudolf.janos@tuke.sk), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5754-9278>

ResearcherID: AAH-5449-2019. Scopus Author ID: 55016528600

**DESIGN OF AN ENERGY-SAVING ENGINE  
FOR A VEHICLE POWERED BY PNEUMATIC PISTONS**

*This article presents a comprehensive study on the mechanical design and optimization of a vehicle's power unit, focusing on enhancing performance and maneuverability for competitive scenarios. Preliminary tests have demonstrated the reliability of the power unit under various conditions; however, specific challenges, such as rear wheel lock-up during backward maneuvers, necessitate further investigation. The research aims to develop a clutch or reverse drive mechanism to improve maneuverability and assess the current transmission system for optimal torque delivery while maintaining an effective speed range. Additionally, the study examines the integration of the power unit with the kinematic structure, ensuring a cohesive design that maximizes operational efficiency. Long-term reliability under competitive stress and user feedback from operators will also be considered to refine the vehicle's functionality. By addressing these objectives, the research seeks to contribute innovative solutions that enhance the vehicle's overall performance and competitiveness in future events.*

**Keywords:** Pneumatic vehicle, pneumatics piston, compressed air, rack and pinion gear

Fig.: 4. References: 10.

**Relevance of the research.** The research focuses on the mechanical design and performance of a vehicle's power unit, emphasizing the importance of structural integrity and operational efficiency. On completion of preliminary tests without issues indicates a robust mechanical configuration, highlighting the reliability of the power unit under various conditions.

Additionally, optimizing the transmission range to maximize torque while maintaining an effective speed range is crucial for improving acceleration. This optimization not only enhances performance but also contributes to the overall efficiency and effectiveness of the vehicle in competitive environments. Thus, the research is relevant for advancing vehicle technology and ensuring optimal performance in future competitions.

**Problem statement.** The current design of the vehicle's power unit has been successfully tested and verified under preliminary conditions; however, specific challenges remain unaddressed that could hinder performance in competitive scenarios. The primary issue is related to the kinematic structure, which results in the rear wheels locking when attempting to push the vehicle backward. This limitation restricts maneuverability and operational flexibility, making it difficult for the vehicle to perform effectively in various situations.

Additionally, there is a need of investigating the optimal range of the transmission system. The existing gearing configuration may not provide the maximum possible torque at the wheels, which is essential for efficient acceleration. Without proper optimization, the vehicle may fail to reach its full potential in terms of speed and responsiveness.

**Analysis of recent research and publications.** Recent studies in vehicle dynamics and powertrain optimization have highlighted the importance of efficient torque transfer and gear selection for enhancing performance in competitive environments. Furthermore, publications on gear ratio optimization indicate that fine-tuning the transmission system can significantly impact acceleration and overall vehicle efficiency. Studies suggest that a well-designed transmission can maximize torque output while maintaining a manageable speed range, ultimately leading to improved performance metrics. Overall, the analysis of recent literature underscores the need for continuous innovation in vehicle design, particularly in addressing the challenges of power delivery and drivetrain efficiency, to ensure optimal performance in competitive settings [1; 2].

**Uninvestigated parts of a common problem.** Despite significant advancements in vehicle design and performance optimization, several aspects remain underexplored, particularly regarding the integration of new technologies into existing systems. One such area is the interaction between the power unit and the kinematic structure, specifically how various configurations can influence the vehicle's maneuverability and performance during backward movement. While some studies have addressed individual components, comprehensive research focusing on the entire system's dynamics is limited.

**Research objective.** The primary objective of this research is to enhance the performance and maneuverability of the vehicle's power unit by addressing specific challenges related to its kinematic structure and transmission system.

**The statement of basic materials.** Pneumobil is an international competition of single-seat, compressed-air-powered vehicles designed for university students. It is organized by Aventics Hungary Kft., a company involved in the production and sale of compressed air systems. The competition has been held annually since 2008 in the Hungarian city of Eger. In 2008, 16 Hungarian teams participated with relatively primitive vehicles, with the highest speed achieved being 25 km/h and a range of 7 km. By the 11th edition, the maximum speed had exceeded 50 km/h, and the range reached 13 km. For the 12th edition of the competition, apart from our team, 48 other teams from 8 European countries registered [3].

**Technical limitations of the propulsion unit and competition disciplines.** The motor must be powered by compressed air. The direct use of any other form of energy to drive the vehicle is prohibited; however, it is allowed to use a heat exchanger to warm the compressed air. Recirculation systems that return air back into the system are also permitted, but they must be powered by compressed air.

The conversion of compressed air energy into mechanical work must be done using pneumatic cylinders and valves provided by Aventics. The use of any pneumatic components from other manufacturers is prohibited.

A maximum of four pneumatic cylinders can be used, selected from a catalog specifically assembled for the competition. Only linear double-acting actuators with piston diameters ranging from 32mm to 100mm and strokes from 80mm to 500mm are available.

The maximum allowed working air pressure is 0.1 MPa.

The vehicle may be equipped with only one motor, defined as a mechanism with a single output shaft. The deactivation of any cylinder can only be performed pneumatically or electro-pneumatically.

The motor can extend up to 200mm in front of the silhouette of the front wheels or 200mm behind the silhouette of the rear wheels, but these parts must be protected by a frame welded to the vehicle frame and covered by a protective shield. The highest mechanical part of the motor must not exceed 60% of the vehicle's width in height. The motor must be visible to the jury [6-10].

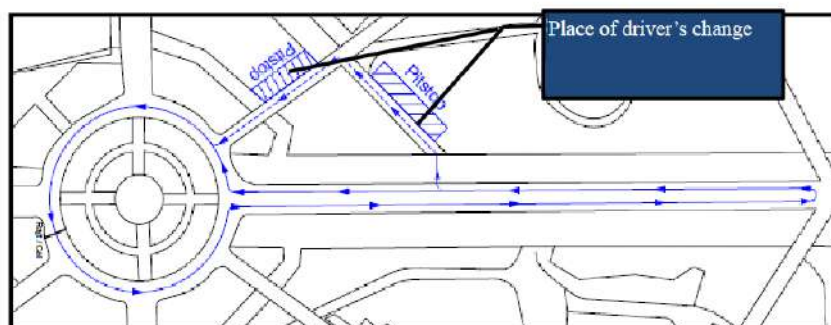
The competition consists of the following disciplines:

**Long-distance race.** The goal of this discipline is to cover the longest distance on a single container of compressed air provided by the organizer. The competition takes place on a circuit approximately 580 meters long. During this discipline, drivers must be changed at least three times. The average speed of the vehicle across all completed laps must be at least 15 km/h, and the time required to change drivers is included in the average speed calculation. The time and distance of the last, incomplete lap are not included in the average speed calculation, but the distance of the incomplete lap is included in the total distance covered.

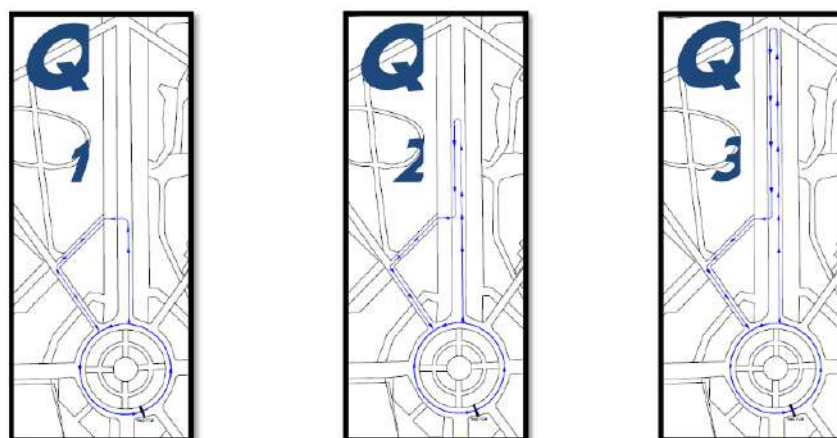
**Arcade race.** In this discipline, the dynamic driving characteristics of the vehicle and the driver's skills are key. The race takes place on three different tracks. In the first slalom, all teams participate on a 700m long track, and the time to complete two laps is measured. The 18 fastest teams advance to the second round on a different 900m long track. The six fastest teams from the second round move on to the final, third round, where they race on a 1100m long track. In this round, the final ranking of winners is determined.

**Acceleration race.** The objective is to complete a straight 220m long track in the shortest time possible, focusing on acceleration and maximum vehicle speed. The maximum speed of the vehicle is also measured at the finish line, but this is only for informational purposes in the results list, and the winning team is the one with the shortest time [10].

Long-distance race



Arcade race



Acceleration race

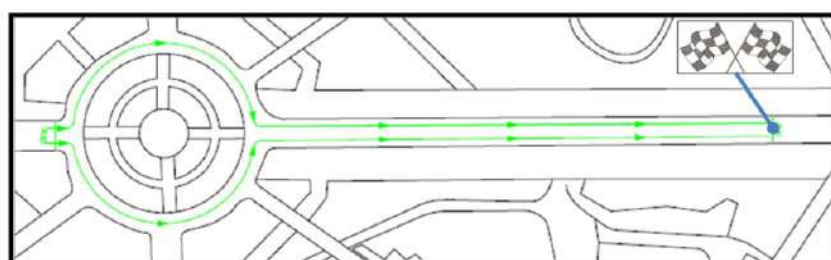
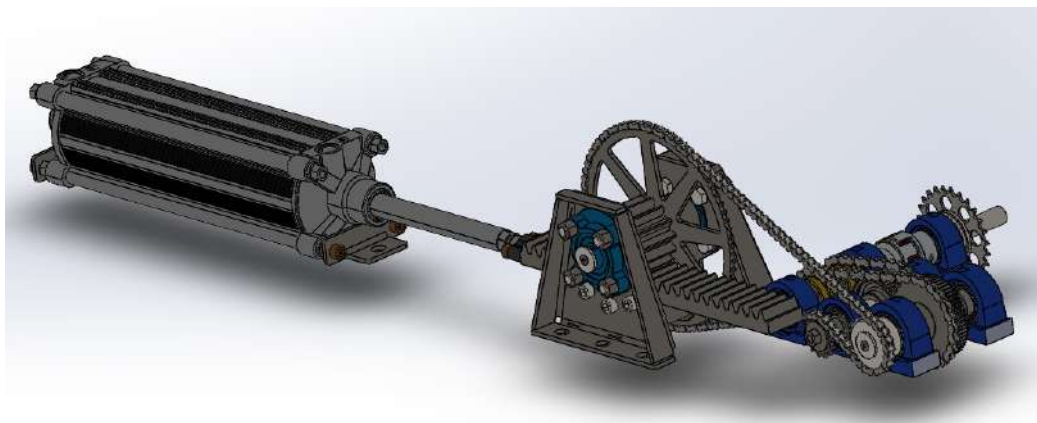


Fig. 1. Layout of competition track

The main criteria for selecting the propulsion unit were a low center of gravity, the possibility of symmetrical placement within the vehicle, and the option for variable cylinder operation. For these purposes, a rack-and-pinion transmission appeared to be ideal. The single-sided rack uses a rack with teeth on one side, along which a gear wheel rolls. The oscillating movement of the gear wheel is converted into unidirectional rotation further in the kinematic structure, as shown in the diagram (Fig. 2) [4].

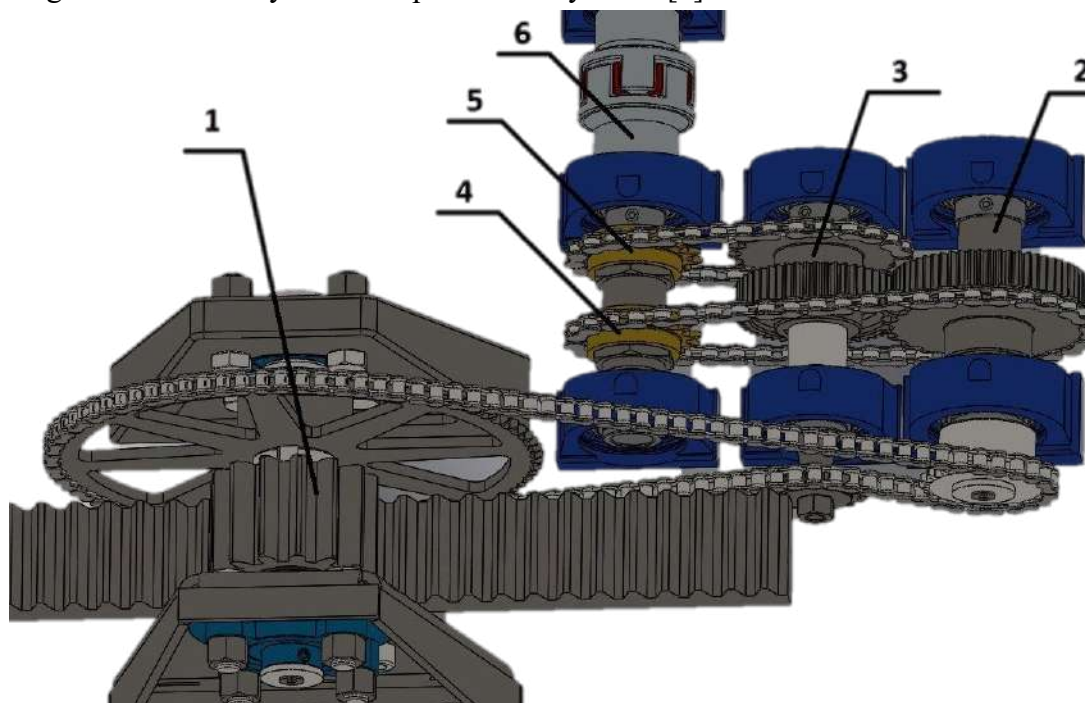




*Fig. 2. One-sided rack transmission*

The kinematic structure of the single-sided rack transmission is shown in Figure 3. As the piston rod extends, the gear and sprocket wheel (1) rotate in the positive direction, and this rotational motion is transmitted via a chain to the shaft (2). From shaft (2), the motion is transferred via a chain to the freewheel (4), which rotates the output shaft (6). Simultaneously, the rotational motion from shaft (2) is transferred to shaft (3) through a gear train, causing shaft (3) to rotate in the negative direction. The rotational motion from shaft (3) is transmitted via a chain to the freewheel (5), which freely rotates on shaft (6) in the negative direction, not affecting its motion [5].

When the piston rod retracts, the directions of rotation of the shafts and freewheels reverse, and torque is transferred to shaft (6) in the positive direction from freewheel (5), while freewheel (4) rotates freely. By this, we achieve a positive torque direction on the output shaft (6) throughout the entire cycle of the pneumatic cylinder [6].



*Fig. 3. Kinematics of the single-sided rack drive*

Drive sizing: The sizing and design of the propulsion unit will begin with the rack, as we know the maximum force in the piston rod, which is equal to:

$$F_p = \pi \cdot \left(\frac{d_{piest}}{2}\right)^2 \cdot p_{max} \cong 7854N \tag{1}$$

where:

- $F_p$  ... force in the piston rod
- $d_{piest} = 100\text{mm}$  ... diameter of the piston
- $p_{max} = 1\text{MPa}$  ... maximum air pressure allowed by the cylinder manufacturer

The gear module influences many design parameters, so it is often selected based on an estimate. From this, other gear parameters are determined, and then a strength check is performed to verify if the chosen module is suitable. Since various qualitative parameters of the specific gear are needed for the calculation, we select a potential gear and rack from the supplier's catalog at this stage. In our case, we chose:

- $m_n = 5\text{mm}$  ... gear module in the normal plane
- $z_1 = 14$  ... number of teeth on the pinion (with allowable undercut)
- $b = 50\text{mm}$  ... width of the rack and pinion
- $r_1 = 35\text{mm}$  ... pitch radius of the pinion

For gears, the load-bearing capacity of the teeth is checked for bending and contact stresses.

**Sizing the first shaft**, which will transfer torque from the selected pinion. The torque from this shaft will be transferred to a sprocket placed on the shaft next to the pinion. As will be shown, this shaft is subjected to a combination of bending and torsional moments. The bending moment along the length of the shaft depends on its dimensions and the placement of the pinion and sprocket, so a preliminary model must first be created. It is clear that to minimize the bending moment, it is advantageous to design the shaft as short as possible, with the pinion and sprocket placed as close to the bearings as possible. However, it is also necessary to consider various dimensional constraints of the propulsion unit. After considering these requirements, a preliminary 3D model was created, showing the forces acting on the shaft, as illustrated in Fig. 4 [4; 5].

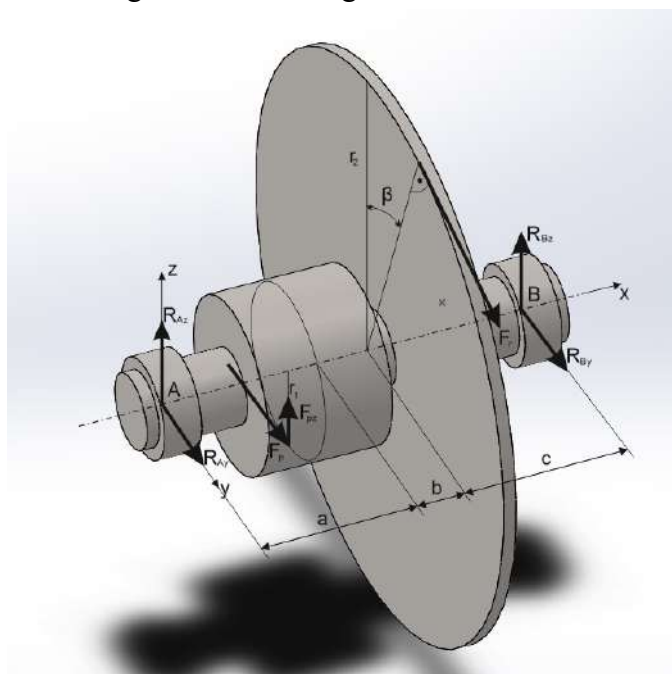


Fig. 4. The computational model of a shaft

- $a = 53\text{mm}$  ... the distance between the center of bearing A and the center of the pinion
- $b = 37.5\text{mm}$  ... the distance between the centers of the pinion and the sprocket
- $c = 55\text{mm}$  ... the distance between the centers of the sprocket and bearing B



$r_1 = 35\text{mm}$  ... pitch radius of the pinion

$r_2 = 115\text{mm}$  ... the pitch radius of the sprocket

$\beta = 27^\circ$  ... chain angle relative to the y-axis

$F_p = 7854\text{N}$  ... force in the piston rod during extension

$F_{pz}$  ... radial force on the pinion caused by the engagement angle of the involute gearing

$F_r$  ... force in the chain of the sprocket

$R_{Ay}$  ... reaction component in bearing A in the direction of the y-axis, other reactions are analogous according to the indices.

We calculate the force  $F_{pz}$  as:

$$F_{pz} = F_p \cdot \text{tg} \alpha \cong 2860\text{N}, \quad (2)$$

where  $\alpha = 20^\circ$  is the pressure angle of the selected gear. The force in the chain,  $F_r$ , is determined from the moment condition around the x-axis. Since the lines of action of forces  $F_p$  and  $F_r$  are the only ones that do not intersect the x-axis, the moment condition is expressed as:

$$F_p \cdot r_1 = F_r \cdot r_2. \quad (3)$$

By substituting the known values, we obtain the force  $F_r \cong 2390\text{N}$ . Based on this force, we can now select a suitable chain. It is clear that the torque is transmitted by the section of the shaft between the pinion and the sprocket, and it can be calculated as:

$$M_{kl} = F_p \cdot r_1 = F_r \cdot r_2 \cong 275\text{Nm}. \quad (4)$$

For the calculation of reactions in the bearings and bending moments in the shaft, we can now move the points of application of forces  $F_p$  and  $F_r$  to the x-axis, as their previously calculated rotational effect is irrelevant for this calculation. It is appropriate to solve the task by projecting into the  $xy$  and  $xz$  planes. The force in the chain  $F_r$  is the only one that has projections in both planes.

$$\begin{aligned} F_{ry} &= F_r \cdot \cos \beta \cong 2130\text{N}; \\ F_{rz} &= F_r \cdot \sin \beta \cong 1085\text{N}. \end{aligned} \quad (5)$$

The components of the reactions are calculated from the moment conditions around points A and B and using the method of an imaginary cut, we determine the course of the bending moment  $M_{oz}$ . We obtain the components of the reactions in the bearings:

$$\begin{aligned} R_{Az} &\cong -1408\text{N}; \\ R_{Bz} &\cong -367\text{N}. \end{aligned} \quad (6)$$

We calculate the course of the bending moment, and the critical point is at the location of the pinion where  $x = a$ . At this point, the torque  $M_{kl} = 275\text{Nm}$  acts, and the bending moment is:

$$M_o = \sqrt{M_{oy}^2 + M_{oz}^2} \cong 316\text{Nm}. \quad (7)$$

For the reduced stress according to the HMM strength theory, which is suitable for materials in a ductile state:

$$d = \sqrt[6]{\frac{(32 \cdot M_o)^2 + 3 \cdot (16 \cdot M_k)^2}{(\pi \cdot \sigma_{red})^2}}. \quad (8)$$

If we substitute the allowable stress  $\sigma_d = 140\text{MPa}$  (selected from engineering tables for the chosen material, steel C50) into the given relationship for  $\sigma_{red}$ , we obtain a minimum allowable diameter of the component  $d_{\min} = 30\text{mm}$  at this stress level. For the transmission of torque from the

pinion to the shaft, we will use a tight fit, so the reduction in cross-section due to the groove must be taken into account during dimensioning. Similarly, we could calculate the minimum allowable diameter of the shaft at each cross-section from the computed bending and torque moments. However, from a design perspective, the shaft must have cylindrical surfaces due to the bearings.

The focus is on determining the minimum cross-section for the bearings, as the bending moments in this part of the shaft are significantly smaller and the torque is completely absent. It is also necessary to check the shaft during the retraction of the piston rod, as the force during retraction is lower than during extension, and the sliding effects of the forces in the chain and piston rod cancel each other out (they were summed during extension). Therefore, we can conclude that the stresses during the retraction of the piston rod will be lower. If the calculated parameters of the shaft significantly differ from the preliminary design, we can adjust the design based on these parameters, which may change the input parameters, and the shaft must be re-calculated from scratch.

**Conclusions.** By the time of completing this article, the vehicle was already mechanically complete. Preliminary tests in the interior on supports and the road at reduced filling pressure without a functioning transmission showed no issues with the power unit, so we can consider the task accomplished.

From the perspective of the power unit, the task for the next competition year is to design a clutch or reverse drive, as the current kinematic structure causes the rear wheels to lock up when attempting to push the vehicle backward. It would also be advisable to examine the usability of the transmission range with the current gearing and optimize it to achieve the maximum possible torque at the wheels for acceleration while maintaining a usable speed range.

**Acknowledgements.** This research was supported by project KEGA: 020TUKE-4/2022 Development and implementation of new approaches in teaching industrial and collaborative robotics and VEGA: 1/0215/23 Research and development of robotic workplaces equipped with industrial and collaborative robots.

### References

1. Demko, Michal. Analýza hnacej sústavy pre vozidlo poháňané stlačeným vzduchom. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2018. vedúci bakalárskej práce Ing. Peter Tuleja, PhD.
2. Palko, Maroš. návrh experimentálneho vozidla poháňaného stlačeným vzduchom. košice: Technická univerzita v Košiciach, 2018. vedúci diplomovej práce Ing. Peter Tuleja, PhD.
3. Hajduk, Mikuláš; tuleja, peter. základy pneumatických mechanizmov i. výroba, úprava a rozvod stlačeného vzduchu a vákua. košice: Technická univerzita v Košiciach, 2013, isbn 978-80-553-1605-5
4. smc industrial automation. smc training – stlačený vzduch a jeho využití.
5. hydraulics & pneumatics. pneumatic rotary actuators: back to school. [online] <https://www.hydraulicspneumatics.com/cylinders-actuators/pneumatic-rotary-actuators-back-school>.
6. Swallow dental supplies limited. w&h alegra dental turbine handpieces with led. [online] <https://www.swallowdental.co.uk/alegra-dental-turbine-handpieces-with-led.html>.
7. Indiamart. industrial pneumatic actuator. [online] dostupné na internete: <https://www.indiamart.com/proddetail/pneumatic-actuator-8805701212.html>.
8. hydraulics & pneumatics. checklist for matching air cylinders to load requirements. [online] <https://www.hydraulicspneumatics.com/cylinders-amp-actuators/checklist-matching-air-cylinders-load-requirements>.
9. Parker. know your pneumatics: single or double acting? choosing the right cylinder. [online] <http://blog.parker.com/know-your-pneumatics-single-or-double-acting-choosing-the-right-cylinder>
10. Pneumobil.hu. [online] <<https://en.pneumobil.hu/>> 11.9.2024.

Отримано 20.09.2024

**Ярослав Мелко<sup>1</sup>, Рудольф Янош<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> аспірант кафедри виробничих систем і робототехніки  
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)

**E-mail:** [jaroslav.melko@tuke.sk](mailto:jaroslav.melko@tuke.sk)

<sup>2</sup>доцент, доцент кафедри виробничих систем і робототехніки,  
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)

**E-mail:** [rudolf.janos@tuke.sk](mailto:rudolf.janos@tuke.sk). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5754-9278>

**ResearcherID:** AАН-5449-2019. **Scopus Author ID:** [55016528600](https://orcid.org/0000-0002-5754-9278)

**КОНСТРУКЦІЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ДВИГУНА ДЛЯ АВТОМОБІЛЯ  
З ПНЕВМАТИЧНИМ ПОРШНЕВИМ ПРИВОДОМ**

*Ця стаття являє собою комплексне дослідження механічної конструкції та оптимізації силового агрегату транспортного засобу, зосереджуючись на підвищенні продуктивності та маневреності для конкурентних сценаріїв. Попередні випробування показали надійність силового агрегату в різних умовах; однак специфічні проблеми, такі як блокування заднього колеса під час маневрів назад, вимагають подальшого дослідження. Дослідження спрямоване на розробку механізму зчеплення або приводу заднього ходу для покращення маневровості та оцінки поточної системи трансмісії для оптимальної доставки крутного моменту при збереженні ефективного діапазону швидкості. Крім того, у дослідженні вивчається інтеграція силового агрегату з кінематичною структурою, забезпечуючи цілісну конструкцію, яка максимізує ефективність роботи. Довгострокова надійність в умовах конкурентного стресу та відгуки користувачів від операторів також будуть розглянуті для покращення функціональності автомобіля. Вирішуючи ці цілі, дослідження намагається здійснити внесок в інноваційні рішення, які підвищать загальну продуктивність автомобіля та конкурентоспроможність у майбутніх подіях.*

**Ключові слова:** пневматичний транспортний засіб; пневматичний поршень; стиснене повітря; рейкова передача.

*Рис.: 4. Бібл.: 10.*

**Patrik Pilát<sup>1</sup>, Ján Semjon<sup>2</sup>, Jozef Varga<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D student of the Department of Production Systems and Robotics, Prototyping and Innovation Centre (PaIC)  
Technical University of Košice (Košice, Slovakia)

E-mail: [patrik.pilat@tuke.sk](mailto:patrik.pilat@tuke.sk), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5399-7000>, ResearcherID: [LEN-0137-2024](https://orcid.org/LEN-0137-2024)

<sup>2</sup>Associate Professor, Associate Professor of the Department of production systems and robotics  
Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)

E-mail: [jan.semjon@tuke.sk](mailto:jan.semjon@tuke.sk), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9076-7808>

ResearcherID: [AAH-6272-2019](https://orcid.org/AAH-6272-2019), Scopus Author ID: [55571411200](https://orcid.org/55571411200)

<sup>3</sup>Researcher at the Prototyping and Innovation Centre (PaIC)

Technical University of Košice (Košice, Slovakia)

E-mail: [jozef.varga.2@tuke.sk](mailto:jozef.varga.2@tuke.sk), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7488-6102>

ResearcherID: [AAD-8014-2020](https://orcid.org/AAD-8014-2020), Scopus Author ID: [56268363400](https://orcid.org/56268363400)

## DESIGN OF THE FOUR-WHEELED MOBILE ROBOTIC PLATFORM FOR DECONTAMINATION TASKS

This article presents the design of a four-wheeled mobile platform for a special service robot, intended to clean contaminated areas in the hot gas chamber of a nuclear power plant reactor. The reactor, KS-150, was part of Czechoslovakia's early nuclear energy development and encountered two significant accidents, leading to its decommissioning. Decommissioning efforts now require the removal of contaminated deposits from the reactor's hot gas chamber, a challenging task due to restricted access and radiation levels. The proposed solution involves using a mobile service robot to replace human workers in hazardous conditions, ensuring safety and efficiency. Five chassis designs were evaluated based on criteria such as energy consumption, structural complexity, contamination risk, and maneuverability. The selected design is a four-wheeled chassis with two steered wheels. The robot's mobility subsystem is a fundamental part of the overall design, supporting various attachments, including a robotic arm, a front brush, and a detachable container for waste removal. The design offers a robust and efficient solution for cleaning contaminated environments, contributing to safer decommissioning processes in nuclear facilities.

**Keywords:** mobile robot platform; four-wheeled robot; mechatronic design.

Fig.: 8. Table: 1. References: 10.

**Relevance of the research.** The KS-150 nuclear reactor (Fig. 1), developed in Jaslovské Bohunice, marked the beginning of Czechoslovakia's nuclear energy industry [1]. Its construction and commissioning were significant challenges for the industry at the time. This type of reactor, which used heavy water and natural metallic uranium as fuel, had an electrical output of 127 MW. The project was particularly notable for its use of natural uranium.

Construction of the reactor began in 1958, and in October 1972, the first controlled chain reaction was successfully achieved in the A1 nuclear power plant reactor. However, two accidents occurred during the operation of the A1 plant.

The first accident occurred on January 5, 1976, when a fuel assembly was unexpectedly ejected during a fuel replacement operation. The reactor was repaired and brought back into operation by the end of the year.

The second accident happened on February 22, 1977, caused by the rupture of a silica gel packet, which spilled its contents among the fuel elements, leading to the melting of one of the fuel cartridges. The subsequent contamination of both the primary and secondary circuits made further operation of the A1 plant impossible, and it was permanently decommissioned in 1979.

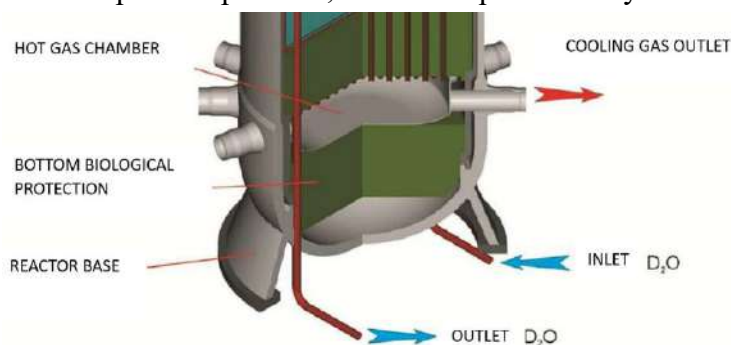


Fig. 1. The lower part of the Czechoslovak heavy water reactor KS150

**Problem statement.** According to the International Nuclear and Radiological Event Scale (INES), this accident was rated at level 4. Today, the reactor, including the hot gas chamber, is being gradually decommissioned [2; 3].

Before the hot gas chamber can be decommissioned, the contaminated deposits must first be removed. This process is challenging due to both the access to the chamber and the environmental conditions. The use of a mobile service robot is essential for this task [4].

**Analysis of recent research and publications.** The International Atomic Energy Agency (IAEA) recommends the use of mobile service robots in nuclear power plants due to the benefits they provide, such as replacing humans in hazardous environments, increasing efficiency and safety, and reducing costs [5].

**Isolation of previously unexplored parts of the general problem.** Currently, there are many universal mobile service robots available, but their versatility often does not meet the required level. In this case, it is necessary to develop a solution that fully meets the specific requirements. These requirements include exploration, dismantling operations, decontamination in areas with radiation [6].

**Research objectives.** Modern mobile service robots share common design elements and solution concepts. The overall system is divided into several subsystems, each of which is functionally and structurally interconnected. These subsystems typically include the mobility subsystem, the action superstructure subsystem (modules), the internal sensor subsystem, the external sensor subsystem, the control and navigation subsystem, the operator interface subsystem, and the energy support subsystem [7; 8]. The goal of this research is the design of the mobility subsystem.

**Requirements for the four-wheel mobile platform for a special service robot.** The requirements for the mobile platform are influenced by the environment in which the robot will be deployed and the tasks it will perform. The working environment of the mobile service robot is the hot gas chamber (Fig.2), where the bottom, the subject of cleaning, is angled at  $34,2^\circ$ . Access to the chamber will be provided through a circular opening with a diameter of 380 mm, which is based on a mobile platform and a key dimension for the design of the mobile platform and another subsystem.

The robot's design is also influenced by the pipes located at the bottom of the chamber. The radiation level in the hot gas chamber is 15 mSv/h, which is critical for the design of electronics. The ambient temperature is approximately  $20^\circ\text{C}$ .



*Fig. 2. Pollution in the hot gas chamber of the KS 150 reactor*

Based on these conditions, we proposed five types of chassis (Fig.3) and selected the most suitable one. We considered five types: a tracked chassis and four variants of wheeled chassis, differing in the number of wheels and steering methods.

In the first variant, the wheeled chassis has two axles with four wheels. The second variant includes a wheeled chassis with six wheels and three axles. The third variant contains the same number of axles and wheels as variant two. From the point of view of steering, we will divide the first variant into a sub-variant with slip differential steering and a sub-variant with two controlled directional wheels.

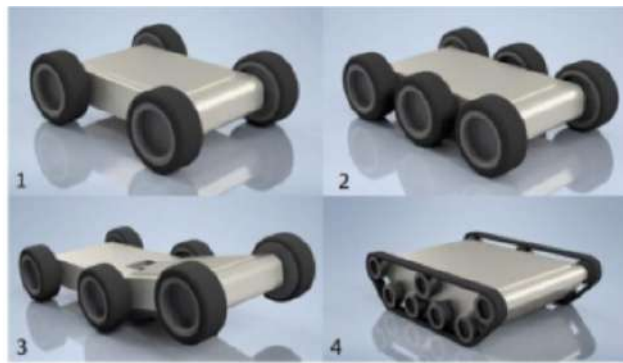


Fig. 3. Chassis variants [9]

We evaluated these 5 variants according to the following aspects:

- energy consumption,
- structural complexity,
- weight,
- complexity of production,
- contamination,
- maneuverability.

We assigned each aspect a priority from 0 to 5, where 5 represented the highest priority, and then assigned each variant a score from 0 to 10. The results are shown in Table.

Table – Chassis comparison

Aspects	Factor of importance	Variant č. 1	□Σ	Variant č. 1.1	□Σ	Variant č. 2	□Σ	Variant č. 3	□Σ	Variant č. 4	□Σ
Energy consumption	2	9	18	9	18	7	14	6	12	5	10
Structural complexity	2	9	18	9	18	6	12	6	12	4	8
Complexity of maintenance	3	5	15	8	24	7	21	7	21	5	15
Weight	3	10	30	10	30	7	21	6	18	6	18
The complexity of production	2	9	18	8	16	8	16	7	14	5	10
Contamination	4	10	40	10	40	7	28	7	28	5	20
Maneuverability	5	9	45	9	45	8	40	7	35	9	45
Result value			184		191		152		140		126

After evaluating all the aspects, we concluded that variant 1.1, a four-wheeled chassis with two steered wheels, is the most suitable for our needs.

**Design of the four-wheeled mobile platform.** The mobile platform design begins with selecting the servo motors that will ensure movement and wheel steering. Then, we will design the shape and material of the wheels. Since the servo motors cannot be directly attached to the platform frame, we will create mounts for them. The front and rear parts of the divided frame will be symmetrical and connected by a pivot pin.

The output torque of the servo motors was calculated, based on the robot's movement on an inclined plane, rounding the angle of the plane to 35°.

Based on the calculations, we selected a servo motor, that integrates a motor and a harmonic gearbox. The supply voltage is 36VDC, and the maximum output torque is 30 Nm. In designing the mobile platform wheel, we used an aluminum disk (EN-AW 5083), which will be rubberized to increase the robot's traction. We determined the rubber hardness to be 75 ShA to ensure optimal adhesion and durability against wear. The frame (Fig.4) will consist of two parts connected by a pivot pin, allowing movement between the frame sections. This frame will connect

all the necessary components and subsystems of the robot. The pivot pin will be housed in a hole in the front part of the frame and secured with a locknut. The other part of the frame will be connected to the pin via a bearing housing BK15.

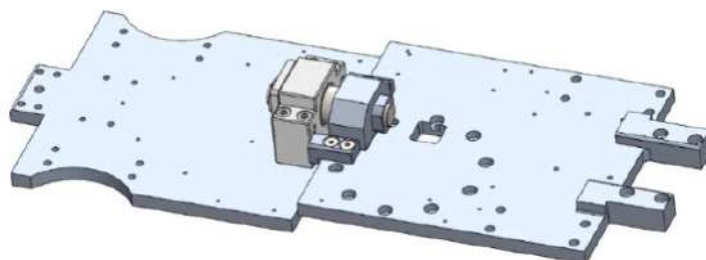


Fig. 4. Frame of the mobile platform which consist of two parts- bottom view

The main parts of the frame are the axles. The front divided axle is attached to the front part of the frame using a suspension and a drive unit that rotates the wheel. The rear divided axle is directional and ensures the robot's movement. Steering the directional wheels controls the robot's movement using Ackerman steering.

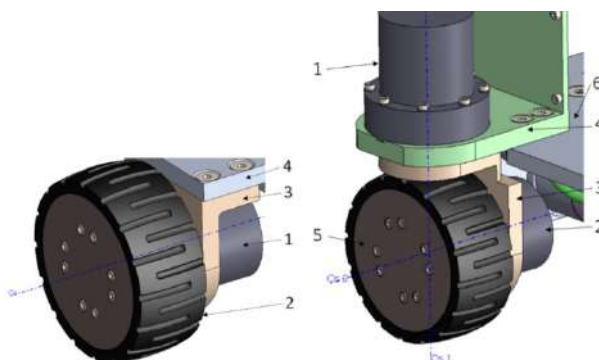


Fig. 5. Divided front and rear axles

By steering the rear wheel (Fig.5), we control the robot's movement direction. To avoid unwanted wheel slippage, we use an appropriate steering method. In this case, we employ Ackerman steering (Fig.6), which addresses the difference in steering angles between the wheels during movement. This approach ensures that the wheels follow the correct paths during turns, preventing slippage and improving maneuverability [7; 8].

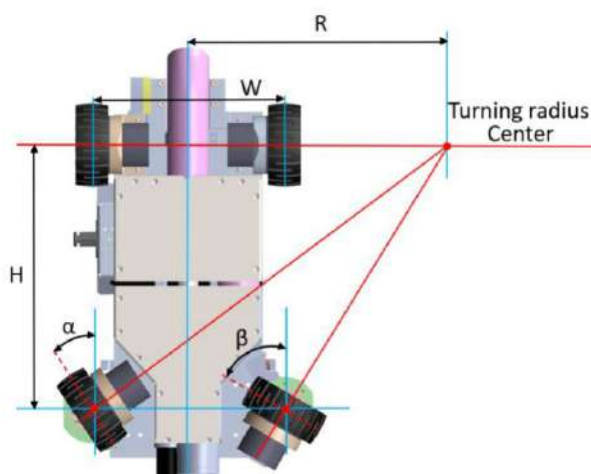
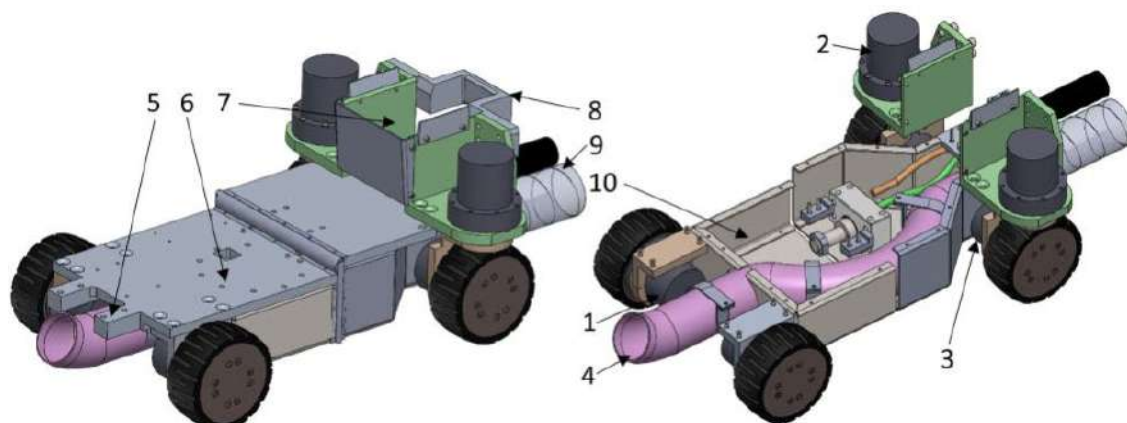


Fig. 6. Rear axle steering - bottom view on mobile platform

The overall design of the four-wheel mobile platform, which we can see in figure 7, includes a front axle and a rear directional axle.

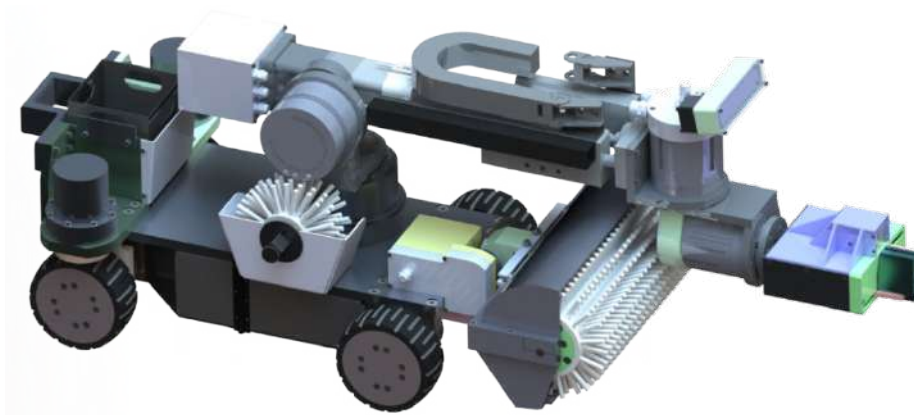


The four-wheel mobile platform functions as the foundation of the entire mobile service robot, with other subsystems connected to it. Although the specifics of these subsystems are not detailed here, they are important for consideration. To accommodate these subsystems, we made modifications to the front and rear sections of the frame. Holes (Fig. 7, P5) are provided to secure the front rotating cylindrical brush, while other holes (Fig. 7, P6) are designated for attaching the robotic arm. A removable container is positioned at the rear of the mobile service robot (Fig. 7, P7), and a hose used for extracting deposits and transporting contaminated waste from the hot gas chamber runs inside the mobility subsystem (Fig. 7, P4). In the rear section, this hose connects to another that leads outside the chamber (Fig. 7, P9). In the lower part, there is also space for electronics (Fig. 7, P9).



*Fig. 7. Model of the mobility subsystem*

Figure 8 shows a service robot with all subsystems and components installed.



*Fig. 8. Mobile platform equipped with action attachments: robotic arm, front brush, removable container*

**Conclusions.** This paper describes the design of a mobile platform for cleaning the contaminated area of a hot gas chamber. This design results in a four-wheeled chassis with a split frame connected by a pivot pin. All wheels are driven, and direction control is ensured by rotating two directional wheels. The designed mobile platform will be equipped with such active extensions as a robotic arm, a front brush, and a detachable container.

### References

1. Stubna, M., Pekar, A., Moravek, J., Spirko, M. (2002). Decommissioning Project of A1 Bohunice NPP. VUJE Trnava Inc.
2. Kuruc, J.; Mátel, E. 30. a 29. Výročie nehôd na reaktore jadrovej elektrárne A-1 Jaslovské Bohunice – rádioekologické a rádiobiologické následky. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/37/110/37110257.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/110/37110257.pdf).



3. Slovenská nukleárna spoločnosť (2010). Jadrová elektrárň A1v kocke. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/42/105/42105680.pdf?r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/105/42105680.pdf?r=1).
4. Nagatani K., Kiribayashi S., Okada Y., Otake K., Yoshida K., Nishimura, T., Yoshida, T., Koyanagi, E. (2012). Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/rob.21439>.
5. Smith, R. J., Cucco, E., Fairbairn, C. (2020). Robotic Development for the Nuclear Environment. *Challenges and Strategy, Robotics, 9(4)*, 94. <https://doi.org/10.3390/robotics9040094>.
6. Tochilin, A. V. et al. (2021). IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1047 012193.
7. Smrček, J., Kárník, L. (2008). Robotika - servisné roboty. Navrhovanie, konštrukcia, riešenia, Košice : Edícia vedeckej a odbornej literatúry - Strojnícka fakulta TU v Košiciach.
8. Novák, P. (2005). Mobilní roboty – pohony, sensory, řízení, Praha: BEN - technická literatura.
9. Batke, A. (2021). Možnosti usporiadania podvozku mobilného robota pre pohyb vo vonkajšom prostredí. <https://opac.crzp.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=1CB25EF4639541CD22CEB3031481>.
10. Luk B. L., Collie A. A., Cooke D. S. (2006). Walking and climbing service robots for safety inspection of nuclear reactor pressure vessels. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/002029400603900201>.

Отримано 17.09.2024

УДК 621.8

### **Патрік Пілат<sup>1</sup>, Ян Семйон<sup>2</sup>, Йозеф Варга<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри виробничих систем і робототехніки Центру прототипування та інновацій  
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)

E-mail: [patrik.pilat@tuke.sk](mailto:patrik.pilat@tuke.sk). ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5399-7000>. ResearcherID: [LEN-0137-2024](https://orcid.org/LEN-0137-2024)

<sup>2</sup>доцент, доцент кафедри виробничих систем і робототехніки  
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)

E-mail: [jan.semjon@tuke.sk](mailto:jan.semjon@tuke.sk). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9076-7808>  
ResearcherID: [AAN-6272-2019](https://orcid.org/AAN-6272-2019). Scopus Author ID: [55571411200](https://orcid.org/55571411200)

<sup>3</sup>дослідник Центру прототипування та інновацій (PaIC)

Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)  
E-mail: [jozef.varga.2@tuke.sk](mailto:jozef.varga.2@tuke.sk). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7488-6102>  
ResearcherID: [AAD-8014-2020](https://orcid.org/AAD-8014-2020). Scopus Author ID: [56268363400](https://orcid.org/56268363400)

## **ПРОЄКТУВАННЯ ЧОТИРИКОЛІСНОЇ МОБІЛЬНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ЗАДАЧ З ДЕЗАКТИВАЦІЇ**

Ця стаття представляє розробку чотириколісної мобільної платформи для спеціального сервісного робота, призначеного для очищення забруднених зон у гарячій газовій камері ядерного реактора КС-150, розташованого в Ясловоцьке Богуніце. Реактор КС-150, введений в експлуатацію на початку 1970-х років, зазнав двох серйозних аварій, що зрештою призвело до його постійного відключення та виведення з експлуатації. Сьогодні процес виведення з експлуатації вимагає видалення радіоактивних відкладень із гарячої газової камери, що є складним завданням через обмежений доступ, небезпечний рівень радіації та труднощі доступу до самої камери.

Враховуючи ці умови, використання мобільного сервісного робота є необхідним для заміни людських працівників і мінімізації впливу шкідливої радіації. Дослідження зосереджене на розробці підсистеми мобільності, що дозволить роботу пересуватися у вузькому просторі камери. У процесі проектування було оцінено п'ять типів шасі: гусеничний варіант і чотири колісні варіанти з різними осями та методами керування. Критерії оцінки включали енергоспоживання, структурну складність, простоту обслуговування, вагу, складність виробництва, ризик забруднення та маневреність.

Після оцінки конструкцій було обрано чотириколісне шасі з двома керованими колесами як оптимальне рішення. Ця конфігурація дозволяє точно контролювати рух і мінімізує ковзання під час роботи у вузьких просторах. Підсистема мобільності робота спроектована таким чином, щоб бути сумісною з додатковими компонентами, включаючи роботизовану руку для маніпуляції з об'єктами, передню циліндричну щітку для очищення та знімний контейнер для транспортування радіоактивних відходів. Підсистема мобільності також інтегрує систему шлангів для вилучення та транспортування забруднених відходів із камери.

На завершення, стаття детально описує технічну конструкцію надійної та ефективної мобільної платформи, здатної виконувати завдання з очищення та дезактивації у радіоактивних середовищах. Запропонована мобільна платформа відіграватиме критичну роль у забезпеченні безпечного та ефективного виведення з експлуатації ядерних об'єктів, знижуючи ризики для людських працівників і підвищуючи ефективність роботи в зонах забруднення.

**Ключові слова:** платформа мобільного робота; чотириколісний робот; мехатронна конструкція.

Рис.: 8. Табл.: 1. Бібл.: 9.

## РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-3(37)-122-131

УДК 004.89:51-7:51-8

**Галина Вікторівна Марчук<sup>1</sup>, Ольга Володимирівна Коротун<sup>2</sup>,  
Віталій Леонідович Левківський<sup>3</sup>, Микола Олександрович Українець<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>старший викладач кафедри комп'ютерних наук

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: [pzs\\_mgv@ztu.edu.ua](mailto:pzs_mgv@ztu.edu.ua). ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2954-1057>. ResearcherID: [AAD-7514-2022](https://orcid.org/0000-0003-2954-1057)

<sup>2</sup>кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: [korotun-o@ztu.edu.ua](mailto:korotun-o@ztu.edu.ua). ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2240-7891>. ResearcherID: [LPP-8040-2024](https://orcid.org/0000-0003-2240-7891)

<sup>3</sup>доктор філософії з інженерії програмного забезпечення, доцент кафедри комп'ютерних наук

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: [levkivskyy@ztu.edu.ua](mailto:levkivskyy@ztu.edu.ua). ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1643-0895>. ResearcherID: [GYU-9377-2022](https://orcid.org/0000-0002-1643-0895)

<sup>4</sup>асистент кафедри комп'ютерних наук

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: [kkn\\_umo@ztu.edu.ua](mailto:kkn_umo@ztu.edu.ua). ORCID <https://orcid.org/0009-0002-1185-491X>

### ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІГРОВИХ АГЕНТІВ

Постійний розвиток технологій машинного навчання значно впливає на ігрову індустрію. Штучний інтелект дозволяє створювати все більш складних і розумних ботів, які здатні до навчання та самовдосконалення, що відкриває нові перспективи для розробників ігор, дозволяючи їм створювати більш інтерактивні та захоплюючі ігрові світи. Це дослідження спрямоване на створення інтелектуального шахового агента, який за допомогою методів машинного навчання та алгоритмів пошуку зможе самостійно вдосконалювати свої шахові навички та адаптуватися до різноманітних стилів гри супротивників. Представлена в статті інформація має науково-методичний характер. Очікується, що розглянуті алгоритми можуть бути використані не лише у шахах, а й у інших галузях, що вимагають прийняття рішень в умовах невизначеності. Було проведено дослідження різних алгоритмів машинного навчання, включаючи традиційні методи, і такі як глибинне навчання (зокрема, згорткові та рекурентні нейронні мережі). За результатами аналізу було визначено, що глибинне навчання є найперспективнішим методом для розпізнавання складних шахових патернів та автоматичного формування ефективних стратегій. З метою оптимізації процесу прийняття рішень ботом було обрано систему штучного інтелекту AlphaZero, розроблену компанією DeepMind, яка базується на засадах глибинного навчання. AlphaZero є потужним інструментом для гри в шахи завдяки своїй здатності до самонавчання, глибинним нейронним мережам та ефективному алгоритму пошуку в дереві ходів. Вона відкриває нові горизонти в галузі штучного інтелекту й демонструє, що машини можуть не тільки перевершувати людей у складних інтелектуальних задачах, а й робити це принципово новими способами. AlphaZero не спеціалізується тільки на шахах, вона може бути адаптована для будь-якої гри, в якій ходи гравців чергуються. Це робить її дуже універсальним інструментом для дослідження штучного інтелекту.

**Ключові слова:** AlphaZero; гра; відеоігри; ігровий бот; нейронні мережі; глибинне навчання; штучний інтелект.

Рис.: 2. Бібл.: 11.

**Актуальність теми дослідження.** Використання штучного інтелекту (ШІ) в розробці ігрових ботів стало ключовим фактором у підвищенні реалістичності та складності сучасних ігор. ШІ дозволяє створювати ботів, які не просто виконують заздалегідь запрограмовані дії, а здатні адаптуватися до стилю гри кожного гравця, ухвалювати динамічні рішення та створювати непередбачувані ситуації, при цьому, ігровий процес стає більш захоплюючим та вимагає від гравців більшої стратегічної гнучкості.

**Постановка проблеми.** Створення шахового бота, здатного не тільки оптимально прораховувати ходи, а й приймати стратегічні рішення в умовах неповної інформації та постійних змін позицій на дошці, залишається складним завданням. Проблема полягає у виборі та налаштуванні алгоритмів, які зможуть ефективно поєднувати методи пошуку, аналізу й оптимізації для досягнення результатів, які наближають ШІ до рівня гри професійного шахіста. У статті представлено результати науково-методичного дослідження для вирішення цієї проблеми.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останніми роками ми стали свідками швидкого зростання впливу ШІ на різноманітні сфери, і індустрія ігор не стала винятком. Інтеграція різних моделей ШІ в ігри відкрила нові можливості для розробників,

дозволяючи оптимізувати ігрові процеси та створювати більш захопливий досвід для гравців. Зокрема, аспектам використання штучного інтелекту в іграх присвячено багато публікацій як зарубіжних, так і вітчизняних авторів [1-4].

У статті [5] проведено огляд найпопулярніших алгоритмів ШІ, які застосовуються в іграх, проаналізовано їх вплив на різні аспекти геймплею та спроби зазирнути в майбутнє, щоб зрозуміти, які перспективи відкриваються перед ШІ в ігровій індустрії. Особливу увагу було приділено тому, як ШІ використовується для оптимізації взаємодії гравців з ігровими елементами, що дозволяє створювати більш персоналізований та захоплюючий ігровий досвід.

Авторами статті [6] розглянуто як існуючі методи, так і потенційні, які можуть бути застосовані в майбутньому. Зокрема, авторами проведено аналіз можливості використання машинного навчання для оптимізації розробки, створення інтелектуальних ігрових елементів та автоматизації рутинних завдань. Незважаючи на відносну новизну, цей напрям демонструє великі перспективи для розвитку індустрії ігор. Сьогодні від штучного інтелекту очікують майже людської досконалості. Нейронні мережі допомагають досягти цього рівня, роблячи штучний інтелект розумнішим. Наприклад, компанія OpenAI використовує їх для створення надзвичайно розумних ігрових ботів. Щоб навчити такі боти грати в складні ігри, часто використовують метод машинного навчання з підкріпленням. Цей метод дозволяє ефективно навчатися в іграх з величезною кількістю можливих ходів.

У статті [7] наведено вступний аналіз наукової літератури, що стосується застосування цих ключових дослідницьких напрямів у сфері відеоігор.

Авторами статті [8] проведено дослідження того, як технології штучного інтелекту ефективно використовуються для вирішення проблем, що виникають під час розробки ігор та інтеграції нових функцій у гру. У цьому дослідницькому документі розглядаються два алгоритми: пошук шляху ботів і прийняття рішень ботом.

Метою дослідження [9] є створення інноваційної 2D-гри, де персонажі, керуються штучним інтелектом, діють автономно в межах своїх можливостей. Для реалізації цього проекту автори обрали ігровий рушій Unity та мову програмування C#. Гра генерує випадкові рівні за допомогою алгоритмів, а гравці можуть відстежувати свої досягнення, такі як кількість переможених ворогів. Це дослідження спрямоване на розширення меж застосування штучного інтелекту в розробці відеоігор. Штучний інтелект революціонує ігрову індустрію, надаючи розробникам потужні інструменти для створення більш реалістичних та інтерактивних ігор. Завдяки ШІ, персонажі стають більш живими та індивідуальними, здатними реагувати на емоції гравців та адаптуватися до їхнього стилю гри. Крім того, ШІ дозволяє створювати більш глибокі та захоплюючі сюжетні лінії, аналізуючи текстові повідомлення гравців та розуміючи їх наміри.

Стаття [10] містить вичерпний огляд штучного інтелекту для використання у складних іграх.

**Мета статті.** Мета цього дослідження полягає у аналізі алгоритмів для створення шахового бота, який використовує методи та стратегії штучного інтелекту для вирішення задач гри, яка вважається великим викликом для програмістів та вчених, оскільки вимагає не лише обчислювальних зусиль, а й аналізу та стратегічного мислення.

**Виклад основного матеріалу.** Створення ефективного шахового бота потребує потужних алгоритмів, здатних опрацювати величезну кількість можливих позицій на шахівниці. Хоча класичні методи машинного навчання мають свої переваги в багатьох завданнях, їх застосування у шахах може бути обмеженим через складність гри. Глибинне навчання, зі своєю здатністю виявляти складні патерни в даних, виявилось більш придатним для створення сильних шахових програм. Однак класичні методи все ще можуть використовуватися як допоміжні інструменти або для вирішення конкретних

підзадач. Класичні методи, такі як лінійна регресія, метод опорних векторів, дерева рішень можуть бути використані для створення початкових моделей.

Лінійна регресія, незважаючи на свою простоту, може бути потужним інструментом для створення першої версії шахового бота. Вона дозволить встановити базові залежності між конфігураціями дошки та ймовірністю певного ходу. Хоча шахи – це гра з великою кількістю складних взаємодій, можна спростити її до набору числових характеристик, які можна проаналізувати за допомогою лінійної регресії. Концепція лінійної регресії досить інтуїтивна та легко інтерпретується і яку можна представити рівнянням:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon, \quad (1)$$

де  $y$  – залежна змінна;  $\beta_0$  – вільний член, який відповідає значенню  $y$ , коли всі незалежні змінні дорівнюють нулю;  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$  – коефіцієнти регресії, які показують, наскільки зміниться  $Y$  при зміні відповідної незалежної змінної на одиницю, за умови, що інші незалежні змінні залишаються незмінними;  $X_1, X_2, \dots, X_p$  – незалежні змінні (предиктори),  $\varepsilon$  – помилка моделі, яка враховує вплив усіх інших факторів, що не включені до моделі. Одним із найпоширеніших підходів до навчання моделей регресії є оптимізація коефіцієнтів за допомогою методу найменших квадратів, який полягає в мінімізації суми квадратів відхилень передбачених значень від фактичних (Mean Squared Error, MSE):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (2)$$

де  $y_i$  – фактичне значення;  $\hat{y}_i$  – прогнозоване значення;  $n$  – кількість спостережень.

Представимо один із варіантів реалізації лінійної регресії для ігрового бота. Кожну позицію на дошці представлено як вектор чисел. Наприклад, для кожної клітинки можна використовувати три біти: один для визначення кольору фігури, один для типу фігури й один для того, чи клітинка порожня. Хід також кодується як вектор. Можна вказати початкову та кінцеву позицію фігури. Збирається великий набір даних пар «позиція – хід», який може бути даними з партій професійних гравців. Далі будується лінійна модель, яка на основі вектора, що описує позицію, прогнозує вектор, що описує найкращий хід.

Хоча лінійна регресія є потужним інструментом статистичного аналізу, вона не підходить для створення повноцінного шахового бота. Лінійна регресія немає вбудованого механізму для пошуку оптимального ходу, вона може лише прогнозувати числові значення, а не вибирати конкретні дії. Лінійна регресія не враховує довгострокові стратегічні цілі, вона фокусується лише на локальних взаємодіях між фігурами. Для цього потрібні більш складні алгоритми, здатні впоратися зі складністю шахової гри.

Метод опорних векторів (Support Vector Machines, SVM) є потужним алгоритмом машинного навчання, що використовується для класифікації даних. Його основна ідея полягає у знаходженні оптимальної гіперплощини, яка максимально відокремлює точки різних класів. У контексті шахів, SVM може бути застосований для класифікації позицій як виграшних, програшних чи нічийних.

Продемонструємо даний алгоритм для навчальної вибірки, де  $x$  – матриця, кожен рядок якої представляє один об'єкт (вектор ознак),  $y$  – вектор міток класів (для бінарної класифікації: -1 або 1). Потрібно знайти вектор ваг  $w$  і зсув  $b$  такі, що представлена лінійна функція максимально відокремлює точки різних класів:

$$f(x) = w^T \cdot x + b \quad (3)$$

Функціональна відстань від точки  $x$  до гіперплощини визначається як:

$$dist = \frac{\|w\|^2}{2}. \quad (4)$$

Оптимальною гіперплощиною є така гіперплощина, де функціональна відстань від найближчих точок (опорних векторів) різних класів до неї є максимальною. Задача SVM зводиться до такого формулювання задачі оптимізації з наступною цільовою функцією та умовою:

$$\min = \frac{\|w\|^2}{2} \quad (5)$$

$$y_i \cdot (w^T \cdot x_i + b) \geq 1, \quad i = 1, n \quad (6)$$

Щоб навчити шахового бота грати за допомогою алгоритму SVM, потрібно використати велику кількість партій професійних шахістів. Кожна позиція описується вектором ознак, а результат партії виступає як мітка класу. SVM буде гіперплощиною, яка оптимально розділяє позиції різних класів у багатовимірному просторі ознак. SVM може бути ефективним для класифікації простих позицій, але для складних позицій можуть знадобитися більш потужні моделі. Крім того, навчання SVM на великих наборах даних може вимагати значних обчислювальних ресурсів. Шахи є динамічною грою, і ситуація на шахівниці постійно змінюється і статична модель SVM може не враховувати всіх нюансів гри.

Дерева рішень та випадковий ліс – це потужні алгоритми машинного навчання, які чудово підходять для класифікації та регресії. Їх можна ефективно застосувати для створення моделі шахового бота, яка прогнозуватиме найкращі ходи. При використанні дерева рішень відбувається побудова моделі у вигляді дерева, де кожен вузол представляє атрибут (ознаку), кожна гілка – значення атрибута, а листя – класи або числові значення. Для цього припустимо, що  $X$  – множина об'єктів,  $A$  – множина атрибутів,  $C$  – множина класів та  $T$  – дерево рішень, що можна представити у вигляді наступної функції, яка ставить у відповідність кожному об'єкту  $x$  клас  $c$ :

$$T(x) \rightarrow c, \quad c \in C \quad (7)$$

Випадковий ліс – це алгоритм для побудови множини дерев рішень та використання їх для прийняття рішення. Він дозволяє підвищити точність побудованої моделі. Представимо  $B$  як множину дерев рішень,  $T_i$  –  $i$ -те дерево рішень, тоді прогноз випадкового лісу для об'єкта  $x$  обчислюється за такими формулами:

$$f(x) = \arg \max_c \sum_i I(T_i(x)) = c \quad (8)$$

де  $I(T_i(x)) = c$  дорівнює 1, якщо дерево  $T_i$  класифікує об'єкт  $x$  як клас  $c$  та 0 в іншому випадку.

Ключовими аспектами, що характеризують шахову позицію є геометричне розташування фігур на шахівниці, ступінь контролю над центральними полями, наявність безпосередньої загрози королю суперника (шах) або можливості поставити мат. Модель навчається на наборі даних, що містить велику кількість шахових позицій з відповідними ходами, вказавши метрику якості, яку потрібно оптимізувати (наприклад, Precision, F1-score) [11]. Точність (Precision) показує, яка частка з усіх позитивних прикладів, які модель класифікувала як позитивні, насправді є позитивними. У контексті шахового бота це можна інтерпретувати як частину ходів, які бот окреслив як «найкращі», які насправді є «найкращими» з погляду ідеальної гри.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (9)$$

де  $TP$  (True Positive) – кількість правильно класифікованих позитивних прикладів;  $FP$  (False Positive) – кількість помилково класифікованих негативних прикладів як позитивні (помилкові спрацювання).

F1-score є гармонійним середнім між точністю та повнотою (recall), враховує як точність, так і повноту, і є більш збалансованим показником, ніж кожна з цих метрик окремо.

$$F1\text{-score} = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}, \quad (10)$$

де  $\text{Повнота}(\text{Recall}) = TP / (TP + FN)$ ;  $FN$  (False Negative) – кількість помилково класифікованих позитивних прикладів як негативні (пропущені приклади).

Оцінка якості шахового бота є досить складним завданням, оскільки вона залежить від багатьох факторів, включаючи складність позицій, глибину пошуку, та навіть суб'єктивні оцінки гравців. Проте, точність та F1-score є двома з найпоширеніших та найкорисніших метрик, які можна використовувати для оцінки роботи шахового бота.

Структура дерева рішень схожа на логічні правила, що полегшує інтерпретацію моделі та розуміння, чому було обрано той чи інший хід. Можна використовувати як числові, так і категоріальні дані, що характерно для шахових позицій. Випадковий ліс – це ансамбль дерев рішень, що дозволяє уникнути перенавчання та підвищити точність прогнозів. Древа рішень та випадковий ліс відносно швидко навчаються, що важливо для створення прототипу бота. Створення сильного шахового бота - це складний процес, який вимагає знань з машинного навчання, шахів та програмування. Однак навіть проста модель на основі дерев рішень та випадкового лісу може грати в шахи на досить високому рівні.

Глибинне навчання, зокрема, згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Network, CNN) та рекурентні нейронні мережі (Recurrent Neural Networks, RNN), виявилися надзвичайно ефективними для складних ігор, таких як шахи. CNN дозволяють моделі вивчати візуальні патерни на шахівниці, тоді як RNN можуть враховувати послідовність ходів. Завдяки своїй здатності до автоматичного виявлення складних ознак, глибинні нейронні мережі досягають значно кращих результатів, ніж класичні методи.

AlphaZero – це комп'ютерна програма, розроблена DeepMind, яка продемонструвала видатні результати в таких складних іграх, як го, шахи та сьогі. В основі AlphaZero лежать глибинні нейронні мережі, які навчаються грати, аналізуючи величезну кількість партій, зіграних із собою. Архітектура мережі AlphaZero використовує глибинну нейронну мережу з кількома блоками згорткових нейронів для обробки ігрового стану. Ця мережа дає змогу моделі виявляти складні патерни та стратегії, які можуть бути недоступні для людини. Модель навчається шляхом гри самої з собою мільйони разів. За кожен хід модель отримує нагороду або покарання, що дає їй змогу поступово покращувати свою стратегію. Цей процес дає змогу моделі знаходити оптимальні рішення в складних ігрових ситуаціях.

AlphaZero використовує алгоритм Монте-Карло з деревом пошуку для вибору найкращого ходу. Модель генерує безліч можливих ходів і оцінює їх за допомогою нейронної мережі. Потім вона вибирає хід, який, за її оцінкою, призведе до найбільшого очікуваного результату. Алгоритм Monte-Carlo Tree Search (MCTS) поєднує в собі елементи пошуку в глибину та випадкового пошуку та дозволяє ефективно досліджувати великі простори станів. Нехай  $S$  — простір станів,  $A(s)$  — множина допустимих дій у стані  $s$ ,  $T: S \times A \rightarrow S$  — функція переходу, що визначає наступний стан після виконання дії, та  $R: S \rightarrow R$  — функція винагороди, що асоціює зі станом відповідне числове значення.

Тоді процес MCTS можна представити такими етапами:

- ініціалізація – створення кореневого вузла, який представляє початковий стан гри;
- вибір вузла  $s$  для розширення за допомогою функції вибору  $\text{select}(s)$ ;
- розширення вузла, якщо вузол  $s$  не має нерозгорнутих дочірніх вузлів, створити всі можливі дочірні вузли  $s' = T(s, a)$  для всіх  $a \in A(s)$ ;

– симуляція – вибір випадкової дії  $a$  зі стану  $s'$  і виконання її, отримавши новий стан  $s''$ , цей процес повторюється до кінця гри, доки отримаємо результат  $r$ ;

– зворотне поширення – оновлення оцінки вузлів на шляху від  $s'$  до кореневого вузла, використовуючи функцію оновлення  $update(s, r)$ ;

– повторення кроків 2-5 до досягнення заданого ліміту часу або ітерацій.

Функція вибору  $select(s)$  у більшості випадків використовує один з популярних методів UCB1:

$$UCB1(s) = Q(s) + \sqrt{\frac{2 \cdot \ln(N)}{N(s)}}, \quad (11)$$

де  $Q(s)$  – середнє значення винагороди для вузла  $s$ ;  $N(s)$  – кількість разів, коли вузол  $s$  був відвіданий та  $N$  – загальне число відвідувань кореневого вузла.

Отже, ключовою особливістю AlphaZero є використання глибинної нейронної мережі для оцінки станів. Модель навчається на великій кількості даних, отриманих в результаті самонавчання, і дозволяє алгоритму швидко оцінювати позиції та вибирати оптимальні ходи. MCTS дозволяє ефективно досліджувати великі кількості станів, що особливо важливо для складних ігор, таких як го, шахи та сьогі. Алгоритм можна застосовувати до різних ігор, змінюючи лише функцію переходу та винагороди. UCB1 забезпечує баланс між експлуатацією відомих хороших ходів та дослідженням нових, потенційно кращих варіантів.

**Результати дослідження.** Для навчання моделі шахового бота потрібен набір даних, які можна зібрати за допомогою шахового рушія Stockfish. Рушій зіграє велику кількість партій сам із собою, обираючи оптимальні ходи. Кожна партія буде записана у файл, забезпечуючи якісний набір даних для подальшого навчання моделі.

Метод `mineGames` проводить шахові партії з використанням рушія Stockfish детально фіксує кожний хід у файл `movesAndPositions[n]`, де  $n$  відповідає порядковому номеру зіграної партії.

Лістинг програмного коду методу `mineGames`:

```
def mineGames(numGames: int):
    MAX_MOVES = 500
    for i in range(numGames):
        currentGameMoves = []
        currentGamePositions = []
        board = chess.Board()
        stockfish.set_position([])
        for i in range(MAX_MOVES):
            moves = stockfish.get_top_moves(3)
            exit
            if len(moves) == 0:
                print("game is over")
                break
            elif len(moves) == 1:
                move = moves[0]["Move"]
            elif len(moves) == 2:
                move = random.choices(moves, weights=(80, 20), k=1)[0]["Move"]
            else:
                move = random.choices(moves, weights=(80, 15, 5), k=1)[0]["Move"]
            currentGamePositions.append(stockfish.get_fen_position())
            print(move)
            print(board)
            board.push_san(move)
            currentGameMoves.append(move)
```



```

stockfish.set_position(currentGameMoves)
if checkEndCondition(board):
print("game is over")
break
saveData(currentGameMoves, currentGamePositions)

```

Для представлення шахових позицій і ходів можна використовувати масиви чисел замість традиційної нотації. Це спрощує обробку даних і дозволяє застосовувати алгоритми машинного навчання. Бібліотека `gum-chess` мови Python надає зручний інструментарій для роботи з шаховими даними, використовуючи підхід, заснований на AlphaZero. Для створення глибокої нейронної мережі скористаємось фреймворком PyTorch. Інкапсулюємо дані у контейнери PyTorch, для подальшого навчання моделі.

Проводимо налаштування параметрів для тренування моделі: `EPOCHS = 60`; `LEARNING_RATE = 0.001`; `MOMENTUM = 0.9`. Далі створюємо екземпляр моделі. Використовуємо функцію втрат `torch.nn.CrossEntropyLoss()`, оптимізатор `torch.optim.SGD`, який використовує метод градієнтного спуску з моментом для оновлення ваг моделі. Після цього запускається цикл тренування моделі.

Проводимо відстеження найкращого значення втрати на валідаційному наборі (`best_vloss`). Якщо поточна втрата краща за попередню найкращу втрату, то модель зберігається в файл. Кожні п'ять епох також виводимо середні втрати на тренувальному та валідаційному наборах. Нижче наведено лістинг методу для виконання однієї епохи навчання.

Лістинг програмного коду методу `train_one_epoch`:

```

def train_one_epoch(model, optimizer, loss_fn, epoch_index, tb_writer):
running_loss = 0.0
last_loss = 0.0
for i, data in enumerate(training_loader):
inputs, labels = data
optimizer.zero_grad()
outputs = model(inputs)
loss = loss_fn(outputs, labels)
loss.backward()
optimizer.step()
running_loss += loss.item()
if i % 1000 == 999:
last_loss = running_loss / 1000 # loss per batch
tb_x = epoch_index * len(training_loader) + i + 1
tb_writer.add_scalar("Loss/train", last_loss, tb_x)
running_loss = 0.0
return last_loss

```

За результатами навчання отримано оптимальну модель (рис. 1).

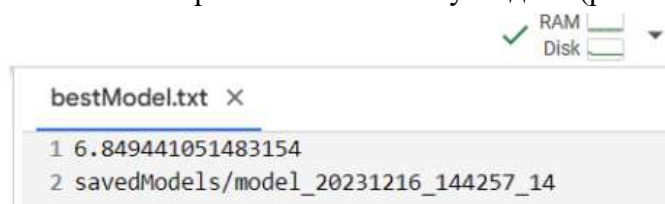


Рис. 1. Оптимальна модель за результатами навчання

Джерело: розроблено авторами.

Після завершення тренування, для оцінки моделі зіграємо тестову партію. Для цього завантажимо отриману модель:

```
saved_model = Model()
model = Model()
f = open("/content/drive/MyDrive/ChessPlayer/savedModels/bestModel.txt", "r")
bestLoss = float(f.readline())
model_path = f.readline()
f.close()
model.load_state_dict(torch.load('/content/drive/MyDrive/ChessPlayer/savedModels/model_20231216_14
4257_14'))
```

Далі створимо дошку і почнемо партію білими фігурами, зробивши перший хід:

```
board = chess.Board()
moveStr = "e2e4"
move = chess.Move.from_uci(moveStr)
board.push(move)
board
```

Провівши деяку кількість ходів, стає зрозуміло, що модель шахового бота дійсно розуміє як вона має грати і робить правильні ходи. На рис. 2 наведено стан дошки під час гри з моделлю шахового бота. За результатами зіграної партії можна зробити висновок, що модель засвоїла правила гри та діє відповідно них.



Рис. 2. Гра з моделлю шахового бота

Джерело: розроблено авторами.

Модель продемонструвала базове розуміння шахів та здатність робити правильні ходи. Однак, щоб розкрити весь її потенціал і досягти рівня досвідчених гравців, необхідне більш інтенсивне навчання на різноманітних шахових позиціях. Більша кількість тренувальних ітерацій дозволить моделі глибше вивчити шахові стратегії та тактики, що є ключовим для перемоги в складних партіях.

**Висновки.** Створення потужного шахового бота – це складний процес, який потребує глибокого розуміння як правил гри, так і сучасних методів штучного інтелекту. Було розглянуто різні алгоритми прийняття рішень, такі як лінійна регресія, метод опорних векторів, дерева рішень, методи глибинного навчання. Після ретельного аналізу різних алгоритмів машинного навчання було обрано глибинне навчання як найперспективніший підхід. Глибинні нейронні мережі здатні вивчати складні шахові патерни та автоматично виявляти ефективні стратегії. Щоб оптимізувати процес прийняття рішень ботом було обрано систему штучного інтелекту, розроблену DeepMind - AlphaZero.

Була успішно розроблена та навчена модель шахового бота. Результати тестової партії підтвердили здатність моделі до навчання, але для досягнення високої точності прогнозування необхідне розширення бази навчальних даних. Збільшення різноманітності шахових позицій в навчальній вибірці дозволить моделі ефективніше виявляти складні шахові патерни та покращити якість прийнятих рішень.

### Список використаних джерел

1. Hu, Z. Deep learning applications in games: a survey from a data perspective / Z. Hu, Y. Ding, R. Wu, [et al.] // *Appl Intell.* – 2023. – Vol. 53. – Pp. 31129-31164. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10489-023-05094-2>.
2. Kotkov, D. Gaming Bot Detection: A Systematic Literature Review / D. Kotkov, G. Pandey, A. Semenov // *Computational Data and Social Networks. CSoNet 2018. Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Cham. – 2018. – Vol. 11280. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-04648-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-04648-4_21).
3. Filipović, A. The Role of Artificial Intelligence in Video Game Development / A. Filipović // *Kultura Polisa.* – 2023. – Vol. 20.3. – Pp. 50-67.
4. Tang, C. Research on Artificial Intelligence Algorithm and Its Application in Games / C. Tang, Z. Wang, X. Sima, L. Zhang // 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture (AIAM), Manchester, United Kingdom, 15-17 October 2020. – 2020. – Pp. 386-389. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIAM50918.2020.00085>.
5. Xinhe, T. AI applications in video games and future expectations / T. Xinhe // *Applied and Computational Engineering.* – 2024. – Vol. 54. – Pp. 161-170. DOI: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/54/20241484>.
6. Edwards, G. The Role of Machine Learning in Game Development Domain – A Review of Current Trends and Future Directions / G. Edwards, N. Subianto, D. Englund, [et al.] // 2021 Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA), Gold Coast, Australia. – 2021. – Pp. 01-07. DOI: <https://doi.org/10.1109/DICTA52665.2021.9647261>.
7. Skinner, G. Artificial Intelligence and Deep Learning in Video Games A Brief Review / G. Skinner, T. Walmsley // 2019 IEEE 4th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), Singapore. – 2019. – Pp. 404-408. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCOMS.2019.8821783>.
8. Singh, K. Artificial Intelligence Based Path Finding and Decision Making in First Person Shooting Game / K. Singh, A. V. Singh, S. K. Khatri, S. Som // 2019 Third International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), Coimbatore, India. – 2019. – Pp. 168-171. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICISC44355.2019.9036471>.
9. Ayas, A. Y. Artificial Intelligence (AI)-Based Self-Deciding Character Development Application in Two-Dimensional Video Games / A. Y. Ayas, H. Aydın, A. Çetinkaya, Z. Güney // *Bilgi Ve İletişim Teknolojileri Dergisi.* – 2023. – Vol. 5(1). – Pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.53694/bited.1247338>.
10. Westera, W. Artificial intelligence moving serious gaming: Presenting reusable game AI components / W. Westera, R. Prada, S. Mascarenhas, [et al.] // *Education and Information Technologies.* – 2020. – Vol. 25. – Pp. 351-380. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-019-09968-2>.
11. Марчук, Д. К. Методи оцінки ефективності моделей виявлення об'єктів у комп'ютерному зорі / Д. К. Марчук, М. С. Граф // *Вісник Херсонського національного технічного університету.* – 2023. – № 2 (85). – С. 181-186.

### References

1. Hu, Z., Ding, Y., Wu, R. et al. (2023). Deep learning applications in games: a survey from a data perspective. *Appl Intell* 53, 31129–31164. <https://doi.org/10.1007/s10489-023-05094-2>
2. Kotkov, D., Pandey, G., Semenov, A. (2018). Gaming Bot Detection: A Systematic Literature Review. In: *Chen, X., Sen, A., Li, W., Thai, M. (eds) Computational Data and Social Networks. CSoNet 2018. Lecture Notes in Computer Science, 11280.* Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-04648-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-04648-4_21).
3. Filipović, A. (2023). The Role of Artificial Intelligence in Video Game Development. *Kultura polisa*, 20, 50-67. <https://doi.org/10.51738/Kpolisa2023.20.3r.50f>.
4. Tang, C., Wang, Z., Sima, X., Zhang, L. (2020). Research on Artificial Intelligence Algorithm and Its Application in Games. *AIAM*. 386-389. <https://doi.org/10.1109/AIAM50918.2020.00085>.
5. Tian, X. (2024). AI applications in video games and future expectations. *Applied and Computational Engineering*, 54, 161-170. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/54/20241484>.

6. Edwards, G., Subianto, N., Englund, D., *et al.* (2021). The Role of Machine Learning in Game Development Domain - A Review of Current Trends and Future Directions. *2021 Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*, Gold Coast, Australia, 01-07. <https://doi.org/10.1109/DICTA52665.2021.9647261>.

7. Skinner, G., Walmsley, T. (2019). Artificial Intelligence and Deep Learning in Video Games A Brief Review. *ICCCS* 404-408. <https://doi.org/10.1109/CCOMS.2019.8821783>.

8. Singh, K., Singh, A., Khatri, S. K., Som, S. (2019). Artificial Intelligence Based Path Finding and Decision Making in First Person Shooting Game. *ICISC* 168-171. <https://doi.org/10.1109/ICISC44355.2019.9036471>.

9. Ayas, A.Y., Aydın, H., Çetinkaya, A., & Güney, Z. (2023). Artificial Intelligence (AI)-Based Self-Deciding Character Development Application in Two-Dimensional Video Games. *Bilgi ve İletişim Teknolojileri Dergisi*. <https://doi.org/10.53694/bited.1247338>.

10. Westera, W., Prada, R., Mascarenhas, S. et al. (2020). Artificial intelligence moving serious gaming: Presenting reusable game AI components. *Educ Inf Technol* 25, 351–380. <https://doi.org/10.1007/s10639-019-09968-2>.

11. Marchuk D. K., Graf M. S. (2023). Metody otsinky efektyvnosti modelei vyivlennia ob'ektiv u kompiuternomu zori [Methods for Evaluating the Effectiveness of Object Detection Models in Computer Vision]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu - Visnyk of Kherson National Technical University*, 2(85), 181-186.

Отримано 29.09.2024

UDC 004.89:51-7:51-8

**Galyna Marchuk<sup>1</sup>, Olha Korotun<sup>2</sup>, Vitalii Levkivskiy<sup>3</sup>, Mykola Ukrainets<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Senior Lecturer of the Department of Computer Sciences

Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: [pzs\\_mgv@ztu.edu.ua](mailto:pzs_mgv@ztu.edu.ua). ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2954-1057>. ResearcherID: [AAD-7514-2022](https://orcid.org/0000-0003-2954-1057)

<sup>2</sup> PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Sciences  
Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: [korotun-o@ztu.edu.ua](mailto:korotun-o@ztu.edu.ua). ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2240-7891>. ResearcherID: [LPP-8040-2024](https://orcid.org/0000-0003-2240-7891)

<sup>3</sup>PhD in Software Engineering, Associate Professor of the Department of Computer Sciences

Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: [levkivskyy@ztu.edu.ua](mailto:levkivskyy@ztu.edu.ua). ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1643-0895>. ResearcherID: [GYU-9377-2022](https://orcid.org/0000-0002-1643-0895)

<sup>4</sup>Assistant of the Department of Computer Sciences

Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: [kkn\\_umo@ztu.edu.ua](mailto:kkn_umo@ztu.edu.ua). ORCID <https://orcid.org/0009-0002-1185-491X>

## RESEARCH OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS FOR CREATING INTELLIGENT GAME AGENTS

*The constant development of machine learning technologies has had a great impact on the gaming industry. Artificial intelligence allows the creation of increasingly complex and intelligent bots that are capable of learning and self-improvement, opening up new perspectives for game developers that allow them to create more interactive and immersive game worlds. This research aimed at the creation of an intelligent chess agent that, with the help of machine learning methods and search algorithms, would be able to independently improve its chess skills and adapt to the various playing styles of its opponents. Presented in the article information is a scientific and methodical character. It is expected that considered algorithms can be used not only in chess, but also in other fields that require decision-making under conditions of uncertainty. Various machine learning algorithms have been investigated, including traditional methods and deep learning methods (in particular, convolutional and recurrent neural networks). According to the analysis results, it was determined that deep learning is the most promising method for recognizing complex chess patterns and automatically forming effective strategies. DeepMind's AlphaZero artificial intelligence system, which is based on the principles of deep learning, was chosen in order to optimise the bot's decision-making process. AlphaZero is a powerful chess tool due to its self-learning ability, deep neural networks, and efficient moves tree search algorithm. It opens new horizons in the field of artificial intelligence and shows that computers can outperform humans in complex intellectual tasks, but also do it in fundamentally new ways. AlphaZero is not designed particularly for playing chess, it can be adapted for any game where the moves of the players alternate. It makes this engine a truly universal tool for artificial intelligence research.*

**Keywords:** AlphaZero; game; video games; game bot; neural networks; deep learning; artificial intelligence.

Figures: 2. References: 11.

**Микола Олегович Бялий**

ад'юнкт штатний науково-організаційного відділу  
Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)  
E-mail: [nikolai.bialiy@gmail.com](mailto:nikolai.bialiy@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0006-9487-1502>

**ОЦІНКА ІНФОРМАТИВНОСТІ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ  
ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

У сучасному військовому середовищі геоінформаційні системи (ГІС) відіграють ключову роль у забезпеченні військових операцій і ухвалення ефективних управлінських рішень. Для ефективного використання ГІС важливо оцінити кількість додаткової інформації, яку можна отримати за рахунок впровадження ГІС ВП, оскільки вони використовуються не тільки для візуалізації поточної ситуації на полі бою, а й для прогнозу та ухвалення ефективних рішень в умовах невизначеності. Результати дослідження допоможуть визначити обсяг додаткової інформації, яку можна отримати за допомогою ГІС військового призначення, та розробити рекомендації щодо їх оптимального використання для забезпечення військових потреб. Дослідження спрямоване на оцінку обсягу інформації, яку можна отримати через військові геоінформаційні системи (ГІС). Розглянуто образно-знакову модель карти як "інформаційний канал", який позначає систему чи середовище реєстрації, обробки, зберігання і передачі даних про місцевість від джерела (земна поверхня) до приймача, визначено пропускну здатність ГІС, визначено об'єм бази даних рівня бригади стосовно підсистеми ГІС ВП.

**Ключові слова:** геоінформаційні системи; образно-знакова модель карти; бази даних; військові потреби; пропускну здатність ГІС.

Бібл.: 4.

**Актуальність теми та постановка проблеми.** Геоінформаційні системи (ГІС) є важливими інструментами для аналізу та управління просторовими даними в різних галузях, зокрема й військову сферу. У військових умовах ГІС забезпечують точну та актуальну інформацію, необхідну для прийняття рішень у реальному часі. Ця стаття розглядає методи оцінки кількості інформації, яку можна отримати за допомогою ГІС військового призначення, а також джерела даних і їхні характеристики.

У військовій сфері ГІС використовується для:

- картографування та аналізу місцевості;
- планування операцій;
- моніторингу та розвідки;
- управління логістикою.

ГІС військового призначення повинні відповідати кільком ключовим вимогам:

1. Точність. Дані повинні бути високоточними, щоб забезпечити надійність аналізу.
2. Оперативність. Система повинна надавати актуальну інформацію в режимі реального часу.
3. Інтегративність. Можливість інтеграції даних із різних джерел.
4. Безпека. Захист даних від несанкціонованого доступу та кібератак.

Метою даного дослідження є аналіз потенційних джерел географічної інформації, доступних через військові ГІС, та оцінка їхніх технічних можливостей для обробки та аналізу цієї інформації. Дослідження спрямоване на визначення кількості та різноманітності інформації, доступної через військові ГІС, та визначення її важливості для військових операцій та процесів ухвалення рішень. Крім того, метою є надання рекомендацій щодо оптимізації використання ГІС для задоволення потреб військової інформації. Це дослідження сприятиме кращому розумінню можливостей та потенційного застосування військових ГІС для надання критичної інформації для військових цілей.

Основними завданнями дослідження є:

- огляд літературних джерел та наукових публікацій, що стосуються ГІС військового призначення;

- аналіз потенційних джерел географічної інформації, доступних через військові ГІС, та оцінка їхніх технічних можливостей для обробки та аналізу цієї інформації;
- формулювання рекомендацій щодо оптимізації використання ГІС для задоволення потреб військової інформації і перспектив їх використання для потреб сектору безпеки й оборони України.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Для аналізу сучасного стану розвитку геоінформаційних систем військового призначення використовуються різноманітні методи, які надають точні та об'єктивні дані. Основними методами нашого дослідження є аналіз літератури та документів геоінформаційних систем військового призначення, а також їх інформативності. Було здійснено проведення системного огляду наукових публікацій, законодавчих актів та інших документів, що стосуються розвитку геоінформаційних систем військового призначення. Цей метод дозволяє зібрати та оцінити наявну інформацію про технічні, економічні, соціальні та інші аспекти розвитку мережі. Оцінка інформативності ГІС включає кількісні та якісні методи аналізу, що забезпечують точність, надійність та комплексність даних. Проведено аналіз відомого дослідника у сфері геоінформаційних систем Кена С. Джеймса. Його роботи часто зосереджуються на застосуванні ГІС у військових операціях, плануванні та управлінні. Джеймс вивчає, як ГІС можуть покращити прийняття рішень в умовах конфлікту, зокрема через аналіз даних про місцевість і прогнозування сценаріїв. Він активно розробляє методи просторового аналізу для візуалізації та інтерпретації даних, що сприяє кращому розумінню ситуацій на полі бою. Джеймс аналізує, як різні елементи ГІС можуть впливати на обсяг і якість інформації, що отримується, та пропонує методи для підвищення їхньої ефективності.

**Метою статті** є дослідження потенційних джерел географічної інформації, доступних через військові ГІС, та оцінка їхніх технічних можливостей для обробки та аналізу цієї інформації. Дослідження спрямоване на визначення кількості та різноманітності інформації, доступної через військові ГІС, та визначення її важливості для військових операцій та процесів прийняття рішень. Крім того, метою є надання рекомендацій щодо оптимізації використання ГІС для задоволення потреб військової інформації. Це дослідження сприятиме кращому розумінню можливостей та потенційного застосування військових ГІС для надання критичної інформації для військових цілей.

**Виклад основного матеріалу.** Геоінформаційні системи (ГІС) військового призначення використовують різноманітні джерела інформації для забезпечення точного та актуального аналізу даних. Кожне джерело має свої особливості, переваги та обмеження. Розглянемо детальніше основні джерела інформації для ГІС військового призначення:

#### 1. Супутникові знімки.

Супутникові знімки є одним з основних джерел інформації для ГІС. Вони забезпечують великий обсяг даних про поверхню Землі, дозволяючи отримувати зображення високої роздільної здатності з космосу.

Типи супутникових даних:

**Оптичні знімки:** Використовують видиме світло для створення зображень. Переваги: висока деталізація та кольорова інформація. Обмеження: залежність від погодних умов та часу доби.

**Інфрачервоні знімки:** Використовують інфрачервоне випромінювання для отримання зображень. Переваги: можливість отримувати дані вночі та через хмари. Обмеження: нижча деталізація порівняно з оптичними знімками.

**Радарні знімки (SAR):** Використовують радіохвилі для створення зображень. Переваги: незалежність від погодних умов та часу доби, можливість отримання даних про рельєф. Обмеження: специфічність обробки даних та інтерпретації.

Використання:

- Моніторинг великих територій.
- Виявлення змін на місцевості.
- Аналіз рельєфу та геоморфології.
- Оцінка природних ресурсів.

## 2. Дані з безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

БПЛА забезпечують збір детальної інформації на локальному рівні. Вони можуть літати на низьких висотах, збираючи високоточні знімки та відео в режимі реального часу.

Типи даних:

- Високоточні знімки: Зображення високої роздільної здатності, які дозволяють детально аналізувати об'єкти на землі.
- Відео: Надає можливість візуального моніторингу в режимі реального часу.
- Інфрачервоні зображення: Використовуються для виявлення об'єктів за їх тепловим випромінюванням, що особливо корисно для нічного моніторингу та виявлення замаскованих об'єктів.

Використання:

- Розвідка та спостереження.
- Оцінка стану об'єктів інфраструктури.
- Пошуково-рятувальні операції.
- Моніторинг бойових дій у реальному часі.

## 3. Наземні сенсори.

Наземні сенсори включають різноманітні пристрої, встановлені на поверхні землі, які збирають дані про навколишнє середовище та рух об'єктів.

Типи сенсорів:

- Радари: Використовують радіохвилі для виявлення та відстеження об'єктів. Переваги: можливість роботи в будь-яких погодних умовах та вночі. Обмеження: потреба в лінії прямої видимості для точного виявлення.
- Лідари: Використовують лазерне випромінювання для створення тривимірних моделей місцевості. Переваги: висока точність і деталізація рельєфу. Обмеження: залежність від погодних умов, таких як туман чи дощ.
- Акустичні сенсори: Використовують звукові хвилі для виявлення підводних об'єктів або об'єктів на поверхні. Переваги: можливість виявлення об'єктів під водою. Обмеження: обмежена дальність дії.

Використання:

- Моніторинг прикордонних зон.
- Виявлення руху транспортних засобів та піхоти.
- Контроль за станом довкілля.
- Виявлення проникнень та вторгнень.

## 4. Додаткові джерела інформації

• Геодезичні дані. Геодезичні дані забезпечують точні координати та вимірювання рельєфу місцевості. Вони використовуються для створення базових карт і тривимірних моделей, які є основою для подальшого аналізу та планування.

• Метеорологічні дані. Метеорологічні дані включають інформацію про погодні умови, такі як температура, вологість, швидкість і напрямок вітру, опади тощо. Ці дані важливі для планування військових операцій, оскільки погодні умови можуть впливати на виконання завдань.



- Соціально-економічні дані. Соціально-економічні дані включають інформацію про населення, економічну активність, інфраструктуру та інші аспекти людської діяльності. Ці дані допомагають у розумінні контексту операцій, плануванні гуманітарної допомоги та оцінці потенційних ризиків.

ГІС військового призначення використовують широкий спектр джерел інформації, кожне з яких має свої переваги та обмеження. Супутникові знімки забезпечують велике охоплення територій, дані з БПЛА надають детальну інформацію на локальному рівні, а наземні сенсори доповнюють картину моніторингу. Інтеграція цих різномірних джерел дозволяє створювати комплексні та актуальні карти, необхідні для успішного планування та проведення військових операцій. З розвитком технологій з'являються нові джерела інформації, які можуть значно підвищити ефективність геоінформаційних систем (ГІС) військового призначення:

#### 1. Космічні сенсори з високою роздільною здатністю.

Новітні космічні сенсори, які забезпечують знімки з неймовірно високою роздільною здатністю, дозволяють отримувати детальні дані про об'єкти на земній поверхні. Це можуть бути нові супутники з розширеними можливостями знімання та передавання даних.

Використання:

- Деталізоване картографування місцевості.
- Виявлення та ідентифікація дрібних об'єктів.
- Оцінка пошкоджень інфраструктури.

#### 2. Гіперспектральні сенсори.

Гіперспектральні сенсори здатні вловлювати широкий спектр електромагнітного випромінювання, що дозволяє отримувати більш детальну інформацію про матеріали та стан поверхні.

Використання:

- Виявлення замаскованих об'єктів.
- Розпізнавання типів матеріалів і рослинності.
- Моніторинг забруднень та екологічних змін.

#### 3. Дані з Інтернету речей (IoT).

Зростаюча кількість пристроїв, підключених до Інтернету, створює величезні масиви даних, які можна використовувати для моніторингу та аналізу.

Використання:

- Моніторинг руху техніки та особового складу.
- Контроль за станом об'єктів інфраструктури.
- Збір даних про екологічні та погодні умови в реальному часі.

#### 4. Соціальні медіа та краудсорсинг.

Інформація із соціальних медіа та краудсорсинг-платформ може надавати важливі дані про події, що відбуваються в реальному часі.

Використання:

- Оперативний моніторинг ситуацій на місцях.
- Виявлення та аналіз тенденцій та настроїв населення.
- Збір інформації про надзвичайні події та катастрофи.

#### 5. Квантові сенсори

Квантові сенсори використовують властивості квантової механіки для підвищення точності вимірювань, що дозволяє отримувати дані з високою роздільною здатністю та точністю.

Використання:

- Надточне вимірювання гравітаційних полів для виявлення підземних об'єктів.

- Високоточна навігація та позиціювання.
- Моніторинг малих змін у довкіллі та інфраструктурі.

#### 6. Автономні підводні та наземні роботи.

Автономні роботи можуть збирати дані у важкодоступних або небезпечних для людини місцях.

Використання:

- Дослідження підводних об'єктів і територій.
- Моніторинг зони конфліктів та небезпечних територій.
- Оцінювання стану критичної інфраструктури в складних умовах.

Переваги нових джерел інформації:

1. Підвищена точність та деталізація. Нові сенсори та технології дозволяють отримувати більш точну та детальну інформацію, що сприяє кращому розумінню ситуації.

2. Швидкість отримання даних. Інтернет речей та соціальні медіа дозволяють отримувати інформацію в реальному часі, що важливо для оперативного реагування.

3. Розширені можливості моніторингу. Автономні роботи та квантові сенсори забезпечують збір даних у важкодоступних місцях та з високою точністю.

4. Інтеграція різнорідних даних. Використання різних джерел дозволяє створювати комплексні та багатопланові карти, що сприяють більш обґрунтованому ухваленню рішень.

Інтеграція нових джерел інформації в геоінформаційні системи військового призначення значно підвищить їх інформативність та ефективність. Впровадження передових технологій, таких як гіперспектральні та квантові сенсори, автономні роботи та дані з Інтернету речей, дозволить покращити точність, швидкість та комплексність аналізу, що сприятиме підвищенню рівня національної безпеки та успішності військових операцій.

Для визначення поняття картографічної інформації, міри її вимірювання та інформаційні характеристики цієї ГІС, розглянемо образно-знакову модель карти, як “інформаційний канал”, який позначає систему чи середовище реєстрації, обробки, зберігання і передачі даних про місцевість від джерела (земна поверхня) до приймача

При застосуванні ймовірнісного варіанту всі повідомлення про картографічні об'єкти, похибки їх обробки і передачі та іншу інформацію оцінюються як випадкові “об'єкти”, що мають певні “інформаційні” характеристики.

Щоб визначити ці характеристики та їх кількісні параметри, перейдемо від розглядання випадкового об'єкта до випадкового дослідження над ним. Як варіант випадкового дослідження можна взяти результати пошуку чи вибору картографічного об'єкта на топографічній карті.

Припустимо, що ми маємо справу з дослідом стану  $a_1, a_2, \dots, a_k$ , які будуть прийняті як витоки дослідження  $A$ , а значення  $P_1, P_2, \dots, P_k$  приймаємо як ймовірності цих витоків. Такий підхід дозволяє легко перейти до кількісної міри невизначеності випадкового дослідження, запропонованій в (Шеннон К., 1963).

Ентропія  $H(P_1, P_2, \dots, P_k) = -\sum P_i \cdot \log p_i$ , приймається як міра невизначеності випадкового дослідження й позначається як  $H(A)$ .

При використанні в ГІС карти найчастіше має місце не один дослід, а декілька, тому необхідно розглядати використання карти як складний дослід. Наприклад, одночасно можуть бути задіяні дослідження  $A$  і  $B$ .

Зазначивши кінцевий результат складного дослідження як  $(a_j, b_i)$ , а його ймовірність, як  $P(a_j, \cdot b_i) = r_{ij}$ , визначимо ентропію складного дослідження  $AB$  у вигляді:

$$H(AB) = -\sum \sum r_{ij} \log r_{ij}.$$

У загальному випадку ймовірність має вигляд:

$$P(a_i b_j) = P(a_i)P(b_j | a_i) = P(b_j) \cdot (a_i | b_j).$$

Якщо  $a_i$  є витік досліду  $A$ , то ймовірність витоків  $b_j$  ( $j = 1, 2, \dots, l$ ) досліду  $B$  у цьому випадку визначиться умовними ймовірностями  $P(b_j | a_i)$ .

Тому функція  $H(B | a_i) = -\sum P(b_j | a_i) \log P(b_j | a_i)$  буде умовною ентропією досліду  $B$  при появі витoku  $a_i$ .

Математичне очікування значення  $H(B | a_i)$  при усіх витоках  $a_i$  має назву середньоумовної ентропії досліду  $B$  при виконанні досліду  $A$  і позначається  $H_A(B) = \sum_p(a_i) H(B | a_i)$ .

Різниця  $H(B) - H_A(B)$  характеризує середню зміну невизначеності досліду  $B$  після виконання досліду  $A$ .

Тому її визначають як середнє значення інформації про дослід  $B$ , отриманої як результат здійснення досліду:

$$I(A, B) = H(B) - H_A(B).$$

Вочевидь, що

$$I(A, A) = H(A) = I(A),$$

тобто ентропія досліду є власною інформацією досліду  $A$  про самого себе.

Припустимо, що є система перероблення і передачі картографічної інформації, у якій на вхід поступає  $a_n$  – вхідне повідомлення  $n$  про картографічний об'єкт,  $\beta_n$  – вихідне повідомлення, створене системою, коли на вхід поступає  $a_n$  і система обробки знаходиться у стані  $\gamma_n$ .

Тоді визначимо ГІС ВП як ймовірнісну модель у такому вигляді:

$$\beta_n = f(a_n, \gamma_n); \gamma_{n+1} = q(a_n, \gamma_n),$$

де  $\gamma_n$  – стан системи обробки до моменту залучення  $n$ -го вхідного повідомлення. Таке визначення дозволяє у загальному вигляді розглядати земну поверхню, як ймовірнісне джерело, яке створює послідовні повідомлення про картографічні об'єкти з обмеженого набору об'єктів, а ГІС як систему обробки послідовностей повідомлень, що надходять на вхід і передачі їх на виході користувачеві.

Висновки про просторові характеристики ГІС почнемо з основної з них – кількості картографічної інформації, яка може надходити, оброблятися і передаватися користувачеві ГІС. З цією метою скористуємося визначенням інформації і ГІС. Вочевидь, що ентропія вхідних повідомлень про картографічні об'єкти  $H(a)$  в результаті обробки картографічної інформації перейде в ентропію вихідних повідомлень  $H(\beta)$ . Тоді інформативна обробка в ГІС можна визначити як кількість інформації, яка дорівнює:

$$I_{обр} = I(f(a, \beta), \beta).$$

Функція  $I_{обр}$  характеризується значенням інформації про картографічні об'єкти місцевості в ГІС ВП за результатами обробки вихідних даних. У випадку, коли бази гео-даних зберігають “усе” про картографічні об'єкти і  $I(a) = I(\beta)$ , інформативність обробки в ГІС буде максимальною.

Справедлива нерівність  $I(a) \geq I(\beta)$ , тобто коли у результаті обробки інформація не збільшується.

У загальному випадку при розрахунку інформативності обробки картографічної інформації в ГІС ВП у першу чергу необхідно врахувати кількість картографічних об'єктів, повідомлення про які занесені до бази даних (БД), кількість збережених числових і атрибутивних показників і характеристик об'єктів, а також показники частоти звернення до цих даних (вірогідність вибору).

Далі, якщо визначити випадкове значення  $\eta$  як повідомлення залучені користувачем, то можна вести мову й про ентропію користувача  $H(\eta)$ . У результаті отримаємо кількість інформації, яку надає.

$$I_{ГІС} = \min(I(\eta), I(\beta)).$$

Інформативність – одна з найважливіших характеристик ГІС. Вона максимальна, коли користувач “знає все” про картографічні об'єкти і відсутні втрати інформації при її обробці і транспортуванні.

Серед інших характеристик ГІС ще одну, не менш важливу характеристику – пропускну спроможність обробки й передачі картографічної інформації користувачеві.

Якщо подати на ГІС випадкову величину  $L$ , то на виході, як результат обробки й випадкових помилок отримаємо величину  $\beta$ , а користувач отримає випадкову величину. У такий спосіб можна розрахувати кількість інформації  $I(a, \eta)$  користувача відносно входу ГІС. При варіюванні випадкової величини  $L$  на вході системи кількість інформації  $I(a, \beta)$  на виході теж може змінюватися. Тоді значення  $C_{\max} = (I(a, \beta), I(a, \eta))$  можна вважати пропускну здатністю ГІС.

$C_{\max}$  характеризує максимальну кількість інформації, яка може бути опрацьована і передана ГІС за одиницю часу, тобто визначає швидкість, з якою ведеться надійне транспортування інформації. Цю характеристику можна поширити й на обробку й передачу картографічної інформації.

Швидкість обробки й передачі інформації визначається формулою

$$R = k / t,$$

де  $k$  – кількість одиниць картографічної інформації;

$t$  – час, що витрачається на обробку або передачу  $k$  одиниць інформації.

У праці (Шеннон К., 1963) було доведено, що можна здійснити якісну і надійну обробку/передачу інформації зі швидкістю, яка не перевищує пропускну здатність. З іншого боку, будь-який спосіб обробки й передачі інформації зі швидкістю, яка перевищує пропускну здатність, призводить до збільшення ймовірності похибок, яка характеризується показником надійності, під яким розуміють ймовірність появи помилки.

Отже, ще однією важливою характеристикою обробки та передачі картографічної інформації в ГІС є її надійність, що визначається як ймовірність появи помилки (картографічне повідомлення  $\beta$  на виході та  $\eta$  – повідомлення, отримане користувачем, різняться від повідомлення  $L$  на вході).

Ймовірність похибки назовемо  $P(e)$ .

$$P(e) = L(f(I(a, \eta)))$$

У загальному випадку помилки в системі зменшують надійну обробку й передачу інформації та гальмують її вихід.

Для підвищення надійності обробки й передачі інформації, зокрема картографічної, важливу роль відіграє спосіб її кодування.

Аналіз об'єктів місцевості, що здійснюється сучасними ГІС, за даними (Кравців С.С., Войтків П.С., Кобелька М.В., 2020) свідчить, що загальна кількість класифікаційних ознак картографічних об'єктів не перевищує значення 900 (760 безпосередньо ознаки об'єктів і 140 підписи до цих об'єктів)

У цьому випадку джерела картографічної інформації, що забезпечують послідовну подачу повідомлень про картографічні об'єкти при рівно ймовірному виборі об'єктів, мають ентропію, яка дорівнює:

$$H_3 = -\sum \frac{1}{900} \log\left(\frac{1}{900}\right) = \log 900 = 2,95 \text{ знак/об'єкт.}$$

Таким чином, для кодування картографічних об'єктів, як повідомлень достатньо в середньому три десятинні знаки, звідси, стосовно підсистеми ГІС ВП, об'єм бази даних рівня бригади складає щонайменше 500 Мб (це 20–25 тис. користувачів). Об'єм семантичної інформації на 1 користувача ~ 2 Кб.

Після аналізу потенційних джерел географічної інформації проводиться оцінка їхньої придатності та технічних можливостей для використання у військових ГІС, що дозволяє визначити найефективніші способи отримання та обробки географічних даних для потреб військових ділянок.

Оцінка придатності потенційних джерел географічної інформації для використання у військових геоінформаційних системах (ГІС) може проводитися шляхом врахування різних критеріїв та параметрів:

Доступність та зручність використання. Оцінка включає аналіз легкості доступу до інформації з джерела, а також його зручності та простоти використання для військових потреб.

Якість даних. Важливо визначити якість географічної інформації, яку надає потенційне джерело. Це може включати точність, роздільну здатність, актуальність та повноту даних.

Технічні можливості. Оцінка технічних можливостей потенційного джерела включає аналіз його здатності забезпечувати необхідні функціональні можливості, такі як обробка, аналіз та візуалізація даних у військових ГІС.

Актуальність інформації. Оцінка включає визначення актуальності та відповідності інформації поточним потребам військових ділянок.

Безпека: Важливо враховувати заходи безпеки та конфіденційності інформації, наданої потенційним джерелом, особливо якщо це стосується військової інформації.

Інтеграція з існуючими системами. Важливо визначити можливість інтеграції географічної інформації з потенційного джерела з існуючими військовими ГІС та іншими системами.

Геоінформаційні системи (ГІС) є важливими інструментами для забезпечення ефективності військових операцій та підвищення рівня національної безпеки. Оптимізація їх використання дозволить задовольнити зростаючі потреби сектору безпеки й оборони України. Ці рекомендації спрямовані на покращення використання ГІС у військових цілях та розглядають перспективи їх подальшого впровадження.

Рекомендації щодо оптимізації використання ГІС.

### 1. Інтеграція нових технологій і джерел даних.

• **Впровадження гіперспектральних сенсорів:** використання гіперспектральних зображень для точнішого виявлення замаскованих об'єктів та аналізу матеріалів.

• **Залучення даних з Інтернету речей (ІоТ):** інтеграція даних з ІоТ-пристроїв для оперативного моніторингу ситуації на полі бою та в тилу.

- **Використання квантових сенсорів:** впровадження квантових сенсорів для підвищення точності вимірювань та виявлення підземних об'єктів.

- **Застосування автономних підводних та наземних роботів:** використання автономних роботів для збору даних у важкодоступних та небезпечних зонах.

## 2. Підвищення точності та надійності даних

- **Покращення роздільної здатності даних:** використання супутників із високою роздільною здатністю для отримання детальних знімків місцевості.

- **Забезпечення частого оновлення даних:** встановлення регулярних інтервалів для оновлення даних із різних джерел для забезпечення актуальності інформації.

- **Впровадження надійних алгоритмів перевірки даних:** використання алгоритмів машинного навчання для автоматичної перевірки точності та надійності даних.

## 3. Покращення аналітичних можливостей

- **Розширення можливостей просторового аналізу:** впровадження нових методів просторового аналізу, таких як тривимірне моделювання та аналіз змін у часі.

- **Розробка та використання моделей симуляції:** створення моделей для симуляції різних військових сценаріїв та прогнозування їх наслідків.

- **Використання штучного інтелекту (ШІ):** інтеграція ШІ для автоматичного аналізу великих обсягів даних та виявлення тенденцій.

## 4. Зміцнення захисту та безпеки інформації

- **Впровадження засобів кібербезпеки:** використання сучасних засобів захисту від кібератак для забезпечення цілісності та конфіденційності даних.

- **Забезпечення багаторівневого доступу:** створення системи багаторівневого доступу до даних для різних користувачів відповідно до їх ролей і прав.

- **Регулярні аудити безпеки:** проведення регулярних аудитів безпеки для виявлення та усунення вразливостей.

## 5. Навчання та підвищення кваліфікації персоналу

- **Організація навчальних програм:** проведення регулярних навчальних програм для персоналу з використання новітніх технологій ГІС.

- **Підвищення кваліфікації через симуляційні тренінги:** використання симуляційних тренінгів для підвищення навичок використання ГІС у різних сценаріях.

- **Обмін досвідом з міжнародними партнерами:** встановлення співпраці та обміну досвідом з військовими та науковими установами інших країн.

**Висновки.** Аналіз сучасного стану розвитку геоінформаційних систем військового призначення підтверджує їхню важливість для сучасного світу та вказує на потенціал для подальшого зростання та вдосконалення. Проте для досягнення цих цілей необхідно продовжувати інвестування в дослідження та розвиток, забезпечуючи таким чином їхню сталість та ефективність у майбутньому.

Перспективи використання ГІС для потреб сектору безпеки й оборони України:

1. Покращення планування та управління операціями.

Впровадження новітніх технологій ГІС дозволить покращити планування та управління військовими операціями за рахунок точнішого аналізу даних і більшої оперативності в прийнятті рішень.

2. Підвищення ефективності розвідки та спостереження.

Залучення сучасних сенсорів і методів аналізу дозволить значно підвищити ефективність розвідувальних та спостережних операцій, забезпечуючи більш точну й актуальну інформацію про противника.

3. Зміцнення національної безпеки.

Оптимізація використання ГІС сприятиме зміцненню національної безпеки, забезпечуючи надійний моніторинг прикордонних зон, критичної інфраструктури та інших важливих об'єктів.

4. Підтримка гуманітарних та рятувальних операцій.

ГІС можуть бути ефективно використані для планування та проведення гуманітарних та рятувальних операцій, забезпечуючи швидкий доступ до актуальної інформації про стан об'єктів та зон катастроф.

5. Вдосконалення логістики та забезпечення

Оптимізація логістичних операцій за допомогою ГІС дозволить підвищити ефективність доставки провіанту, боєприпасів та медичної допомоги, що є критично важливим для успішного виконання військових завдань.

Геоінформаційні системи є важливим інструментом для військових, що дозволяє отримувати велику кількість корисної інформації для планування та проведення операцій. Оцінка кількості інформації, яку можна отримати за допомогою ГІС, включає кількісні та якісні методи аналізу, що забезпечують точність, надійність та комплексність даних. Використання різних джерел інформації, таких як супутникові знімки, дані з БПЛА та наземні сенсори, дозволяє створювати детальні та актуальні карти, необхідні для успішного виконання військових завдань. Удосконалення ГІС та інтеграція нових технологій сприятимуть підвищенню ефективності військових операцій та забезпеченню національної безпеки. Впровадження нових технологій і методів у використання ГІС військового призначення дозволить значно підвищити їх інформативність та ефективність. Рекомендації щодо оптимізації включають інтеграцію нових джерел даних, покращення точності та надійності інформації, розширення аналітичних можливостей, зміцнення захисту та безпеки даних, а також підвищення кваліфікації персоналу. Використання ГІС у секторі безпеки й оборони України має великі перспективи, сприяючи підвищенню рівня національної безпеки та ефективності військових операцій.

#### Список використаних джерел

1. Бурачек, В. Г. Геоінформаційний аналіз просторових даних / В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, В. І. Зацерковний. – Ніжин : ТОВ Видавництво «Аспект-Поліграф», 2011. – 440 с.
2. Зацерковний, В. І. 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.
3. Скрипка, А. О. Аналіз існуючих геоінформаційних технологій, що використовуються в Збройних Силах України та арміях провідних країн світу / А. О. Скрипка, О. Л. Ліманська, Г. Т. Ляшенко, О. О. Шугалій // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2017. – Вип. 57. – С. 179-185. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpviknu\\_2017\\_57\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpviknu_2017_57_25).
4. Теорія ймовірностей та математична статистика : навч. посіб. / О. І. Кушлик-Дивульська, Н. В. Поліщук, Б. П. Орел, П. І. Штабальок. – Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – 212 с.

#### References

1. Burachek, V.H., Zhelezniak, O.O., Zatserkovnyi, V.I. (2011). *Heoinformatsiyni analiz prostorovykh danykh [Geoinformational analysis of spatial data]*. TOV Vydavnytstvo «Aspekt-Polihraf».
2. Zatserkovnyi, V.I., Burachek, V.H., Zhelezniak, O.O., Tereshchenko, A.O. (2014). *Heoinformatsiyni systemy i bazy danykh [Geoinformation systems and databases]*. (Vol. 1). NDU im. M. Hoholia.
3. Skrypka, A.O., Limanska, O. L., Liashenko, H. T., Shuhaliy, O.O. (2017). *Analiz isnuuychikh heoinformatsiynykh tekhnolohii, shcho vykorystovuiutsia v Zbroinykh Sylakh Ukrainy ta armiakh providnykh krain svitu [Analysis of existing geo-information technologies used in the Armed Forces of Ukraine and the armies of the leading countries of the world]*. *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka – Collection of scientific works of the Military Institute of Taras Shevchenko Kyiv National University*, 57, 179-185. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpviknu\\_2017\\_57\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpviknu_2017_57_25).



4. Kushlyk-Dyvulska, O.I., Polishchuk, N.V., Orel, B.P., Shtabaliuk, P.I. (2014). *Teoriia imovirmostei ta matematychna statystyka [Probability theory and mathematical statistics]*. NTUU «KPI».

Отримано 20.09.2024

UDC 528.8

### ***Mykola Bialyi***

Adjunct Researcher in the Scientific and Organizational Department  
Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [nikolai.bialiy@gmail.com](mailto:nikolai.bialiy@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0006-9487-1502>

## **EVALUATION OF THE INFORMATIVE VALUE OF MILITARY GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS**

*In the modern military environment, geographical information systems (GIS) are crucial in supporting military operations and making effective management decisions. To utilize GIS effectively, it is essential to assess the amount of additional information that can be obtained through the implementation of military GIS, as they are used both for visualizing the current situation on the battlefield and for forecasting and making effective decisions under uncertainty.*

*The results of this research will help determine the volume of additional information that can be gained from military GIS and develop recommendations for their optimal use to meet military needs. The study aims to evaluate the volume of data that can be obtained through military GIS. It explores a symbolic model of maps as an "information channel," representing the system or environment for recording, processing, storing, and transmitting data about the terrain from the source (the earth's surface) to the receiver. It defines the bandwidth of GIS and assesses the database volume at the brigade level concerning the military GIS subsystem.*

**Keywords:** *geographical information systems; symbolic model of maps; databases; military needs; GIS bandwidth.*

**References:** *4.*

**Максим Валерійович Міщенко**

аспірант кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
Email: [max.mishchenko771@gmail.com](mailto:max.mishchenko771@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9769-9759>

**ФУНКЦІОНАЛЬНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ КІБЕРЗАГРОЗ ДЛЯ КОРПОРАТИВНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК**

У роботі представлено функціональне моделювання системи виявлення та прогнозування кіберзагроз для корпоративних комп'ютерних мереж із використанням модуля експертних оцінок. У створеній моделі пропонується використовувати компоненти для виявлення та прогнозування кіберзагроз як джерело наповнення бази знань експертної системи, що в поєднанні з експертними оцінками та моделлю на основі теорії ігор, дозволить генерувати звіти та рекомендації щодо кібербезпеки. У роботі описано активності системи, ресурси та механізми виконання згідно зі специфікаціями IDEF0. Зроблено декомпозицію активності «виявлення та прогнозування кіберзагроз із використанням експертних систем» та «виявлення кіберзагроз та мережових аномалій».

**Ключові слова:** кібербезпека; експертні системи; функціональне моделювання; IDEF0; Теорія ігор.

Рис.: 3. Бібл.: 17.

**Актуальність теми дослідження.** Забезпечення кібербезпеки в сучасному світі є актуальним як для окремих користувачів, так і для організацій та корпоративних мереж. Одним з підходів до управління та моніторингу кібербезпеки корпоративних мереж є створення експертних систем, що можуть бути адаптовані відповідно до конкретних конфігурацій корпоративних мереж та потенційних загроз з використанням експертних оцінок. Експертна система – це програмний засіб, що використовує знання експертів у певній предметній області для емуляції процесу міркування людини-експерта [1]. Використанням експертних систем представлено в багатьох дослідженнях у сфері кібербезпеки [2-7].

У своїх дослідженнях різні автори вивчають аспекти застосування експертних систем, як окремої сутності, проте мало робіт присвячено дослідженню розробки комплексного підходу, у якому експертна система містить інші методи та моделі виявлення та прогнозування кіберзагроз для наповнення бази знань. Такий підхід потенційно дозволить експертам більш точно оцінити ризики кібербезпеки та визначити стратегії їх вирішення на основі інформації про виявлені та прогнозовані кіберзагрози.

**Постановка проблеми.** Використання експертних систем, як окремої сутності для вирішення проблем кібербезпеки є досить детально дослідженим питанням, у той час як створення композиції методів, які б містили в собі компоненти виявлення та прогнозування кіберзагроз для наповнення бази знань експертних систем є мало дослідженою проблемою. Моделювання такого комплексного підходу може розширити можливості експертної системи та підвищити точність оцінки ризиків кібербезпеки та можливих протидій кіберзагрозам.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є створення функціональної моделі та архітектури інформаційної системи, функціонал якої спрямований на виявлення та прогнозування кіберзагроз для корпоративних комп'ютерних мереж із використанням експертних систем. Для моделювання буде використана функціональна модель IDEF0.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Для адаптації під середовище виконання модулів виявлення та прогнозування кіберзагроз часто використовують нейронні мережі, статистичні моделі та інші методи штучного інтелекту. Наприклад, у своєму дослідженні А. М. S. N. Amarasinghe та W. A. C. H. Wijesinghe запропонували використовувати згорткову нейронну мережу (Convolutional Neural Network) для виявлення загроз та статистичну модель SARIMA для прогнозування загроз [8]. У роботі Shaukat Kamran та ін. дослідили можливість застосування моделей машинного навчання до задач виявлення спам e-mail,

класифікації шкідливого забезпечення та виявлення вторгнень 3-х типів: виявлення вторгнень на основі сигнатур, виявлення вторгнень на основі аномалій та гібридний підхід до виявлення вторгнень. Автори дійшли висновку, що до кожного з типів кіберзагроз мають бути застосовані різні окремі моделі машинного навчання. Зокрема, з виявленням спам email найкраще справилися моделі дерева рішень та Deep belief network (DBN) – глибока мережа переконань; з виявленням вторгнень найкраще справилась DBN; з виявленням шкідливого забезпечення найкраще справилась модель дерева рішень.

Використання експертних систем для вирішення проблем кібербезпеки є доволі поширеним і дослідженим. Наприклад, у своїй роботі Wirkuttis, N. та ін. [2] розглянули застосування експертних систем для формування реакції та відповіді на кіберзагрозу. Були проаналізовані 2 типи експертних систем: Case-Based Reasoning та Rule-Based Reasoning. У результаті дослідники дійшли висновку, що CBR системи здатні вивчати нові правила та модифікувати наявні, що, на відміну від RBR систем, дає їм змогу адаптуватись під динамічно змінювані середовища, якими є комп'ютерні мережі. Іншим прикладом є дослідження авторів Lakho, V. та ін. [6], які запропонували модель адаптивної експертної системи, що базується на обчисленні інформаційного критерію на основі ентропії та критерію Kullback–Leibler для кластеризації атрибутів розпізнавання в комп'ютерних системах, генеруючи вхідну матрицю нечітких правил. Змодельована система показала точність виявлень від 76,5 до 99,1 %.

Як комплексний підхід до виявлення та прогнозування загроз для комп'ютерних мереж дослідники застосовують моделювання систем виявлення вторгнень – IDS. Наприклад, автори An L та ін. розробили архітектуру системи вторгнень, базуючись на алгоритмі ансамблю дерев рішень та фреймворку розподіленої обробки великих даних Spark [10]. Мотивацією дослідження стала проблема обробки великої кількості мережевих даних за мінімально можливий проміжок часу для вчасної реакції на кіберзагрози. Автори досягли результатів середнього часу виявлення загроз у 13,3 мс, та F1-score від 0,797 до 0,985. В іншому дослідженні, Ayuba John та ін. поставили задачу вирішення проблеми малої точності та великої кількості false-positive спрацювань деяких систем IDS, що пов'язано з великою розмірністю атрибутів мережевого трафіку. Як вирішення цієї проблеми автори запропонували використовувати техніку методу головних компонент PCA для зменшення розмірності атрибутів мережевого трафіку та ансамблеву модель AdaBoost для підвищення точності виявлення вторгнень. У результаті, автори отримали точність 92, 89 та 67,9 % на різних датасетах мережевого трафіку [11]. Проблему підвищення точності систем виявлення вторгнень також розглянули у своїй роботі Abed R.A. та ін. Використавши модель ridge класифікатору на тестовому наборі даних мережевого трафіку, автори досягли точності у 99,85 %. [12]. У роботі Sivasubramanian A. та ін. змодельовали систему виявлення вторгнень з використанням моделі нейронних мереж типу «автокодувальник», що після обробки мережевого трафіку, налаштування та тренування моделі видала результати у 79,18 % точності [13].

Також дослідники використовують методологію функціонального моделювання IDEF0 для моделювання комплексних систем у сфері кібербезпеки. Наприклад, Marko S. та ін. [14] створили модель IDEF0 системи виявлення та реакції на кіберзагрози, пов'язані з шахрайством з використанням методів штучного інтелекту, що дозволила виділити та деталізувати окремі процеси для вибудови стратегій захисту від AI шахрайства.

**Виклад основного матеріалу.** Модель IDEF0 – є аббревіатурою, що означає ICAM DEFinition of Function Modelling. Концепти IDEF0 полягають у тому, що валідна активність повинна мати 5 ознак [15]:

1. Кожна активність має входи, які можуть бути вимогами, виходами інших процесів тощо.

2. Кожна активність використовує ресурси, які забезпечують виконання активності. До ресурсів можуть належати людські, матеріальні, нематеріальні ресурси тощо.

3. Активність має виконуватись згідно зі стандартом і керуватися механізмом контролю.

4. Активність здійснюється згідно з процесом для впливу на щось або маніпулювання чимось.

5. Активність має генерувати вихід або результат.

Першим етапом моделювання комплексної системи з виявлення та прогнозування кіберзагроз для корпоративної комп’ютерної мережі стало створення загальної функціональної моделі, що зображена на рис. 1.



Рис. 1. Функціональна модель процесу виявлення та прогнозування кіберзагроз з використанням експертних систем

Вхідною інформацією для процесу виводу експертної системи було визначено мережевий трафік, конфігурація мережі та база даних виявлених кіберзагроз для мережі. Механізмами контролю є: експертні знання спеціалістів з кібербезпеки, що подаються на вхід рушія висновків експертної системи; мережеві протоколи - використовуються для визначення атак та аномалій трафіку; тренувальні набори даних – використовуються для тренування моделей машинного навчання та статистичних моделей для класифікації шкідливих бінарних файлів та прогнозування аномалій мережевого трафіку; структура бінарних файлів слугує вхідною інформацією для проведення класифікації та виявлення зловмисного ПЗ; CVSS стандарт слугує для оцінки рівня тяжкості виявлених загроз та побудови їх подання на вхід рушія висновків експертної системи. До механізмів керування відносяться експерти з кібербезпеки, апаратне забезпечення, мережа, NLP моделі, статистичні моделі, ML моделі та теоретико-ігрові моделі. На виході отримуємо інформацію про виявлені та прогнозовані кіберзагрози та рекомендації з протидії кіберзагрозам.

Мережевий трафік є найбільшим джерелом кіберзагроз для комп’ютерної мережі. Він може містити в собі шкідливі бінарні файли, аномальний трафік, загрози транспортного та прикладних рівнів. Необроблений мережевий трафік подається на вхід до модулів виявлення та прогнозування загроз. Модулі виконують декомпозицію мережевих пакетів, аналізуючи пакети на різних рівнях OSI. Виявлення загроз відбувається шляхом класифікації елементів трафіку, таких як бінарні файли, та статистичного аналізу трафіку, зокрема виявлення аномалій його кількісних компонент, таких як розмір мережевих пакетів.

Конфігурація мережі є одним з компонентів, що використовується для генерації рекомендацій з протидії загроз. Володіючи інформацією про наявні безпекові конфігурації для мережі та для кожного її вузла, можна робити висновки про необхідність коригування або додавання нових правил та вжиття інших заходів із протидії загрозам.

База даних виявлених кіберзагроз для мережі містить історичні дані про виявлені модулями виявлення кіберзагрози та слугує вхідними даними для побудови мереж Баєса з метою прогнозування ймовірностей майбутніх кіберзагроз.

Базовим механізмом контролю методу виявлення та прогнозування загроз є мережеві протоколи. Кібератаки використовують окремі конкретні протоколи, тому знання протоколів є основою для виявлення атак. Оскільки метод, що розроблюється, здатний працювати з обмеженою множиною кібератак, то відповідні обмеження накладаються й на протоколи, з якими буде працювати метод.

Тренувальні набори даних є механізмом контролю, що використовується моделями машинного навчання та статистичними моделями для попереднього тренування та валідації отриманих результатів. Такі набори даних представлені датасетами шкідливих та безпечних бінарних файлів та датасетами нормального та аномального мережевого трафіку.

Окремим механізмом контролю є структура бінарних файлів. Розроблювана система здатна виявляти шкідливі Linux ELF [17] та Windows PE файли за допомогою моделей машинного навчання. Як вхідні дані для виявлення подаються різні програмні секції файлів, що векторизуються за допомогою NLP технік та моделей та подаються на вхід до класифікатора.

Також як механізм керування використовується CVSS стандарт, що дозволяє експертам з кібербезпеки кількісно оцінити ступінь загрози, що несе та чи інша кібератака.

Експерти з кібербезпеки в розроблюваній системі являють собою людей, що мають знання в предметній області кіберзахисту та оцінюють ризики тих чи інших кібератак із застосуванням кількісної метрики CVSS [15]. Також експерти задають набір протидій атакам, застосовуючи які, рівень CVSS може бути зменшено або нейтралізовано.

Апаратне забезпечення є ресурсом та являє собою компонент корпоративної мережі, на якому розміщується експертна система. Може бути представлений у вигляді роутера або проху-сервера. До апаратного забезпечення також належить вебсервер, який представляє інтерфейс експертної системи та серверне обладнання для тренування ML моделей.

Мережа є сукупністю елементів та механізмів, що забезпечують передачу та отримання трафіку. Вхідна інформація для системи виявлення та прогнозування загроз формується виходячи зі стану мережі та мережевого трафіку. Також для формування рекомендацій експертної системи важлива інформація про кожен вузол та загальну топологію мережі, що дає основу для конкретизації рекомендацій щодо протидії кібератакам.

NLP моделі використовуються для векторизації та класифікації байткодів та окремих секцій бінарних файлів, що дозволяє отримати висновок про шкідливість того чи іншого файлу та інформацію про тип вірусу в файлі, якщо він присутній.

Статистичні моделі дозволяють виявляти аномалії мережевого трафіку та робити прогнози щодо його кількісних показників. Інформація про виявлені та передбачені аномалії передається на вхід експертної системи, де експерти оцінюють їх за шкалою CVSS та встановлюють можливі протидії.

ML моделі використовуються для класифікації шкідливих бінарних Windows PE та Linux ELF файлів та для класифікації шкідливого мережевого трафіку. Результати виявлення загроз передаються вхід до експертної системи, де проходять експертну оцінку та слугують для формування рекомендацій з кіберзахисту.

Теоретико-ігрові моделі використовуються як рушій експертної системи. Базуючись на виявлених та прогнозованих кіберзагроз та експертних знаннях про ці загрози, формується матрична антагоністична стратегічна гра, гравцями якої виступають кіберзлочинець та експерт з кібербезпеки. Вирішуючи гру та знаходячи оптимальні стратегії, експертна система формує звіт з доцільності застосування тої чи іншої стратегії експертом з кібербезпеки та рекомендації щодо пріоритетності застосування стратегій з кіберзахисту.

Інформація щодо виявлених та прогнозованих кіберзагроз повертається системою у вигляді звіту з деталізацією про час виявлення, горизонт прогнозування та інформацією про вузли мережі, для яких виявлено або прогнозовано кіберзагрози. Ця інформація базується на результатах роботи модулів із виявлення та прогнозування загроз. Дана інформація може бути використана системним адміністратором або працівниками департаменту з кіберзахисту як підґрунтя для створення власних стратегій протидії кіберзагрозам.

Рекомендації щодо протидії кіберзагрозам повертаються системою у вигляді звіту з відсортованими за пріоритетом застосування стратегій з кіберзахисту. Звіт формується на основі висновків про оптимальні стратегії кіберзахисту, отриманих рушієм висновків експертної системи. Експертна система використовує знання експертів та результати модулів виявлення і прогнозування кіберзагроз як базу знань, а теоретико-ігрові моделі як математичний апарат рушія висновків. Проаналізувавши цю інформацію, системний адміністратор або працівники департаменту з кіберзахисту можуть вжити запропоновані стратегії на свій розсуд.

Після кожної ітерації роботи експертної системи – а саме після кожного надходження оновленої інформації щодо виявлених або прогнозованих загроз, що оновлюється в реальному часі – база даних виявлених та загроз поповнюється інформацією про нові виявлені загрози.

Для більш детального огляду функціональної моделі було виконано її декомпозицію, що зображена на рис. 2. У результаті декомпозиції процесу виявлення та прогнозування загроз з використанням експертних систем, було виділено 7 робіт:

1. Розбір мережевого трафіку;
2. Виявлення мережевих аномалій та кіберзагроз;
3. Передбачення кіберзагроз та аномалій;
4. Заповнення бази знань експертами;
5. Формування стратегічної матричної гри;
6. Вирішення матричної гри;
7. Формування звітів з кіберзахисту.

Першою роботою процесу виявлення та прогнозування кіберзагроз та мережевих аномалій є розбір мережевого трафіку. Мережевий трафік сканується в реальному часі та аналізується відповідно до мережевого протоколу, який використовується для здійснення конкретних кібератак. Для виявлення мережевих аномалій використовуються часові ряди, сформовані з кількісних показників мережевого трафіку, таких як кількість отриманих та відправлених байтів, кількість вхідних та вихідних пакетів, ring time та ін. Для класифікації мережевого трафіку на шкідливий та безпечний виділяється інформація про ір-адреси, корисне навантаження, тип протоколу, довжину пакета. Для виявлення шкідливого ПЗ із пакетів виділяється файлове навантаження у вигляді сирих байтів. Парсер мережевого трафіку розміщується на роутері, що слугує вхідною точкою для всього мережевого трафіку. У результаті виконання даної роботи отримуємо корисні дані мережевого трафіку, що використовуються для виконання наступної роботи – передбачення кіберзагроз та мережевих аномалій.

Отримавши необхідні елементи мережевого трафіку, система виконує виявлення мережевих кіберзагроз та аномалій. Процес виявлення мережевих кіберзагроз відбувається в реальному часі та без втручання людини. Однак даний процес вимагає попереднього тренування моделей машинного навчання та статистичних моделей на тестових наборах даних. Тестові набори даних зберігаються та періодично оновлюються на окремому фізичному пристрої, що являє собою ftp сервер. Натреновані моделі для класифікації трафіку та виявлення аномалій розгортаються на мережевому обладнанні – роутері, разом з парсером мережевого трафіку, що дозволяє мінімізувати часові затримки обміну даними.

Моделі можуть дотреноуватись на нових даних, що дозволяє підвищити точність виявлення кіберзагроз та аномалій. Виявлені кіберзагрози та аномалії передаються на вхід до роботи «Передбачення кіберзагроз та аномалій».

Для передбачення кіберзагроз та аномалій використовуються мережі Баєса, що за допомогою обчислення умовної ймовірності дозволяють визначити ймовірність виникнення певних відомих загроз у майбутньому, володіючи інформацією про існуючі кіберзагрози.

Отримавши набір виявлених та передбачених кіберзагроз та мережових аномалій, відбувається заповнення бази знань експертної системи генерації звітів з виявлених та прогнозованих кіберзагроз та рекомендацій щодо протидії наявним кіберзагрозам. Для оцінки рівня серйозності кіберзагроз використовується метрика CVSS. Механізмом виконання даного процесу є експерти з кібербезпеки – саме вони визначають значення CVSS для кожної загрози та можливі протидії їй. Зібравши необхідну експертну інформацію, система створює або оновлює платіжну матрицю гри, що використовується для визначення оптимальних стратегій кіберзлочинця та спеціаліста з кіберзахисту. Елементами платіжної матриці гри є значення CVSS для відповідної стратегії кібернападу та кіберзахисту.

Вирішення матричної гри дозволяє отримати чисті або змішані оптимальні стратегії для кіберзлочинця та спеціаліста з кіберзахисту. Механізмом виконання даного процесу є теоретико-ігрові моделі, а саме метод фіктивного розігрування Брауна-Робінсона.

Отримавши вирішення матричної гри в чистих або змішаних стратегіях, експертна система може сформулювати рекомендації з кіберзахисту. Також система виводить звіти по виявлених та прогнозованих загрозах на цей момент часу. При кожному виявленні нових загроз система обчислює матричну гру та оновлює рекомендації та звіти.

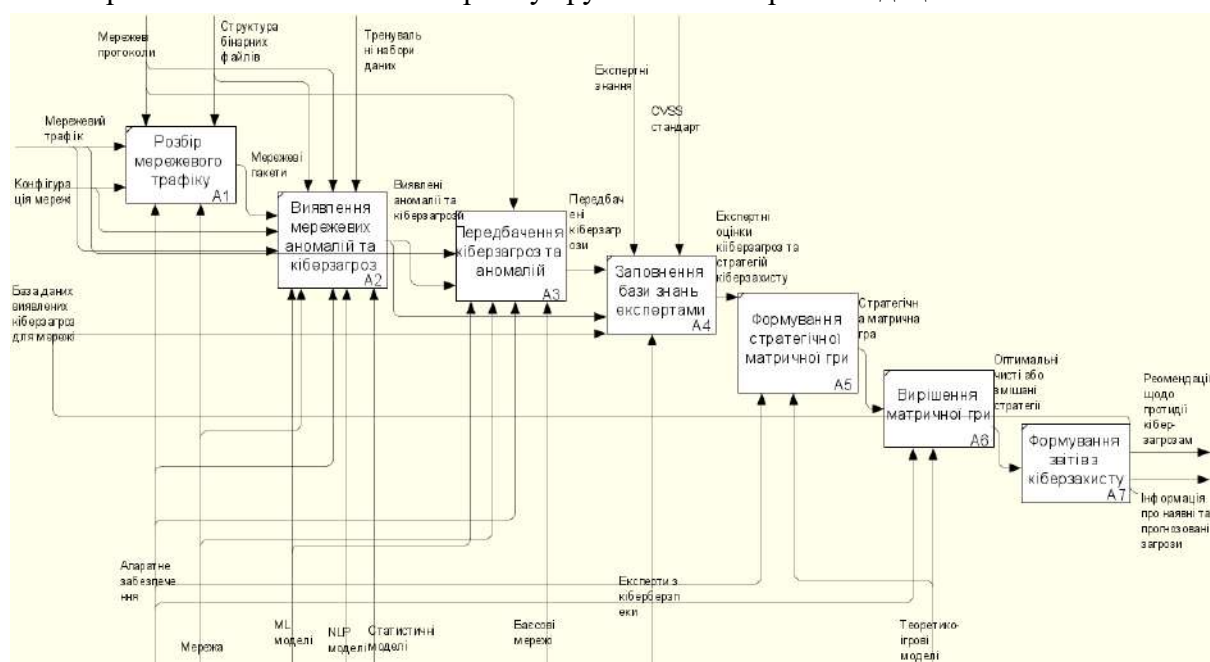


Рис. 2. Декомпозиція функціональної моделі «Виявлення та прогнозування кіберзагроз із використанням експертних систем»

Оскільки процес виявлення мережових аномалій та кіберзагроз складається з декількох окремих робіт, доцільно виконати декомпозицію цього процесу. Декомпозиція процесу «Виявлення кіберзагроз і мережових аномалій» представлена на рис. 3.

Для класифікації шкідливого мережевого трафіку використовуємо ML моделі, а саме модель градієнтного бустингу XGBoost, що натренована на датасеті мережевого трафіку з наявністю кібератак та безпечного трафіку. Механізмами керування даного процесу є датасет мережевого трафіку. Механізмами виконання є апаратне забезпечення у вигляді серверного обладнання для тренування та розгортання моделі, а також моделі-класифікатори XGBoost.

Для виявлення аномалій мережевого трафіку використовується EWMA-статистика та обчислення коефіцієнта Ляпунова. Вхідними даними для цього процесу є мережевий трафік, механізмом контролю є мережеві протоколи. На виході отримуємо виявлений аномальний мережевий трафік, інформація про який надходить до процесу прогнозування кіберзагроз.

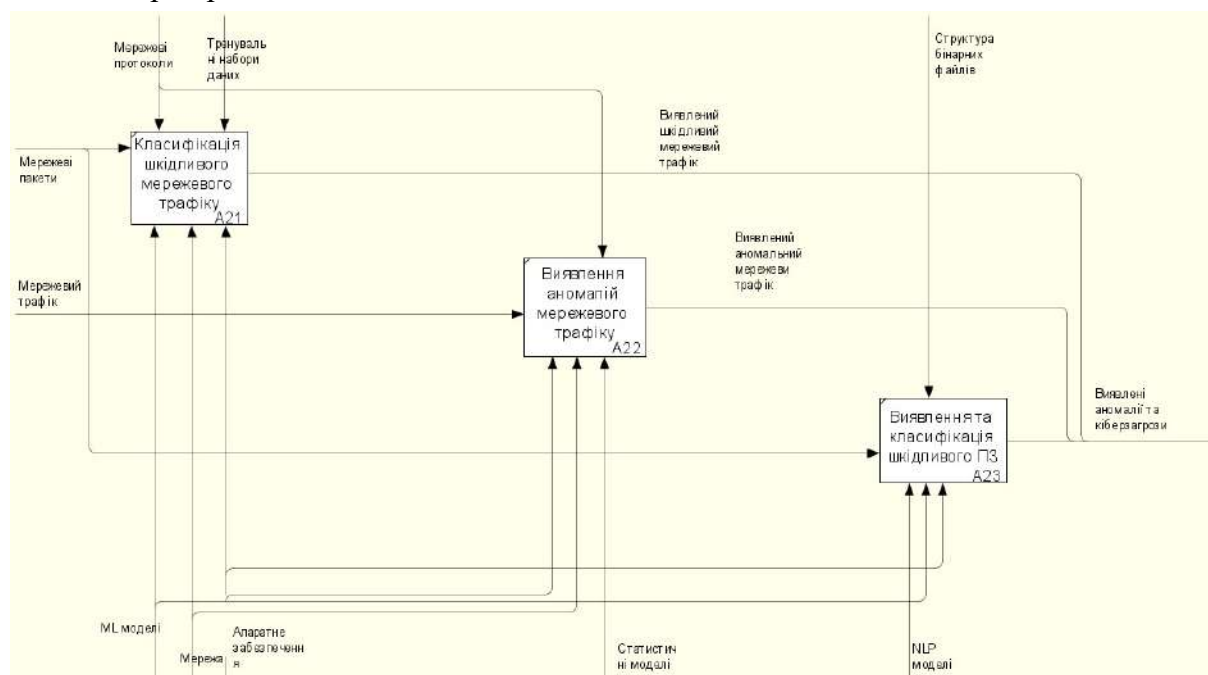


Рис. 3. Декомпозиція процесу «Виявлення кіберзагроз та мережевих аномалій»

Виявлення та класифікація шкідливого ПЗ відбувається на основі мережевих пакетів, з яких вилучається файлове навантаження – послідовність байтів, що являють собою файл. Як механізм керування для роботи використовується структура бінарних файлів, а як механізм виконання слугують NLP моделі для обробки та векторизації байткоду та окремих секцій файлу, апаратне забезпечення та ML моделі, що виконують класифікацію векторизованих файлів, виявляючи та класифікуючи шкідливі файли.

**Висновки відповідно до статті.** У результаті дослідження існуючих робіт із застосування експертних систем та методів штучного інтелекту до вирішення проблеми кібербезпеки, було виявлено, що більшість досліджень акцентують увагу на використанні даних методів окремо, не приділяючи уваги можливості композиції методів штучного інтелекту та експертних систем. Для вирішення цієї проблеми, було створено функціональну модель IDEF0, що репрезентує комплексний метод виявлення та прогнозування кіберзагроз із використанням експертних систем. Створена модель комплексної системи складається з модулів виявлення та прогнозування кіберзагроз для корпоративних комп'ютерних мереж, результати роботи яких є вхідними даними для експертної системи, що генерує звіти та рекомендації з кібербезпеки.



**Список використаних джерел**

1. Hu, S.D. *Expert Systems for Software Engineers and Managers* / S. D. Hu. – Chapman and Hall, New York, New York, 1987. – 303 p.
2. Wirkuttis, N. *Artificial Intelligence in Cybersecurity* / N. Wirkuttis, H. Klein // *Cyber, Intelligence, and Security*. – 2017. – № 1. – Pp. 103-119.
3. Hodhod, Rania. *CyberMaster: An Expert System to Guide the Development of Cybersecurity Curricula* / Rania Hodhod, Shamim Khan, Shuangbao Wang // *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*. – 2019. – № 15. – Pp. 70-81. DOI: <https://doi.org/10.3991/ijoe.v15i03.9890>.
4. Goztepe, Kerim. *Designing Fuzzy Rule Based Expert System for Cyber Security* / Kerim Goztepe // *International Journal of Information Security Science*. – 2012. – № 1. – Pp. 13-19.
5. Hodhod, Rania. *Cybersecurity Curriculum Development Using AI and Decision Support Expert System* / Rania Hodhod, Shuangbao Wang, Shamim Khan // *International Journal of Computer Theory and Engineering*. – 2018. – Vol. 10, №. 4. – Pp. 111-115. DOI: <https://doi.org/10.7763/IJCTE.2018.V10.1209>.
6. *Development of adaptive expert system of information security using a procedure of clustering the attributes of anomalies and cyber attacks* / V. Lakhno, Y. Tkach, T. Petrenko, S. Zaitsev, V. Bazylevych // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 6, №. 9 (84). – Pp. 32-44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85600>
7. Donepudi, Praveen Kumar. *Crossing point of Artificial Intelligence in cybersecurity* / Donepudi, Praveen Kumar // *American journal of trade and policy*. – 2015. – Vol. 2.3 – Pp. 121-128.
8. *AI Based Cyber Threats and Vulnerability Detection, Prevention and Prediction System* / A. M. S. N. Amarasinghe, W. A. C. H. Wijesinghe, D. L. A. Nirmana, A. Jayakody and A. M. S. Priyankara // *International Conference on Advancements in Computing (ICAC)*. – 2019. – Pp. 363-368. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAC49085.2019.9103372>.
9. *Cyber Threat Detection Using Machine Learning Techniques: A Performance Evaluation Perspective* / Kamran Shaukat, Suhui Luo; Shan Chen; Dongxi Liu, All Authors // *International Conference on Cyber Warfare and Security (ICCWS)*. – 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCWS48432.2020.9292388>.
10. *Design of distributed network intrusion prevention system based on Spark and P2DR models* / L. An, J. Qiu, H. Zhang, C. Liu // *Cluster Computing*. – 2024. – Vol. 27. – Pp. 10757-10776. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10586-024-04487-3>.
11. *Ayuba John Enhanced intrusion detection model based on principal component analysis and variable ensemble machine learning algorithm* / Ayuba John, Ismail Fauzi Bin Isnin, Syed Hamid Hussain Madni, Farkhana Binti Muchtar // *Intelligent Systems with Applications*. – 2024. – Vol. 24. – Pp. 2667-3053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200442>.
12. *Abed, R. A. A modified CNN-IDS model for enhancing the efficacy of intrusion detection system* / R. A. Abed, E. K. Hamza, A. J. Humaidi // *Measurement: Sensors*. – 2024. – № 35. – 101299, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101299>.
13. *Sivasubramanian, A. Feature Extraction and Anomaly Detection Using Different Autoencoders for Modeling Intrusion Detection Systems* / A. Sivasubramanian, M. Devisetty, P. Bhavukam // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2024. – № 49(9). – Pp. 13061–13073. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08951-5>.
14. *Ensuring Cybersecurity in the Modern World: Challenges from Artificial Intelligence-Based Fraud Posing a Threat to the Environment* / S. Marko, Y. Tsaruk, H. Skhidnytska, M. Kryshtanovych, U. Nikonenko // *Journal of Ecohumanism*. – 2024. – № 3 (4). – Pp. 1436-1442. DOI: <https://doi.org/10.62754/joe.v3i4.3673>.
15. Філдінг, П. Д. *Як керувати проектами* / Пол Дж. Філінг. – 2020. – 240 с.
16. *Common Vulnerability Scoring System Version 4.0 [Electronic resource]* // *First.ORG*. – 2023. – Access mode: <https://www.first.org/cvss/v4-0/>.
17. *Mishchenko, M. Semantic analysis and classification of malware for UNIX-like operating systems with the use of machine learning methods* / M. Mishchenko, M. Dorosh // *Applied Aspects of Information Technology = Прикладні аспекти інформ. технологій*. – 2022. – Vol. 5, № 4. – Pp. 371-386. DOI: <https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.25>.

### References

1. Hu, S. D. (2013). *Expert Systems for Software Engineers and Managers*. Switherland: Springer US. DOI: 10.1007/978-1-4613-1065-5
2. Wirkuttis, N. and Klein, H. (2017). Artificial Intelligence in Cybersecurity. *Cyber, Intelligence, and Security, 1*, 103-119.
3. Hodhod, R. & Khan, S. & Wang, S. (2019). CyberMaster: An Expert System to Guide the Development of Cybersecurity Curricula. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*. DOI: <https://doi.org/10.3991/ijoe.v15i03.9890>.
4. Goztepe, K. (2012). Designing Fuzzy Rule Based Expert System for Cyber Security. *International Journal of Information Security Science, 1*, 13-19.
5. Hodhod, R. & Wang, S. & Khan, S. (2018). Cybersecurity Curriculum Development Using AI and Decision Support Expert System. *International Journal of Computer Theory and Engineering, 10*, 111-115. DOI: <https://doi.org/10.7763/IJCTE.2018.V10.1209>.
6. Lakhno, V., Tkach, Y., Petrenko, T., Zaitsev, S., & Bazylevych, V. (2016). Development of adaptive expert system of information security using a procedure of clustering the attributes of anomalies and cyber attacks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (9(84))*, 32–44. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85600>.
7. Donepudi, P. K. (2015). Crossing point of Artificial Intelligence in cybersecurity. *American journal of trade and policy, 2.3*, 121-128.
8. Amarasinghe, A. M. S. N., Wijesinghe, W. A. C. H., Nirmana, D. L. A., Jayakody, A. and Priyankara, A. M. S. (2019). AI Based Cyber Threats and Vulnerability Detection, Prevention and Prediction System. International Conference on Advancements in Computing (ICAC), Malabe, Sri Lanka. P. 363-368. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAC49085.2019.9103372>.
9. Shaukat, K., Luo, S. & Chen, S. & Liu, D. (2020). Cyber Threat Detection Using Machine Learning Techniques: A Performance Evaluation Perspective. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCWS48432.2020.9292388>.
10. An, L., Qiu, J., Zhang, H., Liu, C. (2024). Design of distributed network intrusion prevention system based on Spark and P2DR models. *Cluster Computing, 27*, 10757–10776. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10586-024-04487-3>.
11. John, A., Isnin, I. F. B., Madni, S. H. H., Muchtar, F. B. (2024). Enhanced intrusion detection model based on principal component analysis and variable ensemble machine learning algorithm. *Intelligent Systems with Applications, 24*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200442>.
12. Abed, R. A., Hamza, E. K., Humaidi, A. J. (2024). A modified CNN-IDS model for enhancing the efficacy of intrusion detection system. *Measurement: Sensors, 35*. art. no. 101299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101299>.
13. Sivasubramanian, A., Devisetty, M., Bhavukam, P. (2024). Feature Extraction and Anomaly Detection Using Different Autoencoders for Modeling Intrusion Detection Systems. *Arabian Journal for Science and Engineering, 49(9)*, 13061-13073. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08951-5>.
14. Marko, S., Tsaruk, Y., Skhidnytska, H., Kryshchanovych, M., Nikonenko, U. (2024). Ensuring Cybersecurity in the Modern World: Challenges from Artificial Intelligence-Based Fraud Posing a Threat to the Environment. *Journal of Ecohumanism, 3(4)*, 1436-1442. DOI: <https://doi.org/10.62754/joe.v3i4.3673>.
15. Fielding, P. J. (2020). How to manage projects. Kogan Page.
16. Common Vulnerability Scoring System Version 4.0. (2023). First.ORG. URL: <https://www.first.org/cvss/v4-0/>.
17. Mishchenko, M., Dorosh, M. (2022). Semantic analysis and classification of malware for UNIX-like operating systems with the use of machine learning methods. *Applied aspects of information technologies, 5(4)*, 371-386. DOI: <https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.25>.

Отримано 07.10.24

**Maksym Mishchenko**

postgraduate of the Department of Information Technologies and Software Engineering  
National University «Chernihiv Polytechnic» (Chernihiv, Ukraine)

Email: [max.mishchenko771@gmail.com](mailto:max.mishchenko771@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9769-9759>

**FUNCTIONAL MODEL OF THE CYBER THREATS DETECTION  
AND PREDICTION SYSTEM FOR CORPORATE COMPUTER NETWORKS  
USING EXPERT ASSESMENTS**

*The use of expert systems as a separate entity for solving cyber security problems is a sufficiently detailed researched issue. In contrast, the creation of a composition of methods that would contain components of cyber threat detection and forecasting to fill the knowledge base of expert systems is a problem that is less researched. Modeling such a comprehensive approach can expand the capabilities of the expert system and increase the accuracy of assessing cyber security risks and possible countermeasures against cyber threats. In this work, we present functional modeling using IDEF0 diagrams of the cyber threat detection and forecasting system for corporate computer networks using expert assessments. In the created model, it is proposed to use components for detecting and predicting cyber threats as a source of filling the expert system's knowledge base, which, combined with expert assessments and the Game theory model, will generate reports and recommendations on cyber security. We suggest to use CVSS score of a cyber threats with or without countermeasures as a quantitative measure for the expert assessments. For generating cyber defense recommendations, we create a zero-sum matrix game which is solved with an iterative algorithm. CVSS assessments are used as the payoffs in the matrix game. Detection of network traffic anomalies using Chaos Theory and Ewma statistics, classification of malicious network traffic, and classification of malicious binary files are proposed as methods of threat detection. To predict the probabilities of network threats, the application of the Bayesian network is proposed. The work describes system activities, resources, and execution mechanisms according to IDEF0 specifications. Decomposition of the activity "detection and prediction of cyber threats using expert systems" and "detection of cyber threats and network anomalies" was made. As a result, we presented a model for detecting and predicting cyber threats using expert assessments, which allows us to expand the capabilities of the expert system for the assessment of cyber security risks and possible countermeasures against cyber threats.*

**Keywords:** cybersecurity; expert systems; functional modelling; IDEF0; Game theory.

*Fig.: 3. References: 17.*

**Владислав Олексійович Прищеп<sup>1</sup>, Артем Олександрович Задорожній<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>аспірант, здобувач наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 122

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [vladpryshchepa1@gmail.com](mailto:vladpryshchepa1@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7627-0456>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [zaotroy@gmail.com](mailto:zaotroy@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3424-7293>

## ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ НАПРЯМІВ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РЕАГУВАННЯ НА НАДЗВИЧАЙНІ СИТУАЦІЇ

*Стаття надає огляд сучасних підходів до моделювання процесів реагування на надзвичайні ситуації. Описані основні тенденції в застосуванні різних видів моделей для забезпечення моделювання процесів реагування на надзвичайні ситуації. Зокрема, досліджено агентне моделювання, моделі на основі теорії ігор, використання системної динаміки та моделювання на основі машинного навчання. Стаття включає аналіз можливостей розвитку та ймовірних напрямків майбутніх досліджень у цій сфері, що можуть сприяти оптимізації роботи рятувальних служб та підвищення швидкості й точності реагування.*

**Ключові слова:** надзвичайна ситуація; моделювання; моделювання процесів реагування; реагування на надзвичайні ситуації; агентне моделювання; теорія ігор; система динаміка; машинне навчання.

Рис.: 2. Бібл.: 16.

**Актуальність теми дослідження.** Стаття є оглядовою. Надзвичайні ситуації виникають у результаті природних катастроф, техногенних аварій або соціальних конфліктів і можуть призвести до значних людських втрат, економічних збитків та екологічних наслідків. Важливість оперативного та точного реагування на такі події не може бути переоцінена, оскільки затримки або неправильні дії під час кризових ситуацій можуть призвести до ще більш серйозних наслідків. З кожним роком масштаб і складність надзвичайних ситуацій зростають, що вимагає використання більш досконалих методів управління та координації дій рятувальних служб, урядових органів та інших учасників процесу.

Правильність і швидкість реагування на надзвичайні ситуації залежить від здатності ефективно прогнозувати розвиток подій, оптимізувати ресурси та координувати дії різних служб у режимі реального часу. Попри наявність різноманітних моделей управління надзвичайними ситуаціями, керівництво ними часто здійснюється неефективно [1]. У зв'язку з цим виникає необхідність у впровадженні сучасних методів моделювання, які дозволяють оцінити можливі сценарії розвитку ситуації, спрогнозувати наслідки рішень та оптимізувати процеси реагування.

Моделювання надзвичайних ситуацій стає важливим інструментом, що дозволяє створювати реалістичні симуляції подій, тестувати різноманітні стратегії реагування і забезпечувати їх адаптацію до швидкозмінних умов. Це дає змогу підвищити готовність системи управління до реальних викликів, забезпечити точну координацію дій і ефективніше використовувати доступні ресурси для мінімізації шкоди та ризиків під час кризових ситуацій. Оскільки кількість надзвичайних ситуацій зростає, важливо інтегрувати новітні розробки в існуючі системи, що надає актуальності даному дослідженню.

**Постановка проблеми.** Сьогодні надзвичайні ситуації здаються складнішими, ніж будь-коли. Процес управління надзвичайними ситуаціями також стає важчим через збільшення кількості залучених сторін, постраждалих та обсягу ресурсів. Ця складність, притаманна управлінню надзвичайними ситуаціями, ставить перед особами, які ухвалюють рішення, і особами, які займаються надзвичайними ситуаціями, багато проблем [2].

На сьогодні традиційні підходи до кризового управління часто виявляються неефективними у випадках, коли необхідно швидко й точно ухвалювати рішення, що базуються на аналізі великого обсягу даних у реальному часі. Крім того, багато існуючих моделей є недостатньо гнучкими та не можуть оперативного адаптуватися до змінних умов, що виникають під час розвитку надзвичайної ситуації.

Основною проблемою є відсутність досконалих систем моделювання, які могли б враховувати цю велику кількість змінних та впливових факторів. Наявні підходи до моделювання часто зосереджуються на окремих аспектах реагування, не забезпечуючи повного охоплення всіх етапів від підготовки до відновлення після надзвичайної ситуації.

Таким чином, постає необхідність в аналізі можливостей та ймовірних напрямів майбутніх наукових робіт у визначеній сфері, що робить актуальною проблему дослідження сучасних напрямів моделювання процесів реагування на надзвичайні ситуації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** у сфері моделювання процесів реагування на надзвичайні ситуації свідчить про активне використання та розвиток різноманітних методів, таких як імітаційне моделювання, геоінформаційні системи, а також штучного інтелекту для покращення планування та координації дій під час надзвичайних ситуацій.

Одним із перспективних напрямів є застосування агентно-орієнтованих моделей для моделювання евакуаційних процесів [3]. Такі моделі використовуються для оцінки ризиків і планування евакуацій під час цунамі, що дозволяє підвищити точність прогнозів і ефективність реагування. У цьому ж напрямку працюють і інші дослідники, які використовують агентні моделі для симуляції евакуацій у метрополітенах, наголошуючи на важливості правильної поведінки натовпу та стратегій виходу [4].

Значна увага також приділяється використанню штучного інтелекту [5]. При цьому роль штучного інтелекту полягає в прийнятті рішень у реальному часі, що дозволяє підвищити швидкість і точність реагування служб під час кризових ситуацій. Це особливо важливо при роботі з різними сценаріями криз, де використання машинного навчання допомагає автоматизувати процеси реагування та підвищити адаптивність систем.

Попри прогрес у моделюванні надзвичайних ситуацій, залишається низка викликів, таких як складність інтеграції різних типів моделей, робота з непередбачуваними факторами та недостатня адаптивність систем до нових викликів. Є потреба у створенні більш гнучких і багатофункціональних моделей, що можуть швидко адаптуватися до змінних умов під час кризових подій.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Незважаючи на значний прогрес у розвитку методів моделювання процесів реагування на надзвичайні ситуації, залишається низка невіршених питань. Одним із таких завдань є створення інтегрованих моделей, які б охоплювали всі етапи реагування – від раннього виявлення і прогнозування до координації дій після завершення надзвичайної ситуації. Більшість існуючих моделей фокусуються лише на окремих аспектах кризового управління, що обмежує їх використання у складних та динамічних умовах сучасних надзвичайних ситуацій.

Крім того, недостатньо дослідженим є питання адаптації моделей до умов швидких змін у реальному часі. Випадки природних катастроф або техногенних аварій часто супроводжуються різкими змінами обставин, що потребує негайного перегляду стратегій реагування. Поточні моделі не завжди здатні оперативного підлаштуватися до нових умов, що ставить під сумнів їх ефективність у таких ситуаціях.

**Мета статті.** Метою цієї статті є огляд сучасних напрямів моделювання процесів реагування на надзвичайні ситуації, аналіз існуючих підходів та технологій, а також визначення перспектив їхнього подальшого розвитку для покращення систем управління кризовими ситуаціями.

**Виклад основного матеріалу.**

**Надзвичайна ситуація** – ситуація на окремій території чи суб'єкті господарювання на ній або водному об'єкті, яка характеризується порушенням нормальних умов життєдіяльності населення, спричинена катастрофою, аварією, пожежею, стихійним лихом, епідемією, епізоотією, епіфітотією, застосуванням засобів ураження або іншою небезпечною подією, що призвела (може призвести) до виникнення загрози життю або здоров'ю населення, великої кількості загиблих і постраждалих, завдання значних матеріальних збитків, а також до неможливості проживання населення на такій території чи об'єкті, провадження на ній господарської діяльності [6].

Існують різні підходи до класифікації надзвичайних ситуацій. Згідно з Національним класифікатором ДК 019:2010, надзвичайні ситуації поділяються на 4 класи за джерелом походження та на 4 рівні за масштабом прояву. На рис. 1 зображена схема класифікації надзвичайних ситуацій.

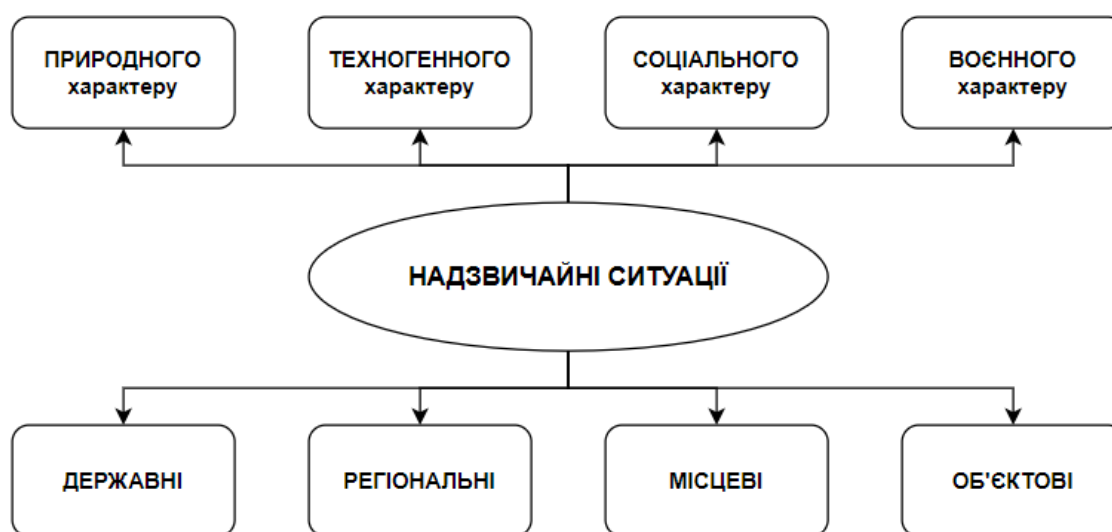


Рис. 1. Схема класифікації надзвичайних ситуацій

Залежно від обсягів заподіяних надзвичайною ситуацією наслідків, кількості постраждалих і загиблих, обсягів технічних і матеріальних ресурсів, необхідних для ліквідації її наслідків, визначають такі рівні надзвичайних ситуацій [7]:

- державний;
- регіональний;
- місцевий;
- об'єктовий.

Залежно від характеру походження подій, що можуть зумовити виникнення надзвичайних ситуацій на території України, визначають такі види надзвичайних ситуацій [7]:

- техногенного;
- природного;
- соціального;
- воєнного.

Усвідомлення природи та різноманітності надзвичайних ситуацій є критично важливим для розробки ефективних систем моделювання та реагування.

**Моделювання надзвичайних ситуацій** – це процес створення віртуальних моделей і сценаріїв, які імітують розвиток реальних кризових подій, таких як природні катастрофи, техногенні аварії або соціальні потрясіння. Мета моделювання полягає в аналізі можливих наслідків надзвичайних ситуацій, оцінці ризиків та перевірці ефективності рі-

зних стратегій реагування. Моделі можуть враховувати багато факторів, включаючи характер події, ресурсні обмеження, динаміку розвитку та взаємодію різних служб, що беруть участь у ліквідації наслідків.

Моделювання є важливим інструментом для покращення підготовленості до надзвичайних ситуацій, оскільки дозволяє досліджувати потенційні сценарії розвитку подій без ризику для життя і ресурсів. Воно допомагає розробити та оптимізувати плани реагування, визначити вразливі місця в системах управління, а також мінімізувати час і витрати на ліквідацію наслідків. Крім того, моделювання дозволяє проводити навчання для рятувальних служб і підвищувати їх готовність до непередбачуваних ситуацій, що в кінцевому результаті сприяє зниженню кількості жертв і збитків.

Останнім часом у моделюванні надзвичайних ситуацій набувають популярності кілька перспективних напрямів. Серед них особливу увагу заслуговують агентно-орієнтоване моделювання, моделі на основі теорії ігор, системна динаміка та моделювання на основі машинного навчання.

На рис. 2 можна побачити схему сучасних тенденцій у моделюванні процесів реагування на надзвичайні ситуації.

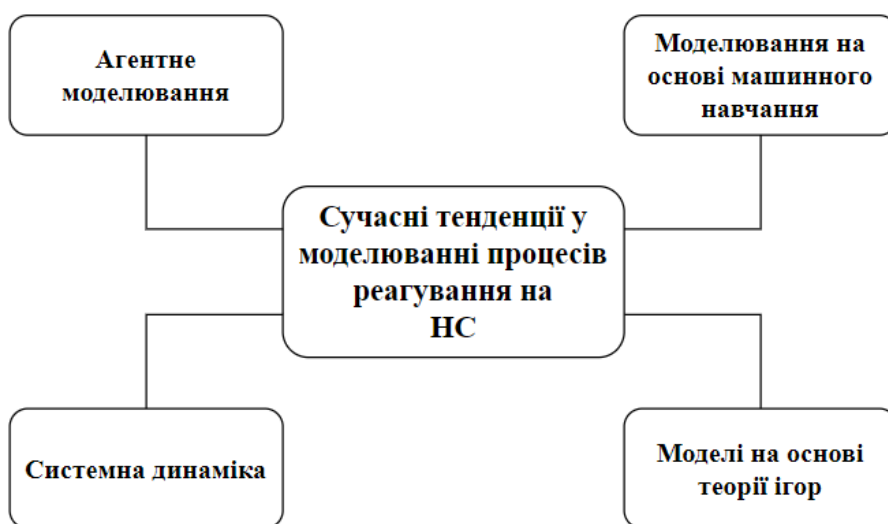


Рис. 2. Сучасні тенденції в моделюванні процесів реагування на надзвичайні ситуації

**Агентне моделювання** – це моделювання дій і взаємодії автономних агентів (як окремих, так і колективних організацій, таких як організації чи групи), щоб зрозуміти поведінку системи та те, що керує її результатами. Воно поєднує в собі елементи теорії ігор, складних систем, емерджентності, обчислювальної соціології, багатоагентних систем та еволюційного програмування.

Моделі на основі агентів використовуються для вивчення взаємодії між людьми, речами, місцями та часом [8]. Агенти запрограмовані на поведінку та взаємодію з іншими агентами та середовищем певним чином. Ці взаємодії спричиняють виникнення ефектів, які можуть відрізнятися від ефектів окремих агентів. Агентне моделювання відрізняється від традиційних методів на основі регресії тим, що, як і моделювання системної динаміки, воно дозволяє досліджувати складні системи, які демонструють незалежність індивідів і петлі зворотного зв'язку в причинно-наслідкових механізмах. Воно не обмежується даними спостережень і може використовуватися для моделювання експериментів, які неможливо або неетично проводити в реальному світі. Однак моделювання на основі агентів не позбавлене обмежень. Параметри даних (наприклад, рівень репродуктивності при інфекційних захворюваннях) часто важко знайти в літературі. Крім того, валідність

моделі може бути важко оцінити, особливо при моделюванні неспостережуваних асоціацій. Загалом моделі на основі агентів надають додатковий інструмент для оцінки впливу на результати. Це особливо корисно, коли відомо чи підозрюється наявність взаємозв'язку, взаємності та петель зворотного зв'язку або коли експерименти в реальному світі неможливі.

У контексті надзвичайних ситуацій агентно-орієнтоване моделювання дозволяє створювати детальні моделі реагування, які враховують поведінку окремих рятувальників, жителів, урядових органів та інших учасників. Це моделювання може використовуватися для прогнозування того, як різні групи реагують на кризову ситуацію, як відбувається евакуація, розподіл ресурсів і координація між різними організаціями.

Прикладом системи реагування з використанням агентно-орієнтованого моделювання є FLEE. Це набір інструментів для моделювання на основі агентів, створений для імітації пересування людей між географічними точками під час кризових ситуацій, таких як конфлікти чи природні катастрофи. FLEE активно використовується для моделювання переміщень біженців і внутрішньо переміщених осіб.

Із застосування агентного моделювання пов'язані наступні переваги [9]:

1. Розуміння мікрорівня. Деталі мають вирішальне значення для агентного моделювання, оскільки агенти можуть представляти що завгодно – окремих осіб, групи чи організації. Таким чином, це дозволяє аналізувати та розуміти на мікрорівні.

2. Симуляція в реальному світі. Агентне моделювання допомагає в реалістичному моделюванні та розумінні складних систем шляхом інтеграції різних компонентів та їх взаємозалежностей.

3. Гнучкість. Забезпечується гнучкість і можливість моделювати системи з кількома складними взаємодіями, які традиційні методи моделювання часто вважають складними.

4. Візуалізований процес. Забезпечується візуальний спосіб представлення складних систем, допомагаючи концептуальному розумінню та інтерпретації.

Попри переваги агентного моделювання, існують потенційні проблеми [9]:

1. Обчислювальна інтенсивність. Оскільки модель включає в себе безліч агентів, які взаємодіють одночасно, вона може стати вимогливою до обчислень і ресурсів.

2. Обмежена масштабованість. Хоча можна представити багато агентів у моделі, керування правилами та взаємодією цих агентів стає складним, оскільки їх кількість зростає. Таким чином, це накладає обмеження на масштабованість моделі.

3. Перевірка моделі. Оскільки агентне моделювання має справу зі складними системами та стохастичною поведінкою, перевірка цих моделей може бути складною справою, а точність їх прогнозування може бути неточною.

Незважаючи на ці недоліки, агентний підхід у моделюванні є потужним інструментом для розуміння та управління складними процесами реагування на надзвичайні ситуації.

**Моделі на основі теорії ігор** – це підхід до моделювання, що використовує математичні теорії ігор для аналізу й оптимізації стратегій у ситуаціях, де результат залежить від взаємодії кількох агентів або гравців [10]. Теорія ігор вивчає, як ці гравці ухвалюють рішення, щоб досягти найкращих результатів для себе, враховуючи можливі рішення інших учасників.

Моделі на основі теорії ігор можуть бути корисним інструментом для моделювання процесів реагування на надзвичайні ситуації, оскільки дозволяють аналізувати стратегічні взаємодії між різними учасниками, такими як урядові органи, служби порятунку та інші зацікавлені сторони. Теорія ігор допомагає зрозуміти, як ці учасники ухвалюють рішення в умовах конфлікту інтересів та обмежених ресурсів, що може бути критично важливим для ефективного управління кризовими ситуаціями.

Такий підхід може бути застосований для моделювання процесів безпечної евакуації натовпу в надзвичайних ситуаціях [11].



Прикладом системи, що використовує теорію ігор для моделювання процесів прийняття рішень різними учасниками під час реагування на НС, є RescueSim. У цій системі теорія ігор використовується для моделювання взаємодії між рятувальними службами або державними структурами, де кожен учасник може мати власну стратегію дій.

**Системна динаміка** – це підхід до вивчення поведінки складних систем у часі, який враховує структуру системи та взаємодію між її елементами. У тому числі: запасів і потоків, петель зворотних зв'язків, табличних функцій, затримок реакції, впливу середовища та інших.

Цей підхід вивчає взаємодію різних елементів системи та їх вплив на загальну динаміку її функціонування. Системна динаміка використовує математичні моделі для опису і симуляції процесів, що протікають у системах. Наприклад, запаси й потоки, затримки реакції та петлі зворотного зв'язку. Це дозволяє моделювати складні взаємодії в процесах реагування на надзвичайні ситуації, зосереджуючись на довгострокових ефектах і взаємозалежностях між різними елементами системи. Зазначений підхід допомагає аналізувати вплив рішень і дій служб реагування на розвиток кризової ситуації з плином часу. Це особливо корисно для прогнозування наслідків і розробки стратегій управління кризовими ситуаціями.

У контексті моделювання процесів реагування на надзвичайні ситуації підхід системної динаміки застосовується для дослідження структури зворотного зв'язку та моделі поведінки складної системи, а також та широко використовується для вирішення складних проблем управління надзвичайними ситуаціями, особливо при постачанні та плануванні ресурсів у надзвичайних ситуаціях [12-13], процесах евакуації [14], а також надзвичайних ситуацій у разі повені [15].

Однак, моделі системної динаміки можуть бути складними у створенні через необхідність точного визначення параметрів і залежностей системи. Вони також потребують якісних даних для точного опису системи і її динаміки. Недостатність даних може обмежити точність результатів.

Одним з інструментів для моделювання з використанням системної динаміки є програмне середовище Vensim. Воно надає графічний інтерфейс моделювання з діаграмами запасів і потоків, причинно-наслідкових циклів на основі текстової системи рівнянь декларативною мовою програмування, яке може використовуватися для аналізу процесів реагування на НС.

**Моделювання на основі машинного навчання** використовує алгоритми та статистичні моделі для навчання з даних та виявлення закономірностей, які можуть бути використані для прогнозування і прийняття рішень. В основі машинного навчання лежить ідея, що моделі можуть автоматично вдосконалюватися та адаптуватися в міру надходження нових даних.

Алгоритми машинного навчання дуже підходять для обробки великих обсягів просторово-часових даних, які генеруються в таких ситуаціях. Таким чином, протягом багатьох років вони використовувалися в управлінні надзвичайними ситуаціями, щоб допомогти особам, які першими реагують, і особам, які ухвалюють рішення в таких ситуаціях, і, зрештою, покращити запобігання катастрофам, готовність, реагування та відновлення [16].

Цей підхід дозволяє автоматизувати прийняття рішень, аналізувати реальні сценарії в режимі реального часу і швидко адаптуватися до змінних умов. Моделі машинного навчання, такі як нейронні мережі та методи кластеризації, можуть прогнозувати розвиток кризових подій, оптимізувати евакуаційні маршрути, розподіл ресурсів і координацію дій служб порятунку.

Однак обмеженням є те, що моделі машинного навчання вимагають великого обсягу якісних даних для навчання і можуть бути менш ефективними в умовах, де доступ до даних обмежений або дані є неточними.

Для моделювання процесів реагування на надзвичайні ситуації можуть бути використані такі інструменти машинного навчання: TensorFlow і PyTorch для глибокого навчання, Scikit-learn для загальних задач машинного навчання, таких як класифікація та регресія, H2O.ai для аналізу великих даних і прогнозування.

**Висновки.** Кожен розглянутий напрям моделювання процесів реагування на надзвичайні ситуації має свої унікальні можливості для аналізу й оптимізації реагування на надзвичайні ситуації, які можуть сприяти підвищенню ефективності управлінських і оперативних рішень.

Агентноорієнтоване моделювання забезпечує детальне вивчення взаємодій між різними учасниками й елементами системи, дозволяючи врахувати складні динаміки кризових ситуацій. Моделі на основі теорії ігор пропонують інструменти для оптимізації координації між різними агентами, що є важливим для узгоджених і ефективних дій. Системна динаміка дозволяє довгостроково прогнозувати наслідки й оцінювати вплив змін у системі, а моделювання на основі машинного навчання використовує сучасні алгоритми для прогнозування та оптимізації, забезпечуючи адаптивність і обробку великих даних.

Попри значні переваги, кожен з підходів має певні обмеження. Агентно-орієнтоване моделювання може бути складним у реалізації, моделі на основі теорії ігор потребують точного визначення стратегій, системна динаміка може бути чутливою до припущень, а машинне навчання вимагає якісних даних і обчислювальних ресурсів.

Загалом, впровадження і вдосконалення цих методів може значно покращити управління надзвичайними ситуаціями, підвищити готовність до кризових ситуацій і забезпечити більш ефективну реакцію. Розвиток і інтеграція цих підходів є критично важливими для підвищення стійкості суспільства до надзвичайних ситуацій та забезпечення безпеки і благополуччя населення.

### Список використаних джерел

1. Naif, R. Alrehaili. The Need for Emergency Management Models / Naif R. Alrehaili, Yousef N. Almutairi, Hamdan M. Alghamdi, Musaad S. Almuthaybiri // *Journal of Emergency Management and Disaster Communications*. – 2023. – Vol. 4, No 1. – Pp. 17-31. DOI: 10.1142/S2689980923500021.
2. Chuanjun, Ren. Agent-Based Modeling and Simulation on Emergency Evacuation / Chuanjun Ren, Chenghui Yang & Shiyao Jin // *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Complex Sciences. Complex*. – 2009. – Vol. 5. DOI: 10.1007/978-3-642-02469-6\_25.
3. Wang, Z. A novel agent-based model for tsunami evacuation simulation and risk assessment / Z. Wang, G. Jia // *Nat Hazards*. – 2021. – Vol. 105, № 2. – Pp. 2045-2071. DOI: 10.1007/s11069-020-04389-8.
4. Edrisi, A. Simulating Metro Station Evacuation using Three Agent-based Exit Choice Models / A. Edrisi, B. Lahoorpoor, R. Lovreglio // *Case Studies on Transport Policy*. – 2021. – Vol. 9, № 3. – Pp. 1261-1272. DOI: 10.1016/j.cstp.2021.06.011.
5. Jieyu, Chen. Pedestrian evacuation simulation in indoor emergency situations: Approaches, models and tools / J. Chen, T. Shi, N. Li // *Safety Science*. – 2021. – Vol. 142. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105378.
6. Кодекс цивільного захисту України (2013) (Україна) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://web.archive.org/web/20170912044125/http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>.
7. Класифікатор надзвичайних ситуацій ДК 019:2010 (2010) (Україна). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va457609-10#Text>.
8. Agent-Based Modeling. [Electronic resource] // Columbia University Mailman School of Public Health. – Access mode: <https://www.publichealth.columbia.edu/research/population-health-methods/agent-based-modeling>.
9. What is Agent-Based Modeling? [Electronic resource] // AI Master Class. – Access mode: <https://www.aimasterclass.com/glossary/agent-based-modeling>.

10. Gupta, U. Multievent crisis management using noncooperative multistep games / U. Gupta, N. Ranganathan // *IEEE Transactions on Computers*. – 2007. – Vol. 56, № 5. – Pp. 577-589. DOI: 10.1109/TC.2007.1023.
11. Maria, Gul. A Game-Theoretic Approach to Safe Crowd Evacuation in Emergencies / Maria Gul, Imran Ali Khan, Gohar Zaman, Atta Rahman, Jamaluddin Mir, Sardar Asad Ali Biabani, May Issa Aldossary, Mustafa Youldash, Ashraf Saadeldeen, Maqsood Mahmud, Asiya Abdus Salam, Dania Alkhulaifi, Abdullah AlTurkey // *Computers, Materials and Continua*. – 2024. – Vol. 79, № 1. – Pp. 1631-1657. DOI: 10.32604/cmc.2024.048289.
12. Qiu, Y. System dynamics mechanism of cross-regional collaborative dispatch of emergency supplies based on multi-agent game / Ying Qiu, Meng Shi, Xinna Zhao & Yongping Jing // *Complex Intell. Syst.* – 2023. – Vol. 9. – Pp. 2321-2332. DOI: 10.1007/s40747-021-00303-2.
13. Heng, Shao. A Study on Modeling and Simulation Engineering of Emergency Resources Supply Based on System Dynamics / Heng Shao, Hong Zhao, Feng Hu // *Systems Engineering Procedia*. – 2012. – Vol. 5. – Pp. 307-312. DOI: 10.1016/j.sepro.2012.04.048.
14. Shuangyan, Xu. System dynamics research of non-adaptive evacuation psychology in toxic gas leakage emergencies of chemical park / Shuangyan Xu, Jinghong Wang, Jia Li, Yan Wang, Zhirong Wang // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2021. – Vol. 72. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104556.
15. Berariu, R. Training decision-makers in flood response with system dynamics / Berariu, R., Fikar, C., Gronalt, M. and Hirsch, P. // *Disaster Prevention and Management*. – 2016. – Vol. 25, No 2. – Pp. 118-136. DOI: 10.1108/DPM-06-2015-0140.
16. Christos, Kyrkou. Machine Learning for Emergency Management: A Survey and Future Outlook / *Proceedings of the IEEE*. – 2023. – № 1. – Pp. 19-41. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3223186.

### References

1. Alrehaili, Naif & Almutairi, Yousef & Alghamdi, Hamdan & Almuthaybiri, Musaad. (2022). The Need for Emergency Management Models. *Journal of Emergency Management and Disaster Communications*, 04. 10.1142/S2689980923500021.
2. Ren, Chuanjun & Yang, Chenghui & Jin, Shiyao. (2009). Agent-Based Modeling and Simulation on Emergency Evacuation. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering*, 5, 1451-1461. 10.1007/978-3-642-02469-6\_25.
3. Wang, Zhenqiang & Jia, Gaofeng. (2021). A novel agent-based model for tsunami evacuation simulation and risk assessment. *Natural Hazards*, 105, 1-27. 10.1007/s11069-020-04389-8.
4. Edrissi, Ali & Lahoorpoor, Bahman & Lovreglio, Ruggiero. (2021). Simulating Metro Station Evacuation using Three Agent-based Exit Choice Models. *Case Studies on Transport Policy*, 9. 10.1016/j.cstp.2021.06.011.
5. Chen, Jieyu & Shi, Tianxing & Li, Nan. (2021). Pedestrian evacuation simulation in indoor emergency situations: Approaches, models and tools. *Safety Science*, 142. 105378. 10.1016/j.ssci.2021.105378.
6. Kodeks tsyvilnoho zakhystu Ukrainy [Code of Civil Protection of Ukraine]. (2013). *Bulletin of Verkhovna Rada of Ukraine*, 34-35. Art. 458. URL: <http://zako.n3.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>.
7. Klasyfikator nadzvychainykh sytuatsii DK 019:2010 [Classifier of emergency situations DK 019:2010]: Order of the State Consumer Standard of Ukraine from 11.10.2010, № 457. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va457609-10#Text>.
8. Columbia University Mailman School of Public Health. *Agent-Based Modeling*. <https://www.publichealth.columbia.edu/research/population-health-methods/agent-based-modeling>.
9. AI Master Class. *What is Agent-Based Modeling?* <https://www.aimasterclass.com/glossary/agent-based-modeling>.
10. Gupta, U. & Ranganathan, N. (2007). Multievent Crisis Management Using Noncooperative Multistep Games. *IEEE Transactions on Computers*, 56, 577-589. 10.1109/TC.2007.1023.
11. Gul, M., et al. (2024). A Game-Theoretic Approach to Safe Crowd Evacuation in Emergencies. *Computers, Materials & Continua*, 79, 1-27. 10.32604/cmc.2024.048289.
12. Qiu, Y., Shi, M., Zhao, X. & Jing, Y. (2021). System dynamics mechanism of cross-regional collaborative dispatch of emergency supplies based on multi-agent game. *Complex & Intelligent Systems*, 9. 10.1007/s40747-021-00303-2.

13. Shao, H., Zhao, H. & Hu, F. (2012). A Study on Modeling and Simulation Engineering of Emergency Resources Supply Based on System Dynamics. *Systems Engineering Procedia*, 5. 307–312. 10.1016/j.sepro.2012.04.048.
14. Xu, S., Wang, J., Li, J., Wang, Y. & Wang, Z. (2021). System dynamics research of non-adaptive evacuation psychology in toxic gas leakage emergencies of chemical park. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 72, 104556. 10.1016/j.jlp.2021.104556.
15. Berariu, Romana & Fikar, Christian & Gronalt, Manfred & Hirsch, Patrick. (2016). Training decision-makers in flood response with system dynamics. *Disaster Prevention and Management*, 25, 118-136. 10.1108/DPM-06-2015-0140.
16. Kyrkou, C., Kolios, P., Theocharides, T. & Polycarpou, M. (2022). Machine Learning for Emergency Management: A Survey and Future Outlook. *Proceedings of the IEEE*. PP. 1-23. 10.1109/JPROC.2022.3223186.

Отримано 18.09.2024

UDC 004.94

**Vladyslav Pryshchepa<sup>1</sup>, Artem Zadorozhnyi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD Student, Recipient of the Doctor of Philosophy degree in specialty 122  
Chernihiv National Polytechnic University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [vladpryshchepa1@gmail.com](mailto:vladpryshchepa1@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-7627-0456>

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technology and Software Engineering.,  
Chernihiv National Polytechnic University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [zaotroy@gmail.com](mailto:zaotroy@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3424-7293>

## STUDY OF MODERN DIRECTIONS OF MODELING EMERGENCY RESPONSE PROCESSES

*This article is a review. Emergencies arise due to natural disasters, man-made accidents, or social conflicts and can lead to significant human losses, economic damages, and environmental consequences. The importance of timely and accurate responses to such events cannot be overstated, as delays or incorrect actions during crises can result in even more severe consequences. Each year, the scale and complexity of emergencies increase, demanding the use of more advanced methods for managing and coordinating the actions of rescue services, government agencies, and other participants in the process.*

*The correctness and speed of emergency response depend on the ability to effectively predict the development of events, optimize resources, and coordinate the actions of various services in real time. Despite the availability of various emergency management models, emergency management is often inefficient. There is a growing need to implement modern modeling methods that allow for the assessment of potential scenarios, forecast the consequences of decisions, and optimize response processes.*

*Modeling emergencies is becoming an important tool that allows for the creation of realistic event simulations, testing of various response strategies, and ensuring their adaptation to rapidly changing conditions. This approach improves the preparedness of management systems for real-world challenges, ensures accurate coordination of actions, and more effectively utilizes available resources to minimize damage and risks during crises. As the number of emergencies increases, it becomes crucial to integrate the latest developments into existing systems, underscoring the importance of this research.*

*The problem statement addresses the increasing complexity of emergencies and the challenges decision-makers face in managing these situations. Traditional crisis management approaches are often ineffective when it comes to making swift, accurate decisions based on real-time analysis of large amounts of data. Many existing models lack flexibility and cannot quickly adapt to the dynamic conditions of an evolving emergency.*

*This article provides an overview of modern approaches to modeling emergency response processes. It describes the main trends in the application of various types of models to ensure the simulation of emergency response processes. In particular, it examines agent-based modeling, game theory-based models, the use of system dynamics, and machine learning-based modeling.*

*Future research should focus on improving the adaptability of models to rapidly changing real-time conditions, as emergencies often involve sudden shifts in circumstances. This requires the development of flexible, multifunctional models capable of quickly adjusting to new scenarios and leveraging advancements like artificial intelligence and big data analytics. Additionally, exploring methods to integrate diverse modeling approaches is essential to ensure seamless cooperation between systems, enhancing the effectiveness and speed of emergency response.*

*Fig.: 2. References: 16.*

**Олег Вікторович Резніченко<sup>1</sup>, Оксана Анатоліївна Ляшенко<sup>2</sup>,  
Вікторія Вікторівна Архипова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> аспірант кафедри інформаційних систем

Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)  
E-mail: [rov250977@gmail.com](mailto:rov250977@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0194-5079>

<sup>2</sup> кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних систем

Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)  
E-mail: [liashenko\\_o\\_a@ukr.net](mailto:liashenko_o_a@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9983-5504>

<sup>3</sup> кандидат технічних наук, старший науковий співробітник наукового центра інноваційних матеріалів та технологій

Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна),  
доцент кафедри цивільної інженерії, технологій будівництва і захисту довкілля  
Дніпровський державний аграрно-економічний університет (Дніпро, Україна)  
E-mail: [arh.v.1006@gmail.com](mailto:arh.v.1006@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9722-5622>

## ВИБІР МІЖ РЕЛЯЦІЙНИМИ ТА НЕРЕЛЯЦІЙНИМИ БАЗАМИ ДАНИХ

Стаття є оглядово-інформаційною. У цьому дослідженні розглянуто основні характеристики сучасних моделей баз даних, що використовуються для зберігання та обробки інформації, яка може бути отримана в будь-якій галузі науки, суспільства та промисловості. Розглянуто ключові характеристики та особливості сховищ даних. Визначено, що існує дві основні моделі баз даних – реляційні та нереляційні. Сформульовано їхні недоліки та переваги, що обмежують або, навпаки, розширюють їхні функціональні можливості. Зроблено висновки щодо перспектив використання сховищ даних.

**Ключові слова:** інформація; реляційні бази даних; нереляційні бази даних; NoSQL; SQL.

Рис.: 2. Бібл.: 25.

**Актуальність теми дослідження.** Інформація відіграє значну роль у функціонуванні будь-яких галузей життя людини. Невелику її кількість можна зберігати на одному комп'ютері або сервері, але в теперішній час дані досягли таких обсягів, що неможливо їх розташувати таким чином. Це робить необхідним створювати та вдосконалювати технології і методи розміщення й обробки інформації та узгодженої роботи багатьох машин, що можуть знаходитися просторово на великій відстані.

**Постановка проблеми.** При розробці систем збереження інформації необхідно враховувати, що сумісне функціонування комп'ютерів може бути описано за допомогою теорема Брюера – досягти узгодженості, доступності і стійкості збереженої інформації водночас неможливо, що призводить до виникнення низки проблем, які необхідно вирішити. Так, до питань, що підлягають розв'язанню, належить:

- перевищення об'ємів інформації над продуктивністю пристрою, що її обробляє;
- недостатня швидкість роботи з даними (запису, оновлення, переміщення);
- різноманітність інформації та складність або неможливість її класифікації та упорядкування;
- наявність великої кількості даних, які не є корисними.

Тому підхід до вирішення цих питань не може однозначно бути вирішеним і повинен бути комплексним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для зберігання і обробки інформації використовуються бази даних.

Існує декілька типів баз даних залежно від їхніх властивостей: мережеві та локальні, розподілені і нерозподілені, зосереджені і розосереджені, репліковані і нерепліковані, агрегатні і безагрегатні, структуровані і неструктуровані, об'єктноорієнтовані, реляційні і нереляційні, SQL та NoSQL та інші.

Вважається, що найбільш поширеними є реляційні та нереляційні бази даних (що також називаються SQL та NoSQL відповідно).

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз попередніх досліджень показав, що створення баз даних та їхня швидка й надійна робота можлива тільки після вивчення та урахування всіх їхніх можливостей і обмежень.

**Метою роботи** є огляд сучасного стану організації зберігання і обробки даних, їх використання в різних галузях виробництва та формування подальших досліджень.

**Виклад основного матеріалу.** SQL бази даних отримали свою назву від мови запитів, що допомагає створювати цей тип сховищ даних і обробляти існуючу інформацію (робити нові записи, отримувати дані, редагувати інформацію шляхом видалення та оновлення, виконувати запити) та управляти даними за допомогою систем управління реляційною базою даних (Relational Database Management System - RDBMS) [1; 2].

Виник цей тип баз даних в 70-ті роки минулого століття, ставши основою інформаційних систем. Засновником вважається Е.Ф. Кодд, відповідно до уявлень якого пропонується організувати дані в таблиці (зв'язки), де кожна таблиця є набором рядків (кортежів) і стовпців (атрибутів), це спрощує роботу з даними та їх пошук [3]. Подальше використання цієї моделі бази даних такими компаніями, як Oracle, IBM і Microsoft призвело до її поширення [4, 5].

На сьогодні найбільш популярними типами баз даних SQL є такі (рис. 1).

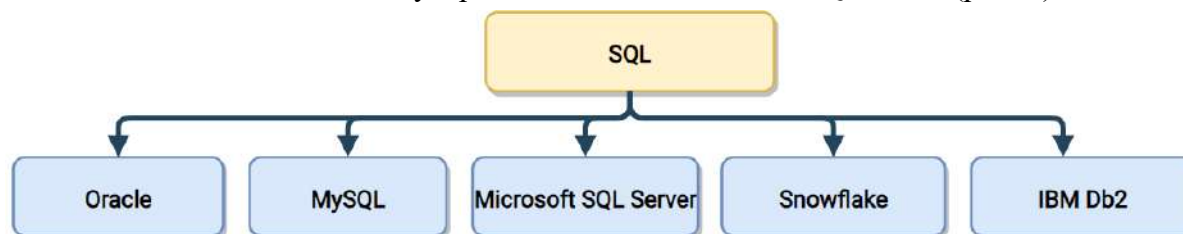


Рис. 1. Найбільш поширені типи баз даних SQL

Джерело: розроблено авторами.

Реляційні бази даних, удосконалюючись протягом багатьох років, для більшості компаній стали стандартом проєктування, управління та збереження інформації [6; 7].

SQL бази даних мають такі переваги [8]:

- використовують порівняно просту та зрозумілу організацію даних;
- мають визначений стандарт, що дозволяє керувати значною кількістю інформації без додаткового написання програмних кодів;
- використовують математичну логіку, засновану на теорії множин та дискретній математиці;
- застосовують структуровані й організовані дані, що забезпечує більшу ефективність роботи;
- є продуктивними, оскільки дозволяють за допомогою запитів отримувати велику кількість записів, що знаходяться в різних таблицях;
- є стабільними та передбачуваними, адже відповідає принципам ACID (атомарність, узгодженість, ізоляція та довговічність);
- підтримують широкий набір програмних інструментів та сумісні з великою кількістю комп'ютерних програм.

Незважаючи на велику кількість позитивних факторів, SQL бази даних мають і недоліки [9-11]:

- використовується для роботи тільки зі структурованими даними і не припустимі для обробки даних іншого типу;
- мають обмеження по гнучкості структури даних, оскільки структура даних і таблиць повинна бути визначена на початку проєктування, а подальші її зміни ускладнені;

- мають обмеження по масштабованості, адже при збільшенні обсягів даних різко зменшується швидкість обробки інформації;
- можуть містити надмірну інформацію, оскільки при її обробці створюються додаткові таблиці;
- несуть високі операційні витрати на збереження інформації;
- мають складність роботи з ієрархічними структурами.

Ці недоліки, що призводили до обмеження або неможливості використання SQL баз даних, стали причиною виникнення баз даних іншого типу – нереляційних, або NoSQL [11-12]. Відповідно до назви, бази даних цього виду взагалі не використовують мову запитів SQL, хоча за іншими даними, найменування може означати і «не тільки SQL». Цей тип баз даних є нетабличною формою представлення інформації, тому перед її створенням немає потреби визначати схему бази даних.

Можна сказати, що NoSQL тип баз даних [4] є схожим на папку з файлами, що може зберігати файли будь-якого типу.

Виділяють декілька типів подібних сховищ інформації, які відрізняються за метою використання, структурою [12-13] та джерелом створення.

Взагалі, всі NoSQL бази даних можна поділити на групи:

- модель ключ-значення (Key /Value);
- таблична / колонкоорієнтована модель (Tabular Column Oriented);
- документоорієнтована модель (Document Oriented);
- графова модель (Graph).

Різними компаніями створено багато видів баз даних кожної групи (рис. 2) [14-15].

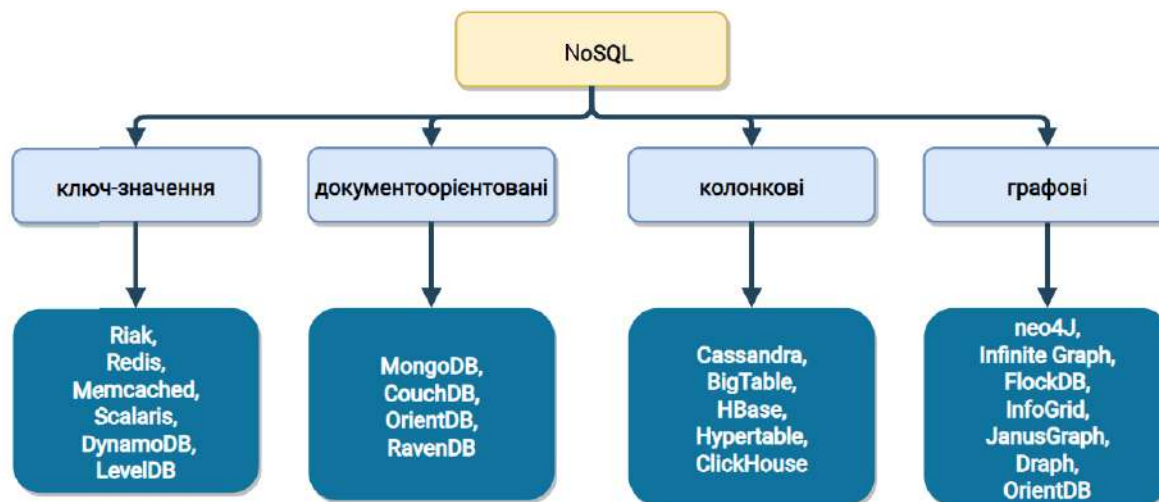


Рис. 2. Найбільш поширені види баз даних NoSQL

Джерело: розроблено авторами

На відміну від реляційних баз даних, нереляційні:

- не зберігають інформацію у вигляді таблиць;
- використовують гнучкі схеми, що дає можливість пришвидшити розробку та забезпечити поетапну реалізацію;
- не використовують мову запитів SQL;
- підтримують можливість горизонтального масштабування і роботи з даними big data [16-19];
- дають можливість управляти даними в реальному часі;
- підтримують використання агрегатів і кластерів;
- застосовують динамічні гнучкі схеми [20].

Отже, вважаючи на різноманітність ознак нереляційних баз даних, не існує чіткого визначення поняття NoSQL баз даних [21].

Перевагами баз даних NoSQL є такі [22-24]:

- використовуються для зберігання великих обсягів інформації;
- дозволяють здійснювати паралельну обробку інформації на розподілених серверах;
- підтримують горизонтальне масштабування;
- забезпечують високу продуктивність завдяки безсхемній моделі;
- дають можливість управляти даними у реальному часі;
- підтримують використання агрегатів і кластерів;
- забезпечують можливість зберігати неструктуровані або напівструктуровані дані;
- мають економічність у контексті їх розгортання при збільшенні обсягів даних і транзакцій.

Звичайно, ці бази даних мають і недоліки, пов'язані з:

- обмеженістю складних запитів;
- відсутністю стандартизації;
- недостатньою стабільністю.

Однак ці недоліки компенсуються роботою з великими об'ємами даних та масштабованістю, тому використання NoSQL баз даних значно поширюється.

Кожен із типів NoSQL баз даних має свої особливості, переваги і обмеження. Основними функціональними властивостями баз даних можна означити узгодженість даних, транзакції, властивості запитів, структуру даних та масштабування.

*Ключ-значення.* Є найбільш простою моделлю сховища інформації, оскільки представляє собою таблицю з двох стовпців, один з яких є ключем, а другий – його значенням. Доступ до даної бази даних відбувається за первинним ключем, що різко збільшує продуктивність бази та можливість до масштабування [17; 20; 22; 24].

Властивість стосується операцій над окремим ключем, оскільки ці операції можуть отримувати, записувати та видаляти дані за окремим ключем.

Для баз даних цього типу характерна підсумкова узгодженість даних: або залишити новий запис та прибрати старий, або залишити дві, спитавши про це користувача. Транзакції реалізуються частіше за усе за допомогою забезпечення концепції кворуму. Запити виконуються за ключем, і, як правило, неможливо провести обробку за значенням. Допускається масштабування за допомогою фрагментації, причому значення ключа буде визначати його місцезнаходження.

Бази даних ключ-значення краще не використовувати для випадків, якщо між різними наборами даних необхідно встановити кореляцію; якщо необхідно виконувати запит за значеннями; якщо необхідно обробляти одразу декілька ключів.

Більш підходящими випадками використання баз даних ключ-значення є зберігання профілів користувачів, даних із сайтів та вебдодатків та ін.

*Документні бази даних* [24; 25]. Складаються з окремих елементів (документів), що можуть представляти собою файли, масиви та інші об'єкти; ідентифікація відбувається за ключем, що створюється самою базою даних. Узгодженість даних забезпечується за допомогою наборів реплік, причому задаючи їх кількість, можна або посилити узгодженість, або продуктивність. Транзакції є атомарними на рівні окремого документа, і неможливі, якщо містять більше однієї операції. Документні бази даних забезпечують різні можливості для запитів: вони можуть бути матеріалізовані та динамічні, «відображення-згортка» та ін. Масштабування відбувається шляхом додавання допоміжних вузлів (горизонтальне), причому немає потреби в перезавантаженні системи; або шляхом фрагментації даних у тому ж вузлу.



Документні бази даних не слід вживати для складних транзакцій. Використовуються вони для реєстрації різних подій різного типу; даних аналізу реального часу; інформаційних додатків для вебсайтів.

Стовпцеві бази даних представляють собою множину стовпців, асоційованих з ключем рядку [24]. Основною одиницею зберігання є стовпець, що складається з пари «ім'я-значення» з вказівкою часу. Передбачається узгодженість запису та читання, щоб забезпечувати високу доступність з компромісом у відношенні затримки збереження даних. Транзакції є атомарними, оскільки дані або будуть записані, або ні. Колонкові бази даних мають високу доступність, оскільки в них усі вузли в кластері мають однакові права. Запити відрізняються залежно від типу бази даних, або являють собою набір команд, або спеціальну мову запитів. Масштабування відбувається додаванням додаткових вузлів.

Бази даних використовуються для реєстрації подій, зберігання записів блогів, аналітичних показників. Неєфективно використовувати для транзакційних систем.

Графові бази даних є систематичним набором даних, які дозволяють зберігати сутності (вузли) та відносини між ними (ребра). Більшість графових баз даних не підтримує розподілу вузлів по серверах, але якщо база даних працює на кластері, дані є узгодженими, і запис на ведучий вузол синхронізується з веденими, що доступні для читання (тобто доступність забезпечується реплікацією веденими вузлами). Запити забезпечуються в багатьох випадках спеціальною мовою запитів. Масштабування відбувається або шляхом додавання додаткових ведених вузлів для читання даних, запис проводити на ведучих вузлах; або шляхом фрагментації даних. Графові бази ефективно застосувати для областей з багатьма взаємними зв'язками (наприклад, соціальних мереж), і не підходить для випадків, якщо є необхідність змінювати властивості в усіх вузлах.

Є ще декілька типів NoSQL баз даних, але вони менш поширені.

**Висновки.** Протягом тривалого часу SQL бази даних широко використовувались у світі. Але виникнення багатьох складних питань, пов'язаних із необхідністю обробки запитів вебдодатків, збільшенням кількостей даних та користувачів, узгодженням даних різних типів, обробкою величезних обсягів геопросторових даних та ін. призвело до необхідності створення баз даних нового типу. Використання NoSQL спростило розробку завдяки гнучкій безструктурній схемі, дозволило обробку неструктурованої інформації та масштабування даних.

### Список використаних джерел

1. Gruber, M. Understanding SQL / M. Gruber. – San Francisco : Sybex, 1990. – 434 p.
2. Mpinda S. A. T. From Relational Database to Column-Oriented NoSQL Database: Migration Process / S. A. T. Mpinda, P. A. Bungama, L. G. Maschietto // International Journal of Engineering Research and Technology. – 2015. – Vol. 4, № 5. – Pp. 399-403.
3. Codd, E. F. A relational model of data for large shared data banks / E. F. Codd // Communications of the ACM. – 1970. – Vol. 13, № 6. – Pp. 377-387.
4. Babucea A.-G. SQL or NoSQL Databases? Critical differences / A.-G. Babucea // Annals of the „Constantin Brâncuși” University of Târgu Jiu. Economy Series. – 2021. – № 1. – Pp. 53-59.
5. Резніченко, В. А. 60 років базам даних / В. А. Резніченко // Проблеми програмування. – 2021. – № 3. – С. 40-71.
6. ISO/IEC 9075-1:2023, Information technology – Database languages – SQL Part 1: Framework (SQL/Framework) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.iso.org/ru/standard/76583.html>.
7. Severance, C. Elizabeth Fong: Creating the SQL Database Standards / C. Severance // Computer. – 2014. – Vol. 47, № 8. – Pp. 7-8.
8. Beaulieu, A. Learning SQL: Generate, Manipulate, and Retrieve Data / A. Beaulieu. – O'Reilly Media, 2020. – 380 p.

9. Коломійцев, О. В. Аналіз переваг і недоліків реляційних та нереляційних баз даних логістичних інформаційних систем / О. В. Коломійцев [та ін.] // Society and Science: Interconnection : Proceedings of the 1st international scientific and practical conference, [Porto], 26-28 жовтня 2022 р. – Porto, 2022. – С. 416-422.
10. Ali W. Comparison between SQL and nosql databases and their relationship with big data analytics / W. Ali [et al.] // Asian Journal of Research in Computer Science. – 2019. – Vol. 4, № 2. – Pp. 1-10.
11. Stonebraker, M. SQL databases v. NoSQL databases / M. Stonebraker // Communications of the ACM. – 2010. – Vol. 53, №. 4. – Pp. 10-11.
12. Bjeladinovic, S. A fresh approach for hybrid SQL/NoSQL database design based on data structuredness / S. Bjeladinovic // Enterprise Information Systems. – 2018. – Vol. 12, №. 8-9. – P. 1202–1220.
13. Hnatushenko, V. V. Non-relational approach to developing knowledge bases of expert system prototype / V. V. Hnatushenko, Vik. V. Hnatushenko, N. L. Dorosh, N. O. Solodka, O. A. Liashenko // Naukovyi visnyk natsionalnoho hirnychoho universytetu. – 2022. – № 2. – Pp. 112–117.
14. Ляшенко, О. А. Сравнительный анализ выполнения запросов к серверам баз данных MYSQL и MONGODB / О. А. Ляшенко, О. О. Конашков, Н. О. Солодка // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2019. – № 4. – С. 114-124.
15. Головка, А. О. Проектування застосунку щодо підбору житла з використанням реляційної та нереляційної баз даних / А. О. Головка, О. А. Ляшенко // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2023): матеріали VIII Міжнар. науково-техн. конф., (Дніпро, 1–3 листоп. 2023 р.), ДВНЗ УДХТУ. – Дніпро, 2023. – С. 157-158.
16. Rodriguez, J. Distributed Architecture of Mobile GIS Application Using NoSQL Database / Jonathan Rodriguez [et al.] // International Journal of Information and Electronics Engineering. – 2017. – Vol. 7, № 6. – Pp. 156-160.
17. Krechowicz, A. Highly Scalable Distributed Architecture for NoSQL Datastore Supporting Strong Consistency / A. Krechowicz, S. Deniziak, G. Lukawski // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – Pp. 69027-69043.
18. Ali, A. A State of Art Survey for Big Data Processing and NoSQL Database Architecture / A. Ali [et al.] // International Journal of Computing and Digital Systems. – 2023. – Vol. 14, № 1. – Pp. 297-309.
19. Shamsi, J. A. Big Data Systems: A 360-Degree Approach / J. A. Shamsi, M. A. Khojaye. – Taylor & Francis Group, 2021. – 312 p.
20. Rahman, R. Scalable Security Analytics Framework Using NoSQL Database / R. ur Rahman, D. S. Tomar // International Journal of Database. Theory and Application. – 2017. – Vol. 10, № 11. – Pp. 27–46.
21. Sattar, A. Incorporating NoSQL into a database course / A. Sattar, T. Lorenzen, K. Nallamaddi // ACM Inroads. – 2013. – Vol. 4, № 2. – Pp. 50-53.
22. Waldman, D. A. The acceptability of 360 degree appraisals: A customer-supplier relationship perspective / D. A. Waldman, D. E. Bowen // Human Resource Management. – 1998. – Vol. 37, № 2. – Pp. 117-129.
23. Abdullah, A. Leveraging Advanced Machine Learning Techniques for Enhanced Intrusion and Fraud Detection in NoSQL Database Systems / A. Abdullah, T. Arjunan // International Journal of Applied Machine Learning and Computational Intelligence. – 2023. – Vol. 13, №. 11.
24. Sadalage, P. NoSQL distilled: A brief guide to the emerging world of polyglot persistence / P. Sadalage, M. Fowler. – Upper Saddle River, NJ : Addison-Wesley, 2013. – 188 p.
25. Ляшенко, О. А. Анализ производительности баз данных PostgreSQL/POSTGIS и MONGODB для геопространственных запросов / О. А. Ляшенко, С. Н. Литвинов, Н. А. Солодка // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2019. – № 6. – С. 60–67.

## References

1. Gruber, M. (1990). *Understanding SQL*. Sybex.
2. Mpinda, S. A. T., Bungama, P.A. & Maschietto, L. G. (2015). From relational database to column-oriented nosql database: Migration process. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2015. – Vol. 4, no. 05. – Pp. 399-403.
3. Codd, E. F. (1970). A relational model of data for large shared data banks. *Communications of the ACM*, 13(6), 377–387. <https://doi.org/10.1145/362384.362685>.

4. Babucea, A.-G. (2021). SQL or NoSQL Databases? Critical differences. *Annals of the „Constantin Brâncuși” University of Târgu Jiu. Economy Series, 1*, 53-59.
5. Reznichenko, V. A. (2021). 60 rokov bazam danykh [60 years of databases]. *Problemy prohranuvannia – Programming problems, 3*, 40–71. <http://doi.org/10.15407/pp2021.03.040>.
6. International Organization for Standardization. (2023). *Information technology – Database languages – SQL Part 1: Framework (SQL/Framework) – Requirements (ISO/IEC 9075-1:2023)*.
7. Severance, C. (2014). Elizabeth Fong: Creating the SQL database standards. *Computer, 47*(8), 7–8. <https://doi.org/10.1109/mc.2014.209>.
8. Beaulieu, A. (2020). *Learning SQL: Generate, manipulate, and retrieve data*. O'Reilly Media.
9. Kolomiitsev, O.V., Startsev, V.V., Tretiak, V.F., Nikorchuk, A.I., Shapovalov, O.I., Poltavskiy, E.M., Chernenko, P.V., Kryvchun, V.I., Zakharchenko, V.V., Rybalchenko, A.O. (2022). Analiz perevah i nedolikiv reliatsiinykh ta nereliatsiinykh baz danykh lohistrychnykh informatsiinykh system [Analysis of advantages and disadvantages of realistic and unrealistic databases of logistics information systems]. *Proceedings of the 1st international scientific and practical conference: Society and Science: Interconnection* (pp. 416–422). Scientific Publishing Center “InterConf”. <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/issue/view/26-28.11.2022/144>.
10. Ali, W., Shafique, M. U., Majeed, M. A., & Raza, A. (2019). Comparison between SQL and nosql databases and their relationship with big data analytics. *Asian Journal of Research in Computer Science, 4*(2), 1–10. <https://doi.org/10.9734/ajrcos/2019/v4i230108>.
11. Stonebraker, M. (2010). SQL databases v. NoSQL databases. *Communications of the ACM, 53*(4), 10–11. <https://doi.org/10.1145/1721654.1721659>.
12. Bjeladinovic, S. (2018). A fresh approach for hybrid SQL/NoSQL database design based on data structuredness. *Enterprise Information Systems, 12*(8-9), 1202–1220. <https://doi.org/10.1080/17517575.2018.1446102>.
13. Hnatushenko, V. V., Hnatushenko, Vik. V., Dorosh, N. L., Solodka, N. O., & Liashenko, O. A. (2022). Non-relational approach to developing knowledge bases of expert system prototype. *Naukovyi visnyk natsionalnoho hirnychoho universytetu, 2*(188), 112–117. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-2/112>.
14. Liashenko, O. A., Konashkov, O. O., & Solodka, N. O. (2019). Sravnitelniy analiz vipolneniya zaprosov k serveram baz dannikh MYSQL i MONGODB [Comparative analysis of request execution to MYSQL and MONGODB database servers]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Herald of the Kherson National Technical University, 4*(71), 114–124. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2019.4.13>.
15. Holovko, A.O. (2023). Proiektuvannia zastosunku shchodo pidboru zhytla z vykorystanniam reliatsiinoi ta nereliatsiinoi baz danykh. [Designing an application for housing selection using real and non-real databases], [Computer modelling and optimisation of complex systems], A.O. Holovko, O. A. Liashenko. *Kompiuterne modeliuвання та optymizatsiia skladnykh system (KMOSS-2023): VIII Mizhnar. naukovo-tekhn. konf. – Computer modeling and optimization of complex systems (KMOSS-2023): materials VIII International scientific and technical conference* (pp. 157-158). DVNZ UDKhTU. <https://udhtu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/11/zbirnyk-tez-kmoss-2023.pdf>.
16. Rodriguez, J., Malgapo, A., Quick, J., & Huang, C. (2017). Distributed architecture of mobile GIS application using nosql database. *International Journal of Information and Electronics Engineering, 7*(6), 156–160. <https://doi.org/10.18178/ijee.2017.7.6.681>.
17. Krechowicz, A., Deniziak, S., & Lukawski, G. (2021). Highly scalable distributed architecture for nosql datastore supporting strong consistency. *IEEE Access, 9*, 69027–69043. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3077680>.
18. Ali, A., Naem, S., Anam, S., & Ahmed, M. (2023). A State of Art Survey for Big Data Processing and NoSQL Database Architecture. *International Journal of Computing and Digital Systems, 14*(1), 297–309. <https://doi.org/10.12785/ijcds/140124>.
19. Shamsi, J. A., & Khojaye, M. A. (2021). *Big data systems: A 360-degree approach*. Taylor & Francis Group.
20. Rahman, R. U., & Tomar, D. S. (2017). Scalable security analytics framework using nosql database. *International Journal of Database Theory and Application, 10*(11), 27–46. <https://doi.org/10.14257/ijtda.2017.10.11.03>.

21. Sattar, A., Lorenzen, T., & Nallamaddi, K. (2013). Incorporating NoSQL into a database course. *ACM Inroads*, 4(2), 50–53. <https://doi.org/10.1145/2465085.2465100>.
22. Waldman, D. A., & Bowen, D. E. (1998). The acceptability of 360 degree appraisals: A customer-supplier relationship perspective. *Human Resource Management*, 37(2), 117–129. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-050x\(199822\)37:2%3C117::aid-hrm3%3E3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-050x(199822)37:2%3C117::aid-hrm3%3E3.0.co;2-z).
23. Abdullah A., & Arjunan T. (2023). Leveraging Advanced Machine Learning Techniques for Enhanced Intrusion and Fraud Detection in NoSQL Database Systems. *International Journal of Applied Machine Learning and Computational Intelligence*, 13(11).
24. Sadalage, P., & Fowler, M. (2013). *NoSQL distilled: A brief guide to the emerging world of polyglot persistence*. Addison-Wesley.
25. Liashenko, O.A., Lytvynov, C.N, & Solodkaia, N.A. (2019). Analiz proizvoditelnosti baz danih PostgreSQL/PostGIS i MongoDB dlya geoprostranstvennikh zaprosov [Analysis of database performance PostgreSQL/PostGIS i MongoDB for geo-expired queries]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho –Herald of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug*, 6(119), 60–67. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.6.60-67>.

Отримано 22.08.2024

UDC 004.65

**Oleh Reznichenko<sup>1</sup>, Oksana Liashenko<sup>2</sup>, Vyktoriia Arkhypova<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Postgraduate Student of the Department of Information Systems

Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro, Ukraine)

**E-mail:** [rov250977@gmail.com](mailto:rov250977@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-0194-5079><sup>2</sup>PhD in Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Information Systems

Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro, Ukraine)

**E-mail:** [liashenko\\_o\\_a@ukr.net](mailto:liashenko_o_a@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9983-5504><sup>3</sup>PhD in Technical Sciences,

Senior Research Officer at the Scientific Centre for Innovative Materials and Technologies

Associate Professor of the Department of Civil Engineering, Construction Technologies and Environmental Protection

Dnipro State Agrarian and Economic University (Dnipro, Ukraine)

**E-mail:** [arh.v.1006@gmail.com](mailto:arh.v.1006@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9722-5622>**CHOICE BETWEEN RELATIONAL AND NON-RELATIONAL DATABASES**

*Creation of a large amount of data in industry, science and society has led to the problem of how to accommodate, store and process it. A separate issue is that this information is very variable, difficult to classify, and the speed of computers is becoming insufficient compared to its quantity.*

*Therefore, effective organisation of data management and the choice of storage will affect the final result of their usage. The purpose of this article is to evaluate modern database models and their use for various sectors of society, to choose a more efficient and appropriate one depending on the advantages and disadvantages. Different types of databases are used to store data, the most common of which are relational SQL and non-relational NoSQL. SQL databases store data in the form of a set of rows and columns, i.e. in a tabular form.*

*This has led to the emergence of non-relational NoSQL databases: key-value, document-oriented, columnar, and graph.*

*The analysis showed that each type of database has its advantages and disadvantages. For example, SQL is a simple, mathematical logic-based, standardised and productive form. However, the disadvantages of databases are limitations in working with unstructured data, the amount of which is growing, and scalability. NoSQLs do not store information in tabular form, have dynamic flexible schemas, and are capable of storing semi-structured and unstructured data. Compared to relational databases, they do not support complex queries, but this is compensated by their ability to store data of various types, support for horizontal scaling, and significant data processing speed. They are also capable of using aggregates and clusters. This makes it possible to use them widely for big data. Thus, we can conclude that the use of NoSQL databases is promising.*

**Keywords:** information; relational databases; non-relational databases; NoSQL; SQL.

*Fig.: 2. References: 25.*

## РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-3(37)-170-180

УДК 67.08:634.652

**Тетяна Геннадіївна Філінська<sup>1</sup>, Марина Миколаївна Терещук<sup>2</sup>,  
Антоніна Олександрівна Філінська<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук,  
доцент кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції  
Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)  
E-mail: [f111nskaya@ukr.net](mailto:f111nskaya@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7921-1989>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів,  
Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)  
E-mail: [latiniys229@gmail.com](mailto:latiniys229@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4458-1831>

<sup>3</sup>старший викладач кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції,  
Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)  
E-mail: [antoniyafilelin@ukr.net](mailto:antoniyafilelin@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6975-6186>

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДХОДІВ АВОКАДО ЯК ВТОРИННИХ СИРОВИННИХ РЕСУРСІВ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Зростання обсягів вирощування і перероблення авокадо супроводжується утворенням великої кількості відходів. У статті наведено результати досліджень властивостей порошків, отриманих зі шкірки, ядра та насінневої оболонки авокадо. Визначено показники вологоутримуючої здатності як окремих відходів авокадо, так і їхніх сумішей із різними видами борошна. Найменший показник вологоутримуючої здатності (217 %) має ядро насіння, що пояснюється присутністю у його складі значної кількості жирів, тоді як шкірка і насіннева оболонка, які містять більшу кількість волокон, мають даний показник на рівні 342 і 431 % відповідно. Суміші порошку ядра авокадо (до 40 %) з льяним, кунжутним і гарбузовим борошном можуть слугувати зсушувачами для харчових низькожирних емульсійних продуктів. Виконані дослідження щодо можливості використання відходів плодів авокадо як наповнювачів у складі гум. Введення до складу модельних гумових сумішей порошків авокадо з ядра, насінневої оболонки й зовнішньої шкірки плоду у кількості 40 мас.ч. на 100 мас.ч. каучуку надало вулканізіатам меншу еластичність та твердість ніж каолін. Отримані м'які гуми завдяки низькому показнику деформованості можуть використовуватися в якості уцілювачів.

**Ключові слова:** авокадо; відходи; ядро; шкірка; функціональна добавка; низькожирні емульсії; гуми.

Рис.: 4. Табл.: 7. Бібл.: 16.

**Актуальність теми дослідження.** Підвищений попит на авокадо, зростання його виробництва, перероблення і споживання призводять до утворення великої кількості відходів, таких як насіння, шкірка і знежирена м'якоть. Вони становлять приблизно третину маси плоду, забруднюють довкілля, створюючи певні екологічні ризики. Плоди авокадо і його побічні продукти містять поживні й фітохімічні речовини, які можуть використовуватися в харчовій, фармацевтичній, косметичній та інших галузях промисловості. Побічні продукти авокадо мають антипроліферативну та протизапальну дію, насіння авокадо покращує вуглеводний і ліпідний обмін. Крохмаль і харчові волокна з побічних продуктів авокадо можуть використовуватися як біоматеріал [1]. Високий вміст крохмалю робить плоди авокадо потенційною сировиною для виробництва біопластика. Відходи авокадо можна розглядати як цінний екологічний матеріальний ресурс і як відновлювану сировину, тож актуальними на сьогодні є дослідження щодо можливого розширення сфер їх застосування в різних галузях промисловості.

**Постановка проблеми.** На сьогодні актуальними є питання зменшення екологічного тиску на довкілля для різних галузей виробництва. Не є винятком і харчова галузь. Великий відсоток відходів, що утворюються в процесі споживання і перероблення авокадо, потребує розширення досліджень щодо можливості їх використання як вторинного сировинного ресурсу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Світовий ринок авокадо має сталу тенденцію до зростання, про що свідчать статистичні дані, наведені в табл. 1.

*Таблиця 1 – Виробництво авокадо у світі у період з 2000 по 2022 рік*

Показник	Рік						
	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Виробництво авокадо, млн тонн	2,71	3,42	3,87	5,28	8,21	8,57	8,98

Джерело: [2].

Обсяги виробництва авокадо з 2000 року зросли більше ніж у три рази і за прогнозами аналітиків до 2030 року мають збільшитися ще вдвічі.

Авокадо є цінним харчовим продуктом, що містить велику кількість поживних нутрієнтів, жирів, харчових волокон, мікро- і макроелементів, біологічно активних речовин та ін. [3]. Орієнтованість населення на здорове і корисне харчування сприяє збільшенню попиту на цей продукт. Авокадо як джерело жирів є сировиною для виробництва олії, яку використовують у харчовій, косметичній та інших галузях промисловості. Споживання і перероблення авокадо супроводжується утворенням великої кількості відходів і увага дослідників сьогодення спрямована на пошук шляхів їх застосування як вторинних матеріальних ресурсів.

Відходи авокадо (шкірку і насіння) доцільно використовувати для виробництва біогазу в процесі твердофазної ферментації. З використанням олії насіння авокадо одержують біодизельне паливо. Багато досліджень підтверджують, що насіння авокадо може слугувати сировиною для виробництва пігментів. Найбільший відсоток пігментів вилучається разом з олією, проте, значна їх кількість залишається в м'якоті і шкірці. Побічні продукти авокадо містять поліфеноли, що мають антиоксидантну і протимікробну дію та можуть бути ефективними добавками при консервуванні харчових продуктів для збільшення терміну їх зберігання та запобігання ферментативному потемнінню [4]. Навіть висушений розпиленням порошок відпрацьованої води, що утворюється у великих кількостях при промисловому виробництві олії авокадо холодного віджиму, має властивості інгібітора окислення ліпідів в ковбасах [5].

Насіння (кісточка) авокадо складає 13-18% від загальної маси плоду і часто не знаходить практичного застосування, хоча може бути цінною сировиною для текстильної, фармацевтичної, біомедичної та хімічної промисловості. Насіння авокадо містить близько 66,3 % крохмалю; 4,9 % білка; 4,1 % арабінози і 3,3 % пентозанів, які можна перетворити на продукти з високою доданою вартістю [6]. Зі шкірки авокадо кислотним гідролізом і лужним обробленням отримують лігноцелюлозне волокно для виготовлення плівкових матеріалів, які біодеградують протягом 30 діб [7]. Особливої уваги заслуговує можливість виготовлення з відходів авокадо адсорбентів для екологічно чистої і економічної технології вилучення забруднюючих речовин зі стічних вод [8]. Досліджується можливість додавання до складу функціональних продуктів харчування сублімованого порошку з насіння авокадо як джерела харчових волокон і корисних нутрієнтів. Така добавка також містить сполуки з високим антиоксидантним потенціалом. Наприклад, пропонується заміна 6-18 % пшеничного борошна на порошок насіння авокадо при виготовленні зернових закусок [9].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх публікацій показав, що дослідженням проблеми використання відходів авокадо приділяється значна увага. Нагальною залишається потреба вивчення технологічних властивостей шкірки, насіння (ядра) та насінневої оболонки, а також розширення сфер застосування їх як функціональних добавок при виробництві продуктів харчового і технічного призначення.

**Метою статті** є дослідження властивостей відходів авокадо, визначення їх характеристик як функціональних добавок багатоцільового призначення в різних галузях промисловості.

**Виклад основного матеріалу.** Для досліджень використовували відходи авокадо – шкірку й насіння. Від насіння додатково відділяли насінневу оболонку, яка становить до 2 % від маси насіння. Вказані зразки перед дослідженням подрібнили й відокремили фракцію з розміром частинок 0,25 та 0,5 мм. Вибір найменшої за розміром фракції пояснюється результатами попередніх досліджень щодо впливу розміру частинок на їхню вологоутримуючу здатність [10]. До того ж використання як функціональні добавки великих за розміром фракцій мало б негативний вплив на органолептичні та інші характеристики кінцевого продукту. Вологоутримуючу здатність досліджуваних об'єктів – шкірки, насінневої оболонки й очищеного від оболонки насіння (ядро) – визначали методом центрифугування [11]. Отримані результати дослідження наведені в табл. 2.

*Таблиця 2 – Вологоутримуюча здатність подрібнених відходів авокадо*

Досліджуваний зразок	Шкірка зовнішня	Ядро	Насіннева оболонка
Вологоутримуюча здатність, %	342	217	431

Джерело: розроблено авторами.

Як видно з табл. 2, найменший показник вологоутримуючої здатності має ядро, що можна пояснити присутністю у його складі значної кількості жирів, тоді як шкірка і насіннева оболонка містять більшу кількість волокон. Волокна шкірки в основному складаються з целюлози (28 %), геміцелюлози (25 %) і лігніну (4 %) [7]. Слід зазначити, що присутні у відходах авокадо дубильні речовини у значних кількостях можуть негативно впливати на якість харчових продуктів [12]. Щоб запобігти цьому, доцільно використовувати комплексні функціональні добавки з різним вмістом у їх складі відходів авокадо. Суміші останніх із різноманітними видами борошна можуть позитивно вплинути на їх технологічні характеристики й не призводити до погіршення органолептичних показників. У табл. 3 наведено результати дослідження сумішей подрібненого ядра авокадо дрібною фракцією (порошок ядра авокадо розміром до 0,5 мм) з льняним, кунжутним і гарбузовим борошном.

Як видно з табл. 3, збільшення частки борошна сприяє збільшенню показника вологоутримуючої здатності суміші. Зразки з вмістом порошку ядра авокадо до 40 % можуть слугувати ефективними загущувачами для харчових низькожирних емульсійних продуктів.

*Таблиця 3 – Вологоутримуюча здатність сумішей подрібненого ядра авокадо з льняним, кунжутним і гарбузовим борошном*

Склад суміші		Вологоутримуюча здатність, %
Компонент суміші	Вміст, %	
1	2	3
Порошок ядра авокадо	80	227
Льняне борошно	20	
Порошок ядра авокадо	60	288
Льняне борошно	40	
Порошок ядра авокадо	40	359
Льняне борошно	60	
Порошок ядра авокадо	20	498
Льняне борошно	80	
Порошок ядра авокадо	80	249
Кунжутне борошно	20	
Порошок ядра авокадо	60	377
Кунжутне борошно	40	
Порошок ядра авокадо	40	443
Кунжутне борошно	60	

Закінчення табл. 3.

1	2	3
Порошок ядра авокадо	20	475
Кунжутне борошно	80	
Порошок ядра авокадо	80	241
Гарбузове борошно	20	
Порошок ядра авокадо	60	256
Гарбузове борошно	40	
Порошок ядра авокадо	40	312
Гарбузове борошно	60	
Порошок ядра авокадо	20	365
Гарбузове борошно	80	

Джерело: розроблено авторами.

Як і в харчовій промисловості, де має місце зростаючий попит на екологічні продукти і впровадження безвідходних технологій, так і в технічних галузях виконуються роботи й реалізуються проекти, спрямовані на використання відновлюваної сировини, у тому числі і відходів виробництв. Зважаючи на це були виконані дослідження щодо можливості використання відходів авокадо (зовнішня шкірка, ядро і насіннева оболонка) у складі гумових сумішей.

В якості еластомерної основи використовували натуральний каучук (НК) марки RSS-1, країна походження В'єтнам. Вміст летких речовин 0,3-0,5 мас.%, початкова пластичність за Уоллесом 46-47 ум.од. (згідно з В'єтнамським стандартом TCVN3769-2004. Еквівалент ISO-2000:2003). Зовнішня шкірка, ядро і насіннева оболонка плодів авокадо застосовувались як дисперсні наповнювачі (рис. 1).

Показник вологоутримуючої здатності подрібнених відходів авокадо відповідав наведеному у табл. 2. Природний вміст води в дослідних зразках визначався непрямим методом, який заснований на визначенні масової частки води в матеріалі, що розраховується за різницею маси наважки продукту до і після висушування при температурі 105°C до постійної маси. Отримані результати визначення вмісту води в досліджуваних зразках наведені в табл. 4. Як видно з табл. 4, найменший вміст води мають порошки, отримані з зовнішньої шкірки плоду авокадо та насінневої оболонки, а найбільший – порошок з ядра плоду.

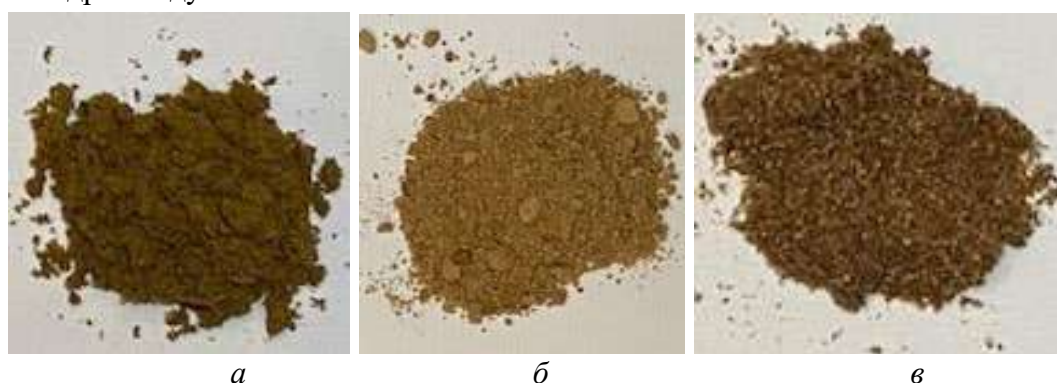


Рис. 1. Зовнішній вигляд досліджуваних зразків відходів плодів авокадо: а – порошок зовнішньої шкірки плоду авокадо; б – порошок ядра авокадо; в – порошок насінневої оболонки

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 4 – Вміст води у досліджуваних відходах плодів авокадо

Досліджуваний зразок	Шкірка зовнішня	Ядро	Насіннева оболонка
Вміст води, %	6,65	16,42	8,59

Джерело: розроблено авторами.



Для оцінювання можливості використання відходів плодів авокадо у складі гум як наповнювачі використовували модельні гумові суміші на основі натурального каучуку (НК), стандартного складу: 100 мас.ч. каучуку, 5 мас.ч. білил цинкових марки БЦОМ, 2 мас.ч. стеарину технічного, 3 мас.ч сірки меленої, 0,7 мас.ч. каптакса. Досліджувані відходи плодів авокадо (зовнішня шкірка і насіннева оболонка фракції до 0,25 мм; ядро – фракція до 0,5 мм) до складу гумової суміші вводили у кількості 40 мас.ч. на 100 мас.ч. каучуку. Виготовлення гумових сумішей здійснювали на лабораторних вальцях ЛБ 320-160/160 (фрикція 1:1,07) наступним способом. Виготовили маточну суміш наступного складу: 100 мас.ч. НК, 5 мас. ч. білил цинкових та 2 мас.ч. стеарину технічного. Маточну суміш поділили на п'ять рівних за масою частин. У кожен з чотирьох частин додали досліджувані відходи плодів авокадо та каоліну (для порівняння) по 40 мас.ч., відповідно до розподілу, наведеному в табл. 5, та компоненти вулканізуючої групи (сірку та каптакс), а в одну частину тільки компоненти вулканізуючої групи.

Технологічно введення наповнювачів, незалежно від типу, не мало ускладнень. Диспергування здійснювалося легко, розподіл компонентів – рівномірний, усадка гумової суміші, після виготовлення – відсутня. Гумові суміші вулканізували в режимі 143°C впродовж 10, 15, 20, 25, 30 хвилин. Вулканізати, що містили наповнювачі з плодів авокадо мали темно-коричневий колір (рис. 2).

Таблиця 5 – Склад гумових сумішей

Тип наповнювача (40 мас.ч на 100 мас.ч. каучуку)	Склад суміші				
	0	1	2	3	4
Каолін	-	+	-	-	-
Насіннева оболонка ядра авокадо (фракція до 0,25 мм)	-	-	+	-	-
Подрібнене ядро авокадо (фракція до 0,5 мм)	-	-	-	+	-
Подрібнена зовнішня шкірка авокадо (фракція до 0,25 мм)	-	-	-	-	+

Джерело: розроблено авторами

Вулканізати з каоліном та подрібненим ядром авокадо мали гладку поверхню, а поверхня вулканізаторів з насінневою оболонкою ядра авокадо та зовнішньою шкіркою авокадо мали на поверхні зморшки, що можна пояснити їхньою значно вищою вологоутримуючою здатністю.



а



б

Рис. 2. Фотографії вулканізаторів, що містять:

а – каолін; б – подрібнену насінневу оболонку ядра авокадо;

в – подрібнене ядро авокадо; г – подрібнену зовнішню шкірку авокадо

Джерело: розроблено авторами.



Рис. 2. Закінчення (початок на с.)

Технічні характеристики вулканізацій дослідних гумових сумішей, оцінювали за такими показниками як твердість за Шором та еластичність по відскоку [13; 14].

На рис. 3 наведено графічні залежності впливу типу наповнювача на еластичність та твердість досліджуваних гум за різної тривалості вулканізації.

При оцінюванні впливу типу наповнювача на еластичність та твердість вулканізацій як наповнювачів для порівняння використовували каолін – природний неорганічний анізотропний матеріал, який має деяку підсилювальну дію в гумах. Як видно з графіків, наведених на рис. 3, наповнювачі, отримані з відходів плодів авокадо, надають вулканізатам меншу еластичність та твердість ніж каолін, тобто гуми є м'якими.

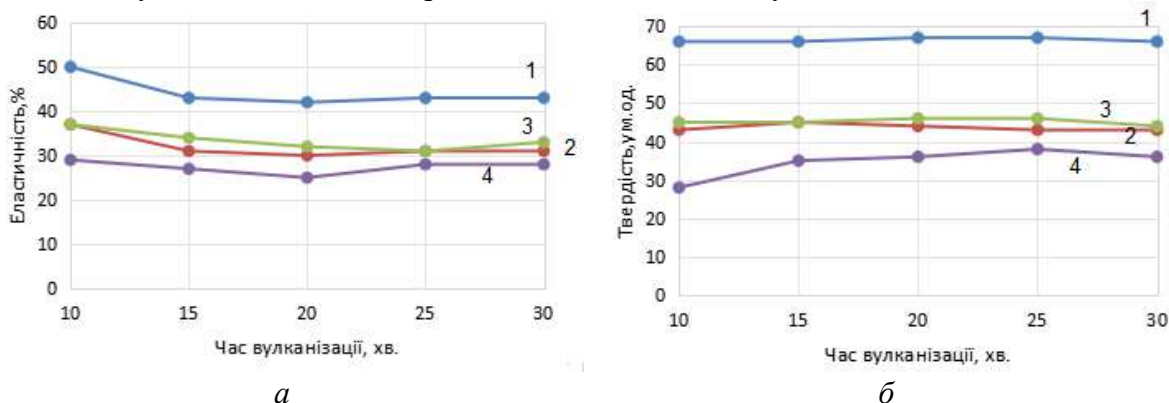


Рис. 3. Вплив типу наповнювача та тривалості вулканізації на: а – еластичність; б – твердість гум. Наповнювач: 1 – каолін; 2 – подрібнена насіннева оболонка ядра авокадо; 3 – подрібнене ядро авокадо; 4 – подрібнена зовнішня шкірка авокадо  
Джерело: розроблено авторами

М'які гуми, завдяки меншій деформованості, менше перегріваються, легко набувають необхідної форми, часто використовуються як ущільнювач. Між собою за впливом на еластичність та твердість порошкоподібні відходи плодів авокадо, можна розташувати у ряд: подрібнене ядро авокадо  $\geq$  подрібнена насіннева оболонка ядра авокадо  $>$  подрібнена зовнішня шкірка авокадо. Якщо треба одержати більш тверду гуму, як наповнювач можна застосувати композиції каоліну з відходами авокадо й коригувати співвідношення компонентів вулканізувальної групи.

Фізико-механічні властивості вулканізацій оцінювали методом визначення пружно-міцностних властивостей при розтягуванні [13]. Для порівняння були обрані рівномодульні гуми (табл. 6).

Таблиця 6 – Фізико-механічні властивості вулканікатів, що містять подрібнені відходи плодів авокадо

Показники	Досліджуваний зразок (тип наповнювача)			
	без наповнювача	шкірка зовнішня	ядро насіння	насіннева оболонка
Умовне напруження при 100% подовженні, МПа	0,6	0,2	0,2	0,4
Умовна міцність при розтягуванні при 25°C, МПа	6,3	1,1	1,6	2,5
Відносне подовження, %	550	410	400	480

Джерело: розроблено авторами.

Як видно з табл. 6, вулканізати, які містять подрібнені відходи плодів авокадо, мають менші значення за показниками ніж вулканікат без наповнювача. Це вказує на те, що у кількості 40 мас.ч. на 100 мас.ч. натурального каучуку досліджувані зразки виконують більшою мірою функцію розріджувачів і за ефективністю дії наближаються до інертних наповнювачів. Проте зниження відносного подовження вказує на їхню участь у процесі утворенні поперечних зв'язків при вулканізації.

Концентрацію поперечних зв'язків ( $N_c$ ) в досліджуваних вулканізатах визначали за методом встановлення рівноважної межі набухання [15].

Розрахунок концентрації поперечних зв'язків виконували за формулою:

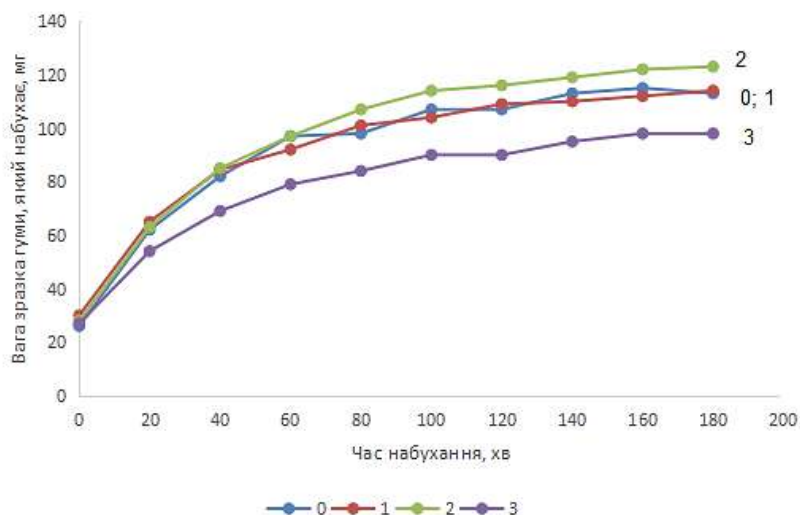
$$N_c = \frac{A \cdot \rho_v}{2M_c} \tag{1}$$

де  $A$  – число Авогадро ( $6,023 \cdot 10^{23}$ );

$\rho_v$  – щільність вулканікату;

$M_c$  – молекулярна маса частки макромолекули, яка знаходиться між вузлами поперечних зв'язків.

Для системи НК – ксилол:  $M_c = 0,96 \cdot 122 \cdot m_c = 117m_c$ . Значення  $m_c$  визначається з номограми «Залежність максимуму набухання від значення параметра  $\mu$  для вулканікатів з різною густиною просторовою сітки» [14], згідно з даними, одержаними при визначенні здатності гум до набухання та максимуму набухання ( $Q_\infty$ ) (рис. 4, а, 4, б).



а

Рис. 4. Вплив типу наповнювача на ступінь набухання вулканікатів :

0 – без наповнювача; 1 – подрібнена зовнішня шкірка авокадо;

2 – подрібнене ядро авокадо; 3 – подрібнена насіннева оболонка ядра авокадо

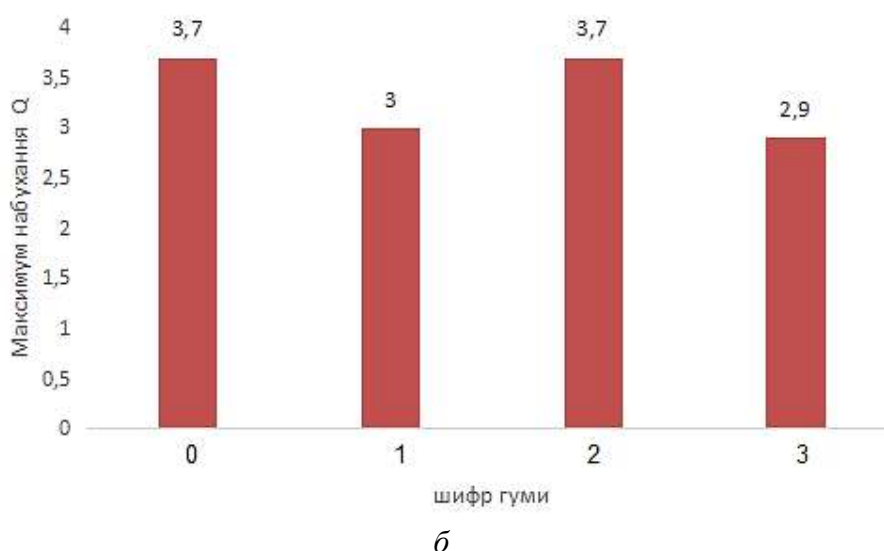


Рис. 4. Закінчення (початок на с. )

Джерело: розроблено авторами.

Отримані результати визначення концентрації поперечних зв'язків у вулканізатах, що містять подрібнені відходи плодів авокадо, наведені в табл. 7.

Таблиця 7 – Концентрація поперечних зв'язків вулканізаторів, що містять подрібнені відходи плодів авокадо

Досліджуваний зразок	Шкірка зовнішня	Ядро насіння	Насіннева оболонка
Концентрація поперечних зв'язків $N_c \cdot 10^{19}$	8,5	6,2	9,1

Джерело: розроблено авторами.

Як видно з табл. 7, найбільша концентрація поперечних зв'язків спостерігається для вулканізату, що містить подрібнену насіннєву оболонку ядра авокадо. За здатністю сприяти утворенню поперечних зв'язків при сірковій вулканізації, подрібнені відходи плодів авокадо розташовуються в ряд: насіннева оболонка > шкірка зовнішня > ядро насіння. Чим менша концентрація поперечних зв'язків, тим більше гума поглинає розчинник.

**Висновки.** На підставі проведених досліджень визначені показники вологоутримуючої здатності для різних видів відходів авокадо. Встановлено, що даний показник має найнижче значення для ядра (217 %), тоді як шкірка і насіннева оболонка характеризуються показником вологоутримуючої здатності 342 і 431 % відповідно. Суміші порошку ядра авокадо (до 40 %) з льняним, кунжутним і гарбузовим борошном можуть бути використані як загущувачі для харчових низькожирних емульсійних продуктів з високою часткою водної фази.

Визначена можливість використання відходів плодів авокадо у складі модельних гум на основі натурального каучуку. Встановлено, що об'єкти дослідження, по різному впливають на здатність гум до вулканізації, що підтверджується значеннями концентрацій поперечних зв'язків. Виконані дослідження показали доцільність вивчення поведінки гум за наявності в їхньому складі органічних природних компонентів як у ролі наповнювачів, так і в ролі модифікаторів. Перспективними є виконання досліджень щодо вивчення поведінки гум у присутності вулканізувальних систем різної ефективності, у присутності різних агентів вулканізації та з прискорювачами різного типу; оцінювання опору дії термічному старінню; вивчення характеристики гум при використанні систем «мінеральний наповнювач – відходи плодів авокадо» та ін.

Застосування подрібнених відходів плодів авокадо у складі гум дозволяє вирішити екологічну проблему утилізації відходів харчового виробництва; розширити асортимент інгредієнтів для виготовлення гумових виробів за рахунок поновлюваної природної сировини.

**Список використаних джерел**

1. Avocado fruit and by-products as potential sources of bioactive compounds / Norma Julieta Salazar-López, J. Abraham Domínguez-Avila, Elhadi M. Yahia, Beatriz Haydee Belmonte-Herrera, Abraham Wall-Medrano, Efigenia Montalvo-González, G.A. González-Aguilar // *Food Research International*. – 2020. – Vol. 138. – Part A. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109774>.
2. Avocado production worldwide from 2000 to 2022 (in million metric tons) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.statista.com/statistics/577455/world-avocado-production/>.
3. Avocado seed discoveries: Chemical composition, biological properties, and industrial food applications / Sneh Punia Bangar, Kyle Dunno, Sanju Bala Dhull, Anil Kumar Siroha, Sushil Changan, Sajid Maqsood, Alexandru Vasile Rusu // *Food Chemistry: X*. – 2022. – Vol. 16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100507>.
4. Baidhe, E. The Bioprocessing Quick Wins from Avocado Fruit in Uganda / E. Baidhe, N. Kiggundu, N. Banadda // *Advances in Bioscience and Biotechnology*. – 2020. – Vol. 11. – Pp. 405-419. DOI: <https://doi.org/10.4236/abb.2020.118028>.
5. Permal, R. Converting industrial organic waste from the cold-pressed avocado oil production line into a potential food preservative / R. Permal // *Food Chemistry*. – 2020. – Vol. 306. – Pp. 1-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125635>.
6. Beneficiation of avocado processing industry by-product: A review on future prospect / Tamrat Tesfaye, Million Ayele, Magdi Gibril, Eyasu Ferede, Dersseh Yilie Limeneh, Fangong Kong // *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*. – 2022. – Vol. 5. – Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100253>.
7. Shafaet, Ahmed. Strong and biodegradable films from avocado peel fiber / Ahmed Shafaet, Janaswamy Srinivas // *Industrial Crops and Products*. – 2023. – Vol. 201. – P. 1-36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116926>.
8. Tanweer, Ahmad. A review of avocado waste-derived adsorbents: Characterizations, adsorption characteristics, and surface mechanism / Ahmad Tanweer, Danish Mohammed // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 296. – 134036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134036>.
9. Marta, Siol. Chemical Composition, Physicochemical and Bioactive Properties of Avocado (*Persea americana*) Seed and Its Potential Use in Functional Food Design / Marta Siol, Anna Sadowska // *Agriculture*. – 2023. – Vol. 13(2). – P. 316. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13020316>.
10. Проніна, М. С. Функціональні добавки з плодів авокадо / М. С. Проніна, Т. Г. Філінська, А. О. Філінська // *Хімія та сучасні технології: Х Ювілейна Міжнародна науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти та молодих учених тези доповідей, 23-24 листопада*. – У 6 томах. – Т. II. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2021. – С. 133-134.
11. «Сучасні напрями розвитку технологій виробництва харчових продуктів» та «Сучасні фізико-хімічні методи у виробництві харчових продуктів: методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів спеціальності 102 «Хімія» денної форми навчання / уклад. Ю. В. Менафова. – Краматорськ: ДДМА, 2020. – 24 с.
12. Jorge Arturo Mejía-Barajas. Biotechnological applications of avocado seed – a review / Jorge Arturo Mejía-Barajas // *Mexican Journal of Biotechnology*. – 2020. – Vol. 5, № 3. – Pp. 33-70. DOI: <https://doi.org/10.29267/mxjb.2020.5.3.33>.
13. Хімія та технологія еластомерів: лабораторний практикум [Електронний ресурс] / уклад.: Л. Д. Масленнікова, Ф. Г. Фабуляк, С. В. Іванов. – К.: НАУ, 2007. – 32 с. – Режим доступу: <https://core.ac.uk/download/pdf/323011785.pdf>.
14. ДСТУ ISO 4662:2019 (ISO 4662:2017, IDT). Rubber, vulcanized or thermoplastic — determination of rebound resilience. Гума вулканізована чи термопластична. Визначення еластичності за відскоком. Дата введення 01.09.2019. – Київ: ДП «УкрНДНЦ». – 13 с.
15. Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни «Структура та властивості композиційних матеріалів на основі еластомерів» за освітньо-професійною програмою «бакалавр» для студентів спеціальності «161 Хімічні технології та інженерія» вибірковий блок «Хімічні технології переробки полімерних та композиційних матеріалів» / уклад. М. М. Терещук. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2018. – 27с.

### References

1. Salazar-López, N.J., J. Domínguez-Avila, A., Yahia, E.M., Belmonte-Herrera, B.H., Wall-Medrano, A., Montalvo-González, E., González-Aguilar, G.A. (2020). Avocado fruit and by-products as potential sources of bioactive compounds. *Food Research International*, 138, Part A. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109774>.
2. Avocado production worldwide from 2000 to 2022 (in million metric tons). (2024). <https://www.statista.com/statistics/577455/world-avocado-production>.
3. Bangar, S.P., Dunno, K., Dhull, S.B., Siroha, A.K., Changan, S., Maqsood, S., Rusu, A.V. (2022). Avocado seed discoveries: Chemical composition, biological properties, and industrial food applications. *Food Chemistry: X*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100507>.
4. Baidhe, E., Kiggundu, N., Banadda, N. (2020). The Bioprocessing Quick Wins from Avocado Fruit in Uganda. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 11, 405-419. <https://doi.org/10.4236/abb.2020.118028>.
5. Permal R. (2020). Converting industrial organic waste from the cold-pressed avocado oil production line into a potential food preservative. *Food Chemistry*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125635>.
6. Tesfaye, T., Ayele, M., Gibril, M., Ferede, E., Limeneh, D. Y., Kong, F. (2022). Beneficiation of avocado processing industry by-product: A review on future prospect. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100253>.
7. Ahmed, S., Janaswamy, S. (2023). Strong and biodegradable films from avocado peel fiber. *Industrial Crops and Products*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116926>.
8. Ahmad, T., Danish, M. (2022). A review of avocado waste-derived adsorbents: Characterizations, adsorption characteristics, and surface mechanism. *Chemosphere*, 296. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134036>.
9. Siol, M., Sadowska, A. (2023). Chemical Composition, Physicochemical and Bioactive Properties of Avocado (*Persea americana*) Seed and Its Potential Use in Functional Food Design. *Agriculture*, 13(2), 316. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020316>.
10. Pronina, M.S., Filinska, T.H., Filinska, A.O. (2021). Funktsionalni dobavky z plodiv avokado [Functional additives from avocado fruits]. *Khimiiia ta suchasni tekhnologii – Chemistry and Modern Technologies: Proceedings of X Jubilee International Scientific and Practical Internet Conference of Higher Education Graduates and Young Scientists* (Vol. 2, pp. 133–134). DVNZ UDKhTU.
11. Mienafova, Yu.V. (2020). «Suchasni napriamy rozvytku tekhnologii vyrobnytstva kharchovykh produktiv» ta «Suchasni fizyko-khimichni metody u vyrobnytstvi kharchovykh produktiv: metodychni vказivky do laboratornykh robot dlia studentiv spetsialnosti 102 «Khimiiia» dennoi formy navchannia [“Modern trends in the development of food production technologies” and “Modern physico chemical methods in food production”: methodological instructions for laboratory work for students of the specialty 102 “Chemistry” full-time study]. DDMA.
12. Mejía-Barajas, J.A. (2020). Biotechnological applications of avocado seed – a review. *Mexican Journal of Biotechnology*, 5(3), 33-70. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2020.5.3.33>.
13. Maslennikova, L.D., Fabuliak, F.H., Ivanov, S.V. (2007). *Khimiiia ta tekhnologiiia elastomeriv: laboratornyi praktykum [Chemistry and technology of elastomers: laboratory workshop]*. NAU. <https://core.ac.uk/download/pdf/323011785.pdf>.
14. Rubber, vulcanized or thermoplastic — determination of rebound resilience. Vulcanized or thermoplastic rubber. Determination of elasticity by rebound. (2019). DSTU ISO 4662:2019 (ISO 4662:2017, IDT). SE "UkrNDNC".
14. Tereshchuk, M.M. (2018). *Metodychni vказivky do laboratornykh zaniat z dystsypliny “Struktura ta vlastyvoli kompozytsiinykh materialiv na osnovi elastomeriv” za osvitho-profesiinoiu prohramoiu «bakalavr» dlia studentiv spetsialnosti «161 Khimichni tekhnologii ta inzheneriia» vybirkovyi blok «Khimichni tekhnologii pererobky polimernykh ta kompozytsiinykh materialiv» [Methodological instructions for laboratory classes in the discipline “Structure and properties of composite materials based on elastomers” under the educational and professional program “bachelor” for students of the specialty “161 Chemical technologies and engineering” selective block “Chemical technologies of processing polymer and composite materials”]*. DVNZ UDKhTU.

Отримано 04.07.2024



**Tetiana Filinska<sup>1</sup>, Tereshchuk Maryna<sup>2</sup>, Antonina Filinska<sup>3</sup>**<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences,Associate Professor of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products  
Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)**E-mail:** [filinskaya@ukr.net](mailto:filinskaya@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-7921-1989><sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technologies of Fuels, Polymer and Printing Materials  
Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)**E-mail:** [latiniys229@gmail.com](mailto:latiniys229@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4458-1831><sup>3</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:** [antoniyafilein@ukr.net](mailto:antoniyafilein@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-6975-6186>**RESEARCH OF AVOCADO WASTE AS MULTIPURPOSE  
SECONDARY RAW MATERIAL RESOURCES**

*The growing volume of avocado cultivation and processing is accompanied by the generation of a large amount of waste, which imposes a significant ecological burden on the environment. The core and peel of an avocado contain several components that allow them to be used as secondary material resources in various industries, including food, cosmetics, and chemicals. These components can serve as raw materials for the production of pigments, biofuels, adsorbents, and biodegradable film materials, as well as having antimicrobial and antioxidant effects and containing fibers and other biologically active components.*

*An analysis of recent publications has shown that considerable attention is being paid to researching the problem of using avocado waste. There is an urgent need to study the technological properties of the peel, seed (kernel), and seed coat, and to expand the scope of their application as functional additives to various food and technical products.*

*The purpose of this article is to study the properties of avocado waste, determine their characteristics as thickeners and moisture-retaining components of food emulsion products, and evaluate their use as part of rubber compositions.*

*The article presents the results of the research on the properties of powders obtained from the peel, core, and seed coat of avocados. The indicators of the moisture-retaining capacity of both individual avocado waste and their mixtures with various types of flour were determined. The seed kernel has the lowest moisture-holding capacity (217%), which is explained by the presence of a significant amount of fat in its composition, while the skin and seed coat, which contain a greater amount of fibers, have this indicator at the level of 342% and 431%, respectively. Mixtures of avocado kernel powder (up to 40%) with flax, sesame, and pumpkin flour can serve as thickeners for low-fat food emulsion products.*

*Model rubber mixtures based on natural rubber (NR), with a standard composition of 100 wt. parts were used to evaluate the possibility of using avocado fruit waste in rubber as fillers: 5 wt. parts zinc oxide, 2 wt. parts stearic acid, 3 wt. parts sulfur, and 0.7 wt. parts cap tax. The introduction of avocado powders from the seed core, seed coat, and outer skin of the fruit in the amount of 40 parts by weight into the model rubber mixtures per 100 wt. parts of rubber produced vulcanizates with less elasticity and hardness than those made with kaolin, resulting in softer rubbers. These softer rubbers, due to their lower deformability index, overheat less, easily acquire the required shape, and are often used as sealants. If it is necessary to obtain harder rubbers, compositions of kaolin with avocado waste can be used as fillers, adjusting the ratio of components. The conducted studies demonstrated the viability of studying the behavior of rubbers in the presence of organic natural components in their composition, both as fillers and modifiers. The use of crushed avocado fruit waste in the composition of rubber helps solve the ecological problem of disposing of food production waste and expands the range of ingredients for the manufacture of rubber products using renewable natural raw materials.*

**Keywords:** avocado; waste; core; peel; functional supplement; low-fat emulsions; rubber.

Fig.: 4. Table: 7. References: 16.

**Олена Борисівна Хребтань**

кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та екології  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [olenaborisovnahrebtan@gmail.com](mailto:olenaborisovnahrebtan@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-7561-6318>  
ResearcherID: [KQU-9294-2024](https://orcid.org/0009-0000-7561-6318)

**ДОСЛІДЖЕННЯ АСОРТИМЕНТУ М'ЯСО-РОСЛИННИХ КОНСЕРВІВ  
ВИРОБНИЦТВА ТОВ «ФАБРИКА ЗДОРОВО», м. ЧЕРНІГІВ**

У статті досліджено асортимент, особливості рецептури, технологія виробництва та показники якості м'ясо-рослинних консервів, що виготовляє ТОВ «Фабрика Здорово», м. Чернігів, для забезпечення українських військових, постачання до вітчизняної торговельної мережі і для експорту в країни Євросоюзу. М'ясо-рослинні консерви призначені для раціонального, збалансованого харчування, спроможні задовольняти добову потребу людини в рослинних і тваринних білках, що є важливим чинником у харчуванні контингенту, що знаходиться в екстремальних умовах. Консервована м'ясо-рослинна продукція має значні переваги: найнадійніше збереження харчової і поживної цінності продукції; збереження якості і безпечності харчових інгредієнтів завдяки стерилізації; значні терміни зберігання; зручність споживання харчової продукції та ін. Головним завданням поєднання м'ясної і рослинної сировини у консервованій продукції - є збагачення раціону людини білками, вітамінами, мікроелементами та іншими корисними компонентами, незалежно від пори року та умов споживання.

**Ключові слова:** технологія консервування м'ясної продукції; м'ясна сировина; рослинна сировина; асортимент, харчова цінність, якість м'ясо-рослинних консервів; раціональне харчування військових, органолептичні показники якості.

Табл.: 6. Рис.: 3. Бібл.: 24.

**Актуальність теми дослідження.** Консервування залишається однією з найефективніших технологій, що забезпечує довгострокове збереження якості та безпечності харчової продукції. Саме консервовані харчові продукти є стратегічно важливими сьогодні для організації безперебійного повноцінного і збалансованого харчування військових Збройних Сил України, людей, які знаходяться в екстремальних або невизначених умовах. Для таких категорій споживачів консервовані харчові продукти найбільше відповідають вимогам раціонального харчування та зручності споживання, а саме:

- підготовленість консервованої продукції до споживання;
- збалансованість комбінованих консервованих продуктів завдяки їх раціональному складу (наприклад, комбінування м'ясної сировини з крупами, овочами тощо);
- забезпечення збереження в часі і просторі якості і безпечності готових до вживання харчових продуктів;
- зручність споживання без застосування столового посуду і спеціальних умов приймання їжі;
- різноманітність асортименту консервованої харчової продукції та різні комбінації харчової сировини;
- придатність до зручного та довгострокового зберігання в компактному упакуванні у несприятливих умовах без псування;
- можливість зручного транспортування різними видами транспортних засобів.

Сучасний вітчизняний асортимент м'ясо-рослинних консервів формується за класичними видами відповідно до стандартів ДСТУ 4607:2006 і ДСТУ 6043:2008 [1; 2], що є недостатнім для організації збалансованого харчування контингенту споживачів, які вживають цю продукцію. Саме тому, вітчизняні м'ясопереробні підприємства намагаються розширити асортимент шляхом розробки та впровадження нової продукції, на яку розробляється власна нормативна документація підприємства – технічні умови України (ТУ У).

Одним із вітчизняних лідерів з розробки й виробництва сучасного асортименту м'ясо-рослинних консервів – є ТОВ «Фабрика Здорово», м. Чернігів, яке відновило свою роботу після звільнення Чернігівської області від військ РФ у 2022 році й розпочало виготовлення консервів перших і других страв в металевій тарі з кришкою типу Easy open



та у реторт-пакетах за стандартами НАТО для Збройних Сил України, Національної Гвардії України, Державної прикордонної служби України. Підприємство застосувало нове упакування м'ясних консервів в реторт-пакети, що дозволяє проводити розігрівання продукції, безпосередньо, в упакуванні. У 2024 році ТОВ «Фабрика Здорово» було зареєстровано (отримало євро-номер) як експортер продукції до країн Євросоюзу [3].

**Постановка проблеми.** Безперервне постачання харчових продуктів певним категоріям споживачів: військовим, особам переміщеним з окупованих територій та іншим, можливе при застосуванні технології консервування, що гарантує довгострокове збереження їхньої якості та безпечності в різних умовах. М'ясо-рослинні консерви мають високу харчову цінність, завдяки складу, збагаченому білками, мікроелементами, вітамінами та іншими корисними елементами й мають великий попит у споживачів.

Важливим питанням є дослідження технології виробництва, харчової цінності та якості асортименту м'ясо-рослинних консервів, що розробляють сучасні виробничі підприємства України, зокрема, ТОВ «Фабрика Здорово», яке спеціалізується саме на виробництві такої продукції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Консервована м'ясна продукція не входить до щоденного раціону звичайних споживачів, а використовується в певних обставинах (у туристичному поході, під час відпочинку на пікніку, в дорозі тощо). Зовсім іншу функцію виконує консервована продукція в екстремальних умовах (військовий стан, бойові дії, евакуація людей з небезпечних місць та ін.). У цих обставинах, основний раціон може складати саме консервована продукція. Тому, підприємствам, що спеціалізуються на виробництві м'ясних консервів, необхідно впроваджувати нові рецептури, застосовувати сучасні технології з виробництва збагаченої корисними речовинами продукції. Ефективність таких розробок підвищиться із залученням у виробництво новітніх експериментальних розробок українських і зарубіжних науковців.

На сьогодні відомо багато наукових досліджень щодо розробки рецептур і вдосконалення технологій виробництва асортименту м'ясних і м'ясо-рослинних консервів, зокрема, такі дослідження проводили відомі вітчизняні й закордонні науковці: І. І. Тимошук, М. М. Клименко, Ф. В. Перцевий, В. М. Пасічний, Н. В. Притульська, О. І. Гащук, І. О. Ряполова, Чи Кієн Нгуєн, С. І. Сіріл, А. К. Сміт та інші.

Г. О. Сімахіна та Н. О. Стеценко обґрунтували доцільність використання насіння олійних культур для виробництва м'ясо-рослинних консервів для харчування військово-службовців. Науковцями була розроблена білково-жирова емульсія з дієтичною добавкою, яка включала: насіння гірчиці – 9,72 %, кунжуту – 55,6 %, соняшника – 34,7 %, а також соєвий білковий ізолят, оливкову олію [4].

Група науковців кафедри технології м'яса, м'ясних і олієжирових продуктів НУХТ, під керівництвом професора В. М. Пасічного розробила і продовжує розробляти та удосконалювати технології використання грибів, вирощених у регуляторних умовах, для виробництва м'ясних і м'ясо-рослинних консервів других страв, фаршевих, шинкових і паштетних консервів з використанням широкого спектра основної м'ясної і нетрадиційної сировини [5]. Цю ж тему продовжує у своїх дослідженнях І. О. Ряполова, яка запропонувала рецептуру і технологію виготовлення консервів м'ясо-рослинних «Свинина з грибами», де було створено полікомпонентний комплекс і, за рахунок введення грибів, збагачено склад консервів цинком, вітамінами групи В (В<sub>2</sub>, В<sub>3</sub>, В<sub>5</sub>, В<sub>6</sub>, В<sub>12</sub>), вітамінами Д, Е, Н (біотином)[6].

Цікаві дослідження щодо збагачення м'ясо-рослинних консервів бобовими культурами провели науковці НУХТ, які запропонували рецептуру й удосконалили технологію виготовлення м'ясо-рослинних консервів високої харчової цінності з вмістом м'яса птиці і сочевиці. Фасування цих консервів передбачено у реторт-упаковки, що забезпечує їх

використання для харчування у надзвичайних ситуаціях [7]. Також, було отримано наукове підтвердження щодо доцільності використання біоактивного нуту в рецептурі м'ясо-рослинних консервів, що сприяло значному підвищенню харчової цінності та органолептичних характеристик продукції [8].

За результатами досліджень Ю. П. Крижової та В. Н. Корзун розроблені нові види лікувально-профілактичних м'ясних консервів радіозахисної дії. До складу консервів науковці вводили, розроблену ними антирадіонуклідну біологічно-активну суміш АРБАС (з вмістом радіоблокаторів фероцину, альгінату натрію; сухого молока та вітаміну Р), що зв'язує радіонукліди – цезій-137 і стронцій-90 і знижує вбирання організмом людини радіонуклідів. Були також отримані експериментальні дані щодо підвищеної харчової і біологічної цінності м'ясних консервів з вмістом суміші АРБАС [9].

Також, були розроблені патенти на корисні моделі на м'ясо-рослинні консерви. Групою науковців під керівництвом професора О. І. Гащук (Національний університет харчових технологій, м. Київ), був отриманий патент на корисну модель на м'ясо-рослинні консерви для спеціального харчування, які збагачені біологічно активними та мінеральними речовинами та мають профілактичну дію. До складу цих консервів увійшли: м'ясо птиці, біомаса грибів, суміш пророщених зерен злакових культур (пшениці, вівса, кукурудзи, ячменю), сочевиці гідратованої, бланшованої [10]. Науковцями Таврійського державного агротехнологічного університету було розроблено ряд патентів на м'ясо-рослинні консерви профілактичного спрямування: «Язик під французьким соусом», «Рагу по-мисливські», «Телятина у грибному соусі» [11; 12; 13].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Дослідження науковців в галузі м'ясо-переробного виробництва і, зокрема, виробництва м'ясо-рослинних консервів, з урахуванням надзвичайної ситуації в Україні - є недостатніми і потребують подальшої роботи в цьому напрямі. Очевидною є і необхідність більш ефективної співпраці науковців з передовими та успішними вітчизняними виробничими підприємствами м'ясо-переробної галузі, що значно пришвидшить розробку і обґрунтування нового високоякісного асортименту м'ясо-рослинних консервів із застосуванням новітніх технологій, нових видів сировини, з урахуванням принципів збалансованого харчування.

**Метою статті** є дослідження асортименту, технології виробництва та якості м'ясо-рослинних консервів виробництва ТОВ «Фабрика Здорово», м. Чернігів.

**Виклад основного матеріалу** У ДСТУ 4424:2005, в розділі 7 Консервне виробництво, надано визначення таких термінів:

**7.1 м'ясні консерви** – продукт з м'яса та (або) субпродуктів, герметично закупорений в банки, підданий дії високої температури;

**7.2 м'ясо-рослинні консерви** – м'ясні консерви із використанням рослинної сировини (овочі, крупи, бобові, макаронні вироби) відповідно до рецептури [14].

Сучасний асортимент м'ясо-рослинних консервів класифікується за такими ознаками [15]:

**1. За призначенням:**

*1) для перших страв (вміст м'яса від 10 до 29%):*

- супи (круп'яні, овочеві, макаронні, овочево-круп'яні); для других страв;
- борщі;
- розсольники.

*2) для других страв (вміст м'яса – 35-45%, гарніру – 55-65%):*

- смажене м'ясо (яловичина, свинина, баранина) з гарніром, гуляш з картоплею, макаронними виробами або крупами;
- каші з м'ясом (м'яса – не менше 33%);
- солянка з м'ясом;

- овочі з м'ясом;
- сосиски з капустою.

**2. За групами, підгрупами і класами:**

- 1) групи (м'ясні і м'ясомісні);
- 2) підгрупи (м'ясо-рослинні, рослинно-м'ясні);
- 3) класи (консерви м'ясні).

**3. За мінімальним вмістом м'ясних інгредієнтів, класи:**

3.1 Консерви м'ясні %:

- 1) клас А – 55 %;
- 2) клас Б – 40 %.

3.2 Консерви м'ясо-рослинні:

- 1) клас В від 30 до 40 %;
- 2) клас Г від 20 до 30 %.

3.3. Консерви рослинно-м'ясні:

- 1) клас Д від 10 до 20 %
- 2) клас Е від 5 до 10 %.

**4. За режимом теплової обробки:**

- 1) стерилізовані консерви (за температури від 121,1 °С і вище);
- 2) пастеризовані консерви (за температури нижче 100 °С, найчастіше – 75-80 °С).

**5. За видом м'ясо-рослинних консервів:**

- 1) консерви із бобових з м'ясом;
- 2) консерви із макаронних виробів з м'ясом або м'ясним фаршем;
- 3) консерви із круп з м'ясом;
- 4) консерви з овочами і м'ясом.

Згідно ДСТУ 4607:2006 «Консерви м'ясо-рослинні. Каші з м'ясом. Загальні технічні умови», м'ясо-рослинні консерви поділяються на такі види [1]:

- каша (ячна або перлова, або рисова, або гречана, або пшоняна) з яловичиною;
- каша (ячна або перлова, або рисова, або гречана, або пшоняна) зі свининою;
- каша (ячна або перлова, або рисова, або гречана, або пшоняна) з бараниною;
- каша (перлова, або рисова) з м'ясом та субпродуктами;
- каша (перлова або гречана, або рисова) з соєю та м'ясом.

Згідно з Постановою КМУ № 426, від 29 березня 2002 року (в редакції від 30.07.2024, №863) в Нормах харчування військовослужбовців Збройних Сил та інших військових формувань, а саме – в Нормі № 10 і Нормі № 15 [16], (таблиця 1, 2) зазначена кількість споживання м'ясо-рослинних консервів на одну людину в умовах, коли немає можливості готувати їжу із продуктів за основною нормою харчування.

*Таблиця 1 – Норма № 10 Повсякденний набір сухих продуктів*

Найменування продукту	Кількість на одну людину на добу, грамів
Консерви м'ясо-рослинні (каші з м'ясом в асортименті)	650

*Таблиця 2 – Норма № 15 Добовий польовий набір продуктів*

Найменування продукту	Раціон сніданку/ вечері, грамів	Раціон обіду, грамів	Кількість на одну людину на добу, грамів
Готова до вживання друга страва (каші з м'ясом або овочі з м'ясом в асортименті) в реторт-упаковці	350/350	350	1050

Отже, м'ясо-рослинні консерви займають важливу позицію в раціоні військовослужбовців і забезпечують значну частину фізіологічно повноцінного харчування, що необхідно для відновлення енергії військових.

За стандартами НАТО [17], які сьогодні гармонізуються з вітчизняними стандартами харчування військових, формуються тижневі раціони-розкладки, що розробляються за такими критеріями:

- гранична вартість комплексу продуктів харчування на людину;
- гранична вартість комплексу продуктів харчування на добу;
- вимоги до калорійності харчування.

Калорійність харчування для військових за стандартами Північноатлантичного альянсу становить 3500 калорій і раціон постійно переглядається і вдосконалюється науковцями альянсу [18; 19].

У табл. 3 представлений асортимент м'ясо-рослинних консервів, що виробляє ТОВ «Фабрика Здорово» для забезпечення українських військових, постачання до вітчизняних торговельних мереж і для експорту в країни Євросоюзу.

Як бачимо, асортимент підприємства достатньо широкий, представлений практично всіма видами м'ясо-рослинних консервів: класичні види продукції (каші з зернобобовими) і нові види («Каша гречана з куркою та овочами», «М'ясо качки з булгуром» та інші).

Харчова цінність м'ясо-рослинних консервів ТОВ «Фабрика Здорово» зазначена у табл. 4. Важливою інформацією для оцінювання харчової цінності м'ясо-рослинних консервів ТОВ «Фабрика Здорово» - є вказання рекомендованої добової норми (РДН) для дорослих на одиницю товару, згідно з Регламентом ЄС 1169/2011, Додаток XIII, Частина В [20]. У цьому Додатку Регламенту наведені референтні норми харчування – DRI (Dietary Reference Intakes), прийняті в Євросоюзі, що ґрунтуються на фактичних даних щодо кількості поживних речовин для щоденного споживання різними категоріями споживачів, визначені розрахункові середні потреби людини для складання оптимального раціону.

Досліджувані м'ясо-рослинні консерви виробляються на підприємстві за технологічною схемою, яка складається з таких основних етапів:

1. Технологічні операції з м'ясною сировиною: приймання м'ясної сировини; зачищення (видалення забруднень, волога обробка); розділка туш і напівтуш; обвалювання (відокремлення м'язової, жирової та інших тканин туш від кісток); жилування (видалення хрящів, залишків з'єднувальної тканини та ін.); нарізання м'яса на шматки; фасування у підготовлені металеві банки.

2. Технологічні операції з рослинною сировиною: приймання рослинної сировини; сортування; видалення бруду, сторонніх домішок; промивання; замочування; бланшування, варіння, охолодження; дозування (крупни й овочеву сировину дозують за об'ємом по рецептурі консервів); укладання в банки: круп'яну сировину цілою укладають в банки разом з м'ясною сировиною, овочеву сировину нарізають на шматочки за розмірами, вказаними у ТУ У на даний вид консервів і додають до м'ясної сировини.

Далі банки з продукцією стерилізують у водяних автоклавах. Стерилізація м'ясо-рослинних консервів відбувається при температурі 125<sup>0</sup>С протягом 1 години 30 хв. Саме стерилізація м'ясо-рослинних консервів забезпечує їх безпечність (запобігання утворенню отруйного токсину, який виробляється мікроорганізмом *Clostridium botulinum* – дуже небезпечного для організму людини) та збереження якості продукції.




Як бачимо з таблиці 3, у складі м'ясо-рослинних консервів відсутні штучні і хімічні добавки для підсилення смаку і запаху. Прянощі, які застосовуються у продукції: перець чорний мелений, лавровий лист мелений, паприка, куркума, карі не гострий – класичні види прянощів, дозволені у виробництві м'ясо-рослинних консервів.

Зручність споживання досліджуваних м'ясо-рослинних консервів, забезпечується конструкцією банок для консервів з кришкою типу Easy Open, а також застосуванням гнучкої полімерної упаковки – реторт-пакетів типу Doypack, які заповнюються у вакуум-середовищі. Інформація з маркування консервів повністю відповідає вимогам Закону України «Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів» [21].




Найважливішою особливістю м'ясо-рослинних консервів є комбінація тваринних і рослинних білків в одному продукті. Поєднання тваринних і рослинних білків забезпечує повноцінне харчування та задовольняє енергетичні потреби організму людини.

Збалансованість складу м'ясо-рослинних консервів ТОВ «Фабрика Здорово» підтверджується кількістю білків, жирів і вуглеводів у їх складі (див. табл. 4).

Таблиця 3 – Характеристика асортименту м'ясо-рослинних консервів виробництва ТОВ «Фабрика Здорово»

Найменування консервів	Зовнішній вид консервів	Класифікаційні ознаки	Вид упакування	Склад продукту	Позначення нормативного документа
1	2	3	4	5	6
1. Каша гречана зі свининою, 325 г		М'ясо-рослинні консерви для других страв. Консерви із круп з м'ясом	Металева, жерстяна банка для консервування з кришкою типу Easy open	Свинина знежилowana, крупа гречана, вода питна, сіль кухонна, цибуля ріпчаста сушена, морква столова сушена, перець чорний мелений.	ДСТУ 4607:2006
2. М'ясо копчене з горохом, 325 г		М'ясо-рослинні консерви для других страв. Консерви із бобових з м'ясом.	Металева, жерстяна банка для консервування з кришкою типу Easy open	Яловичина копчена, крупа горохова, олія соняшникова, морква сушена, сіль кухонна, цибуля сушена, перець чорний мелений.	ТУ У 15.1-33259568-001:2005
3. Яловичина з чорносливом, 200 г		М'ясо-рослинні консерви для других страв. Консерви з м'яса з додаванням сухофруктів.	Металева, жерстяна банка для консервування з кришкою типу Easy Open	Яловичина знежилowana, вода питна, чорнослив, сіль кухонна, цибуля ріпчаста сушена, розмарин, перець чорний мелений, лист лавровий мелений.	ТУ У 10.1-37330979-001:2018

Закінчення табл. 3

1	2	3	4	5	6
4. Гостра квасоля з м'ясом «Чилі Кон Карне», 340 г		М'ясо-рослинні консерви для других страв. Консерви із бобових з м'ясом.	Металева, жерстяна банка для консервування з кришкою типу Easy Open	Яловичина подрібнена, квасоля чорна, вода питна, томатна паста, паприка червона сушена, цукор-пісок, сіль кухонна, цибуля смажена, какао-порошок, часник сушений мелений перець червоний Чилі, зіра.	ТУ У 10.1-37330979-001:2018
5. М'ясо качки з булгуром, 325 г		М'ясо-рослинні консерви для других страв. Консерви із круп з м'ясом	Металева, жерстяна банка для консервування з кришкою типу Easy open	М'ясо качки без кісток, булгур, вода питна, олія соняшникова рафінована, паприка червона сушена, сіль кухонна, куркума, морква сушена, цибуля сушена, карі не гострий, перець червоний Чилі.	ТУ У 10.1-37330979-001:2018
6. Плов з м'яса качки та булгуру, 340 г		М'ясо-рослинні консерви для других страв. Консерви із круп з м'ясом	Металева, жерстяна банка для консервування з кришкою типу Easy open	М'ясо качки без кісток, булгур, олія соняшникова рафінована, паприка червона сушена, сіль кухонна, куркума, морква сушена, цибуля сушена, карі не гострий, перець червоний Чилі.	ТУ У 10.1-37330979-001:2018

Таблиця 4 – Харчова цінність м'ясо-рослинних консервів виробництва ТОВ «Фабрика Здорово»

Показники харчової цінності консервів	Асортимент м'ясо-рослинних консервів													
	Каша гречана зі свининою, 325 г	РДН*, %	М'ясо копчене з горохом, 325 г	РДН, %	Яловичина з чорносливом, 200 г	РДН, %	Гостра квасоля з м'ясом «Чилі Кон Карне», 340 г	РДН, %	М'ясо качки з булгуром 325 г	РДН, %	Плов з м'яса качки та булгуру, 340 г	РДН, %	Каша гречана з куркою та овочами, 350 г	РДН, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Харчова цінність консервів на 100 г харчового продукту</b>														
Жири, г (g)	23,9	-	36,6	-	13	-	3,9	-	22,7	-	17	-	12	-
- з них ненасичені, г (g)	5,2	-	1,1	-	5,7	-	1,4	-	1,8	-	4,7	-	2,3	-
Холестерин, мг (mg)	43,2	-	14,2	-	64	-	-	-	27,4	-	-	-	-	-
Вуглеводи, г (g)	16,7	-	23,1	-	1,6	-	15,5	-	22,3	-	15	-	10	-
- з них цукри, г (g)	0,7	-	1,7	-	1,5	-	0,3	-	0,9	-	0,9	-	0,5	-
Білки (протеїни), г (g)	6,8	-	13,8	-	15	-	11,9	-	11,7	-	11,7	-	7,0	-
Сіль, г (g)	1,6	-	1,9	-	1,1	-	1,4	-	1,2	-	1,26	-	1,2	-
Енергетична цінність, кДж (ккал)	1034 (247)	-	2002,7 (478,6)	-	761,5 (182)	-	605,8 (144,8)	-	1424,8 (340,3)	-	1041,8 (249)	-	737 (176)	-
<b>на одиницю товару</b>														
Жири, г (g)	78	111	119	170	26	37	13,3	19	74	105	58	83	42	60
- з них ненасичені, г (g)	17	84,5	3,6	18	11	57	4,8	24	5,9	29	16	80	8,1	40
Холестерин, мг (mg)	140	47	46	15	128	43	-	-	89	30	-	-	-	-
Вуглеводи, г (g)	54	21	75	29	3,2	1,2	53	20	72	28	51	20	35	13
- з них цукри, г (g)	2,3	2,5	5,5	6,1	3	3,3	1,0	1,1	2,9	3,3	3,1	3,4	1,8	1,9
Білки (протеїни), г (g)	22	44	45	90	30	60	40	81	38	76	40	80	24,5	49
Сіль, г (g)	5,2	87	6,2	103	2,2	37	4,8	79	3,9	65	4,3	71	4,2	70
Енергетична цінність, кДж (ккал)	3360 (803)	40	6509 (1555)	78	1523 (364)	18	2060 (492)	25	4631 (1106)	55	3542 (847)	42	2579 (616)	31

\*Рекомендована добова норма (РДН) за Регламентом ЄС 1169/2011, %.

Найбільша кількість білків міститься у таких консервах: «М'ясо копчене з горохом» - 45 г, «Гостра квасоля з м'ясом «Чилі Кон Карне» і «Плов з м'яса качки та булгуру» - по 40 г, «М'ясо качки з булгуром» - 38 г, а найменша кількість - в консервах: «Каша гречана зі свининою» - 22 г і «Каша гречана з куркою та овочами» - 24,5 г. В м'ясо-рослинних консервах «М'ясо копчене з горохом» високий вміст білка забезпечується значною кількістю білка в копченому м'ясі яловичини – 23 г на 100 г [22] і в горосі – 20-35 г на 100 г зерна [23].

Вдале поєднання гречаної крупи, курячого м'яса та овочів у консерві «Каша гречана з куркою та овочами», забезпечує раціон споживачів з проблемами травлення, хворобами шлунку та кишечника. Гречана крупа і куряче м'ясо – належать до дієтичних продуктів харчування. Також, в одиниці продукту в достатній кількості містяться жири й вуглеводи – 42 г і 35 г, відповідно.

Безперечно, важливою властивістю м'ясо-рослинних консервів виробництва ТОВ «Фабрика Здорово»: «Каша гречана з куркою та овочами», «Гостра квасоля з м'ясом «Чилі Кон Карне», «Плов з м'яса качки та булгуру» – є відсутність в них холестерину, що позитивно впливає на серцево-судинну систему споживачів. Вміст солі в продукції не перевищує допустиму норму для м'ясо-рослинних консервів і знаходиться в межах 2,2 – 6,2 г.

Рослинна сировина у складі м'ясо-рослинних консервів виробництва ТОВ «Фабрики Здорово» збагачує цю продукцію мінеральними речовинами та вітамінами. Хімічний склад рослинної сировини, яку використовують у виробництві м'ясо-рослинних консервів ТОВ «Фабрики Здорово», наведено в таблиці 5 [24].

Таблиця 5 – Хімічний склад рослинної сировини, що використовується у м'ясо-рослинних консервах ТОВ «Фабрики Здорово»

Хімічний склад рослинної сировини	Найменування рослинних компонентів м'ясо-рослинних консервів			
	Морква	Квасоля	Горох	Цибуля
Макроеlementи, г/100 г				
Білки	1,3	8,9	5,0	1,4
Вуглеводи	9,3	23,7	14,0	10,4
Жири	0,5	1,7	0,4	0,2
Мінеральні речовини, мг				
Ca	27,0	27,0	89,0	31,0
Mg	38,0	70,0	88,0	14,0
Fe	0,70	2,1	7,0	0,80
Zn	0,0	1,1	2,44	0,85
K	200,0	355,0	731,0	175,0
Na	18,0	1,0	27,0	4,0
P	58,0	140,0	226,0	58
Вітаміни, мг				
A	9,0	0,0	2 мкг	0,0
C	5,0	0,0	0,5	10,0
E	0,63	0,9		0,2
B <sub>1</sub>	0,06	0,2	0,9	0,05
B <sub>2</sub>	0,07	0,1	0,18	0,02
B <sub>3</sub>	0,3	0,5		0,1
B <sub>6</sub>	0,1	0,1		0,1
B <sub>9</sub>	9,0 мкг	0,15		9,0 мкг
PP	1,0	2,1	7,2	0,2
H (біотин)	0,06 мкг	0,0	19,5 мкг	0,9 мкг



Присутність у складі м'ясо-рослинних консервів клітковини забезпечується вмістом бобових: гороху - «М'ясо копчене з горохом»; квасолі чорної - «Гостра квасоля з мясом «Чилі Кон Карне» та круп: гречаної - «Каша гречана зі свининою», «Каша гречана з куркою та овочами»; булгуру – «М'ясо качки з булгуром», «Плов з мяса качки та булгуру». Саме клітковина стимулює нормальну роботу шлунково-кишкової системи.

Досліджували органолептичні характеристики зразка м'ясо-рослинних консервів «Каша гречана зі свининою» за вимогами ДСТУ 4607:2006, вказаному у маркуванні продукції.

Оцінювання органолептичних характеристик м'ясо-рослинних консервів «Каша гречана зі свининою» проводили за таким алгоритмом:

1. Перевірка тари на відсутність розгерметизації, бомбажу, наявності підтікань, механічних ушкоджень, забруднень.

2. Перевірка відповідності інформації на маркуванні вимогам ДСТУ 4607:2006, розділ 8, п. 8.2, 8.3.

3. Оцінювання вмісту консервів:

- оцінювання зовнішнього виду і консистенції при відкриванні банки;

- оцінювання окремих складових консервів (каші гречаної і м'яса).

4. Оцінювання органолептичних показників після розігрівання продукту.

Консерви упаковані в металеву банку з кришкою типу Easy open. При перевірці було виявлено: тара чиста, без бомбажу, без механічних ушкоджень, підтікання, патьоків не виявлено, ключ на кришці не деформований, щільно закріплений.

Маркування консервів нанесено на паперову етикетку. У маркуванні була зазначена така інформація: назва і повна адреса підприємства-виробника, телефон; наявний товарний знак ТОВ «Фабрика Здорово»; адреса потужності виробництва; назва консервів; склад продукції у порядку переваги складників; маса нетто, г; умови зберігання; на кришці зазначено дату виготовлення і строк придатності до споживання (рис. 1); спосіб вживання; поживна цінність на 100 г продукту; штрихове кодування; позначення стандарту. Маркування консервів «Каша гречана зі свининою» повністю відповідає вимогам ДСТУ 4607:2006.



Рис. 1. Маркування на кришці консервів «Каша гречана зі свининою»

Після відкриття тари, оцінювали зовнішній вміст консервів: поверхня вкрита тонким шаром жиру світло-жовтого кольору, ядра крупи гречаної цілі, крупа добре проварена, розсипчаста, добре помітні шматочки моркви, смак ніжний, запах приємний без сторонніх запахів і присмаків (рис. 2).



*Рис. 2. Зовнішній вигляд каші гречаної зі зразка м'ясо-рослинних консервів*

Шматочки м'яса розподілені в каші рівномірно, при вийманні з каші не розпадаються, соковиті, не переварені, м'які, розмір в середньому 14-16 мм, колір світло-коричневий, без сторонніх запахів і присмаків (рис. 3).



*Рис. 3. Зовнішній вигляд шматочків м'яса зі зразка м'ясо-рослинних консервів*

У маркуванні зразка консервів зазначено спосіб вживання: «Перед вживанням слід розігріти». Після розігрівання, оцінювали стан вмісту консервів, смакові якості: жир під час нагрівання розтопився і став прозорим; з'явився яскраво виражений приємний запах спецій; каша розсипчаста, не збиралася у грудочки, не з'явилась в'язкість при розігріванні, смак приємний, властивий відвареній гречаній каші; м'ясо соковите, приємне на смак. Загальна дегустаційна оцінка м'ясо-рослинних консервів «Каша гречана зі свининою» – гармонійне поєднання смаку і запаху готового продукту, відсутність дефектів, неприємних запахів і присмаків, не властивих даному продукту.

Під час оцінювання органолептичних характеристик зразка м'ясо-рослинних консервів, встановили повну відповідність продукції вимогам ДСТУ 4607:2006. В таблиці 6 наведені характеристики органолептичних показників якості досліджуваного зразка м'ясо-рослинних консервів «Каша гречана зі свининою», виробництва ТОВ «Фабрика Здорово».

*Таблиця 6 – Характеристика органолептичних показників якості зразка м'ясо-рослинних консервів «Каша гречана зі свининою», виробництва ТОВ «Фабрика Здорово»*

Назва показника	Характеристика органолептичних показників консервів за ДСТУ 4607:2006	Характеристика зразка м'ясо-рослинних консервів «Каша гречана зі свининою»
Зовнішній вигляд і консистенція	Крупа добре проварена, розсипчаста або напівв'язкої консистенції, без грудочок, зі шматочками м'яса розміром сторін від 12 мм до 16 мм	Крупа добре проварена, розсипчаста, без грудочок. Шматочки м'яса цілі, розмір, у середньому – 14-16 мм.
Запах та смак	Властивий виду крупи з м'ясом, з ароматом прянощів, без сторонніх запаху і присмаку	Запах чистий, властивий відвареній гречаній крупі. Добре відчутний приємний запах прянощів. Сторонні запахи відсутні. Смак приємний, ніжний, відповідний смаку відвареної гречаної крупи й м'яса свинини. Сторонні присмаки відсутні.
Колір	Властивий виду крупи з м'ясом	Колір однорідний, світло-коричневий, притаманний відвареній гречаній крупі. Колір м'яса однорідний, світло-коричневий. Сторонні відтінки, зміна кольору на окремих ділянках продукту – відсутні.

**Висновки.** Проведені дослідження, підтверджують необхідність і актуальність подальшої розробки асортименту м'ясо-рослинних консервів для забезпечення повноцінного і збалансованого харчування тих споживачів, що знаходяться в екстремальних умовах (військові, прикордонники, цивільні, що знаходяться в зоні бойових дій, внутрішньо переміщені особи тощо). Не менш важливою залишається проблема відновлення проведення спільних досліджень провідними вітчизняними науковцями й фахівцями підприємств м'ясопереробної галузі з розробки нового, з високою харчовою цінністю, асортименту м'ясо-рослинних консервів.

#### Список використаних джерел

1. ДСТУ 4607:2006. Консерви м'ясо-рослинні. Каші з м'ясом. Загальні технічні умови. – Чинний від 01.07.2007]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2007. – 15 с.
2. ДСТУ 6043:2008. Консерви м'ясо-рослинні. Каші з м'ясом та субпродуктами птиці. Загальні технічні умови. – [Чинний від 01.01.2010]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2010. – 10 с.
3. Найкраще м'ясо. Нічого зайвого [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zdorovotm.com>.
4. Стеценко, Н. О. Розроблення рецептури м'ясо-рослинних консервів з покращеним вітамінно-мінеральним складом для харчування військовослужбовців / Н. О. Стеценко, Г. О. Сімахіна // International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. Special edition. – Дніпро-Варна, 2017. – Т. 1. – С. 162–167.
5. Пасічний, В. М. Перспективи використання грибів у виробництві м'ясних та м'ясо-рослинних консервів / В. М. Пасічний, О. Б. Жабіна, Ю. А. Ястреба // М'ясний бізнес. – 2009. – № 11 (84). – С. 32-33.
6. Ряполова, І. О. Досвід застосування культивованих грибів при виробництві м'ясо-рослинних консервів / І. О. Ряполова, С. Верешко, В. Радченко // Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. – 2021. – № 6. – С. 115-123.

7. Гащук, О. І. Удосконалення технології м'ясо-рослинних консервів з використанням бобових / О. І. Гащук // Наукові праці НУХТ. – 2019. – Том 25, № 6. – С. 219–226.
8. Бажай-Жежерун, С. А. Використання біоактивованого нуту для збагачення м'ясо-рослинних консервів / С. А. Бажай-Жежерун // Strategy of Quality in Industry and Education : Proceedings of the XVI International Conference. Varna, Bulgaria, 2021. – Р. 29–33.
9. Крижова, Ю. П. М'ясні консерви у профілактиці накопичення радіонуклідів : монографія / Ю. П. Крижова, В. Н. Корзун. – Київ : ЦП «Компринт», 2020. – 143 с.
10. Консерви м'ясо-рослинні для спеціального харчування: пат. 139233 Україна: МПК А23L 13/50. № u2019 06632; заявл. 13.06.2019; опубл. 26.12.2019, Бюл. № 24.
11. Консерви м'ясо-рослинні «Язик під французьким соусом»: пат. 16151 Україна: МПК А23В 4/00. № u200602489; заявл. 07.03.2006; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.
12. Консерви м'ясо-рослинні «Рагу по-мисливськи»: пат. 16155 Україна: МПК А23В 4/00. № u200602494; заявл. 07.03.2006; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.
13. Консерви м'ясо-рослинні «Телятина у грибному соусі»: пат. 16153 Україна: МПК А23В 4/00. № u200602491; заявл. 07.03.2006; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.
14. ДСТУ 4424:2005. М'ясна промисловість. Виробництво м'ясних продуктів. Терміни та визначення понять. – [Чинний від 01.01.2006]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2006. – 32 с.
15. Сирохман, І. В. Товарознавство продовольчих товарів : підручник / І. В. Сирохман. – Харків : Світ Книг, 2020. – С. 580–581.
16. Про норми харчування військовослужбовців Збройних Сил, інших військових формувань та Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації, поліцейських, осіб рядового, начальницького складу органів і підрозділів цивільного захисту [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України № 426 від 29.03.2002 (в редакції від 30.07.2024 № 863). – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/card/426-2002-%D0%BF>.
17. NATO standard AMedP-1.11 Requirements of individual operational rations for military USE [Electronic resource]. – 2019. – Accessed mode: NATO STANDARD AMedP-1.11 REQUIREMENTS OF INDIVIDUAL OPERATIONAL RATIONS FOR MILITARY USE.
18. Soletto-Diaz, I. A systematic review of the nutritional implications of military rations / Soletto-Diaz I., Blanco-Lizarazo C. // Journal Nutrition and Health. – 2019. – Jun, 25(2). – Pp. 153-161. DOI: 10.1177/0260106018820980.
19. Moody, S.M. Feeding the US Military: The Development of Military Rations / Moody, S.M. // Journal Handbook of Eating and Drinking. – 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-14504-0\_76.
20. Регламент ЄС № 1169/2011 від 25.10.2011. Про надання споживачам інформації про харчові продукти, яким вносяться зміни до Регламентів ЄС № 1924/2006 та (ЄС) № 1925/2006 Європейського парламенту та Ради та скасовуються Директива Комісії 87/250/ЄЕС, Директива Ради 90/90/496/ЄЕС, Директива Комісії 1999/10/ЄС, Директива 2000/13/ЄС Європейського Парламенту і Ради, Директив Комісії 2002/67/ЄС та 2008/5/ЄС та Регламент Комісії (ЄС) № 608/2004. – [Чинний від 13.12.2014].
21. Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів [Електронний ресурс] : Закон України № 2639-VIII ВР від 06.12.2018 (в редакції № 3193-IX від 23.11.2023). – Режим доступу: [https://zakononline.com.ua/documents/show/369768\\_\\_758461](https://zakononline.com.ua/documents/show/369768__758461).
22. Копчена яловичина – калорійність [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tablycjakalorijnosti.com.ua/stravy/kopchena-yalovychyna>.
23. Хімічний склад зерна гороху [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://agrosience.com.ua/plant/khimichniy-sklad-zerna-gorokhu#google\\_vignette](https://agrosience.com.ua/plant/khimichniy-sklad-zerna-gorokhu#google_vignette).
24. Товарознавство плодоовочевої продукції: навч. посібник / Л. М. Пузік, О. В. Куц, В. А. Бондаренко, С. О. Щербина. – Харків : ДБТУ, ІОБ НААН, 2022. – 370 с.

### References

1. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (2007). *Konservy miaso-roslynni. Kashi z miasom. Zahalni tekhnichni umovy [Canned meat and vegetables. Porridge with meat. General technical conditions]* (DSTU 4607:2006).
2. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (2010). *Konservy miaso-roslynni. Kashi z miasom ta subproduktamy ptytsi. Zahalni tekhnichni umovy [Canned meat and vegetables. Porridge with meat and poultry offal. General technical conditions]* (DSTU 6043:2008).

3. Naikrashche miaso. Nichoho zaivoho [The best meat. Nothing extra]. (n.d.). <https://zdorovotm.com>.
4. Stetsenko, N.O., Simakhina, H.O. (2017). Rozroblennia retseptury miaso-roslynykh konserviv z pokrashchenym vitaminno-mineralnym skladom dlia kharchuvannia viiskovosluzhbovtiv [Development of a recipe for canned meat and vegetables with an improved vitamin and mineral composition for the nutrition of military personnel]. *International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. Special edition – International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. Special edition, 1*, 162–167.
5. Pasichnyi, V.M., Zhabina, O.B., Yastreba, Yu.A. (2009). Perspektyvy vykorystannia hrybiv u vyrobnytstvi miasnykh ta miaso-roslynykh konserviv [Prospects for the use of mushrooms in the production of meat and meat-vegetable preserves]. *Miasnyi biznes – Meat business*, (11(84)), 32–33.
6. Riapolova, I.O., Vereshko, S., Radchenko, V. (2021). Dosvid zastosuvannia kultyvovanykh hrybiv pry vyrobnytstvi miaso-roslynykh konserviv [Experience in the use of cultivated mushrooms in the production of canned meat and vegetables]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky – Tavrii Scientific Bulletin. Series: Technical sciences*, (6), 115–123.
7. Hashchuk O. I. (2019). Udoskonalennia tekhnolohii miaso-roslynykh konserviv z vykorystanniam bobovykh [Improvement of the technology of canned meat and vegetables using legumes]. *Naukovi pratsi NUKhT – Scientific works of the National Technical University of Ukraine*, 25(6), 219–226.
8. Bazhai-Zhezherun, S.A. (2021). Vykorystannia bioaktyvovanoho nutu dlia zbahachennia miaso-roslynykh konserviv [The use of bioactivated chickpeas for the enrichment of canned meat and vegetables]. *Strategy of Quality in Industry and Education : Proceedings of the XVI International Conference* (pp. 29 – 33). Varna, Bulgaria.
9. Kryzhova, Yu.P., Korzun, V.N. (2020). *Miasni konservy u profilaktytsi nakopychennia radionuklidiv [Canned meat in the prevention of accumulation of radionuclides]*. TsP «Komprynt».
10. *Konservy miaso-roslynni dlia spetsialnogo kharchuvannia [Canned meat and vegetables for special nutrition]* (Patent of Ukraine № MPK A23L 13/50). (2019).
11. *Konservy miaso-roslynni «lazyk pid frantsuzkym sousom» [Canned meat and vegetables "Tongue with French sauce"]* (Patent of Ukraine 16151 Ukraina: MPK A23B 4/00). (2006).
12. *Konservy miaso-roslynni «Rahu pomyslyvsky» [Canned meat and vegetables "Hunter's Stew"]* (Patent of Ukraine MPK A23B 4/00. № u200602494). (2006).
13. *Konservy miaso-roslynni «Teliatyna u hrybnomu sousi» [Canned meat and vegetables "Veal in mushroom sauce"]* (Patent of Ukraine MPK A23B 4/00. № u200602491). (2006).
14. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (2006). *Miasna promyslovist. Vyrobnytstvo miasnykh produktiv. Terminy ta vyznachennia poniat [Meat industry. Production of meat products. Terms and definitions]*. (DSTU 4424:2005).
15. Syrokhman, I.V. (2020). *Tovaroznavstvo prodovolchyykh tovariv [Merchandising of food products]*. Svit Knyh.
16. Pro normy kharchuvannia viiskovosluzhbovtiv Zbroinykh Syl, inshykh viiskovykh formuvan ta Derzhavnoi sluzhby spetsialnogo zviazku ta zakhystu informatsii, politseiskykh, osib riadovoho, nachalnytskoho skladu orhaniv i pidrozdiliv tsyvilnogo zakhystu [On the nutrition standards of servicemen of the Armed Forces, other military formations and the State Service for Special Communications and Information Protection, police officers, members of the rank and file, senior members of civil defense bodies and units], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 426 (29.03.2002). <http://zakon.rada.gov.ua/laws/card/426-2002-%D0%BF>.
17. NATO standard AMedP-1.11 Requirements of individual operational rations for military USE. (2019). NATO STANDARD AMedP-1.11 REQUIREMENTS OF INDIVIDUAL OPERATIONAL RATIONS FOR MILITARY USE.
18. Soleto-Diaz, I., Blanco-Lizarazo, C. (2019). A systematic review of the nutritional implications of military rations. *Journal Nutrition and Health*, 25(2), 153-161. DOI: 10.1177/0260106018820980.
19. Moody, S.M. (2020). Feeding the US Military: The Development of Military Rations. *Journal Handbook of Eating and Drinking*. DOI: 10.1007/978-3-030-14504-0\_76.
20. Rehlament YeS № 1169/2011 vid 25.10.2011. Pro nadannia spozhyvacham informatsii pro kharchovi produkty, yakym vnosiatsia zminy do Rehlamentiv YeS № 1924/2006 ta (IeS) № 1925/2006 Yevropeiskoho parlamentu ta Rady ta skasovuiutsia Dyrektyva Komisii 87/250/IeES, Dyrektyva Rady 90/90/496/IeES, Dyrektyva Komisii 1999/10/IeS, Dyrektyva 2000/13/IeS Yevropeiskoho Parlamentu i Rady, Dyrektyv Komisii 2002/67/IeS ta 2008/5/IeS ta Rehlament Komisii (IeS) № 608/2004 [EU

Regulation No. 1169/2011 of October 25, 2011. On the provision of information to consumers about food products, amending Regulations EU No. 1924/2006 and (EC) No. 1925/2006 of the European Parliament and the Council and repealing Commission Directive 87/250/EEC, Council Directive 90/90/496/EEC, Commission Directive 1999/10/EC, Directive 2000/13/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Directives 2002/67/EC and 2008/5/EC and Commission Regulation (EC) No. 608/2004.

21. On information for consumers regarding food products [On information for consumers regarding food products], Law of Ukraine № 2639-VIII VR (06.12.2018). [https://zakononline.com.ua/documents/show/369768\\_\\_758461](https://zakononline.com.ua/documents/show/369768__758461).

22. Kopchena yalovychyna – kaloriynist [Smoked beef - calorie content]. (n.d.). <https://www.tablycjakalorijnosti.com.ua/stravy/kopchena-yalovychyna>.

23. Khimichnyy sklad zerna horokhu [Chemical composition of pea grain]. [https://agrosience.com.ua/plant/khimichnyi-sklad-zerna-gorokhu#google\\_vignette](https://agrosience.com.ua/plant/khimichnyi-sklad-zerna-gorokhu#google_vignette).

24. Puzik, L.M., Kuts, O.V., Bondarenko, V.A., Shcherbyna, S.O. (2022). *Tovarovnavstvo plodoovochevoi produktsii [Commodity science of fruit and vegetable products]*. DBTU, IOB NAAN.

Отримано 21.09.2024

UDC 658.628:[664.8+664.9]

**Olena Khrebtan**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Food Technology and Ecology  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [olenaborisovnahrebtan@gmail.com](mailto:olenaborisovnahrebtan@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-7561-6318>

ResearcherID: KQU-9294-2024

## STUDY OF THE RANGE OF CANNED MEAT AND VEGETABLES MANUFACTURED BY FABRYKA ZDOROVO LLC, CHERNIHIV

*Among the many ways of preserving meat products, canning remains the most reliable, in which the safety and quality of products is ensured by the use of heat treatment - sterilization and its storage in airtight packaging.*

*The analysis of research and publications on expanding the assortment of canned meat and vegetables showed that although scientific and research works are being carried out in this direction, they are not enough to meet the needs of consumers, especially a certain contingent (military, border guards, persons in extreme conditions).*

*The purpose of the article is to research the assortment, production technology and quality of canned meat and vegetables produced by "Fabryka Zdorovo" LLC, Chernihiv.*

*The modern range, production technology and quality of canned meat and vegetables produced by the enterprise were studied. The chemical composition and nutritional value of the studied assortment of canned food were analyzed. It was determined that all types of canned meat and vegetables produced by "Fabryka Zdorovo" LLC had a high nutritional value due to the combination of animal and vegetable proteins, enrichment of products with microelements, minerals and vitamins present in plant raw materials. The article presents the results of evaluating the organoleptic quality indicators of a sample of canned meat and vegetables manufactured by "Fabryka Zdorovo" LLC "Buckwheat Porridge with Pork" and determines their compliance with the requirements of the regulatory document indicated on the labeling of canned food - DSTU 4607:2006 "Canned Meat vegetable Porridge with meat. General technical conditions". It was established that the studied sample of canned meat and vegetables fully meets the requirements of the standard in terms of organoleptic indicators.*

*Canned products must provide a complete and balanced diet for consumers. That is why the most important task of industrial enterprises and scientists working on the development of innovative canned meat and vegetable products is the creation of products of increased nutritional value, with the content of useful and nutritious substances.*

**Keywords:** meat preservation technology; raw meat; vegetable raw materials; range, nutritional value, quality of canned meat and vegetables; rational military nutrition, organoleptic quality indicators

Table: 6. Fig.: 3. References: 24.

## РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-3(37)-196-207

УДК 621.314

**Володимир Вікторович Казимир<sup>1</sup>, Анатолій Леонідович Приступа<sup>2</sup>,  
Євгеній Миколайович Ятченко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [vvkazymyr@gmail.com](mailto:vvkazymyr@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8163-1119>. ResearcherID: Q-2925-2016

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

Email: [anatoliy.prystupa@stu.cn.ua](mailto:anatoliy.prystupa@stu.cn.ua). ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9412-2698>

ResearcherID: F-5507-2014. SCOPUS Author ID: [57190807222](https://orcid.org/57190807222)

<sup>3</sup>аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [yevhenii.yatchenko@gmail.com](mailto:yevhenii.yatchenko@gmail.com). ORCID: 0009-0000-5900-0572

Scopus author ID [59273801700](https://orcid.org/59273801700)

### ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ НЕЛІНІЙНОЮ ДИНАМІЧНОЮ СИСТЕМОЮ

У роботі описано методику отримання закону управління нелінійною динамічною системою шляхом лінеаризації даної системи навколо точки рівноваги. Розписано етапи розробки оптимального керування нелінійною динамічною системою на прикладі перетворювача Кука з використання пакета MathLab: отримання математичної моделі перетворювача; отримання параметрів точки рівноваги нелінійної системи за допомогою пропорційно-інтегрального-диференціального (ПІД) регулятора; лінеаризація математичної моделі навколо точки рівноваги; вирішення задачі квадратичного регулятора та отримання закону управління відстеження для лінеаризованої моделі; керування нелінійною динамічною системою за допомогою закону управління, розробленого для лінеаризованої системи.

**Ключові слова:** моделювання; системи керування; рівняння Гамільтона-Якобі; оптимальне керування; апроксимація; нелінійна система, лінеаризація.

Рис.: 8. Бібл.: 16.

**Актуальність дослідження.** Розробка сучасних технологій, особливо в енергетичній сфері та робототехніці потребує вдосконалення систем керування. Україно-російська війна поставила перед розробниками безпілотних літальних апаратів (БПЛА), наземних, надводних та підводних роботизованих технічних засобів багато задач, пов'язаних з удосконаленням систем їх керування у зв'язку з варіативністю та високою динамікою режимів їх функціонування.

**Постановка проблеми.** Основною проблемою отримання закону управління для нелінійної динамічної системи є те, що система нелінійних диференціальних рівнянь, яка описує будь-яку нелінійну систему, не має загального розв'язку, а має його лише після деяких спрощень і допущень в системі [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основні підходи до керування нелінійними системами включають такі методи, як:

- робастне керування, яке орієнтоване на створення системи керування для нелінійних електричних систем, де вплив змінних зовнішніх факторів був мінімізований [6-8];
- метод нелінійного прогнозованого керування (Model Predictive Control) використовується для нелінійних систем, де алгоритми прогнозують поведінку системи та коригують дії залежно від очікуваних значень. Цей метод є особливо корисним для складних систем з обмеженнями на змінні стану та вхідні сигнали [9-11];



– адаптивне керування: підходи адаптивного керування дозволяють системі самостійно підлаштовувати параметри в режимі реального часу відповідно до змінних умов роботи [12-13];

– керування на основі штучного інтелекту з використанням глибоких нейронних мереж для контролю та оптимізації поведінки автономних роботизованих технічних засобів у динамічних умовах [14-15].

Попри широке застосування в роботизованих системах зазначені методи є складними в проєктуванні та реалізації, потребують чітко визначених детальних вихідних даних для налаштування.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Простішим та дешевшим у реалізації методом є метод зворотного зв'язку за лінійними наближеннями, який базується на спробі лінеаризації нелінійної системи в певній точці [16]. Точність керування нелінійних систем значною мірою залежить від повноти врахування нелінійностей при лінеаризації моделі навколо точки рівноваги.

Дана стаття показує приклад отримання закону управління нелінійною динамічною системою шляхом лінеаризації цієї системи навколо точки рівноваги з подальшим вирішенням задачі лінійно-квадратичного регулятора з використанням програмного комплексу MathLab. Рішення отримані за даною методикою можуть бути використані при розробці систем управління БПЛА, наземних, надводних та підводних роботизованих технічних засобів.

**Метою цієї статті** є розробити методику отримання закону управління нелінійною динамічною системою з використанням пакета MathLab.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо алгоритм розробки системи управління на прикладі перетворювача Кука [2], електрична схема якого представлена на рис. 1.

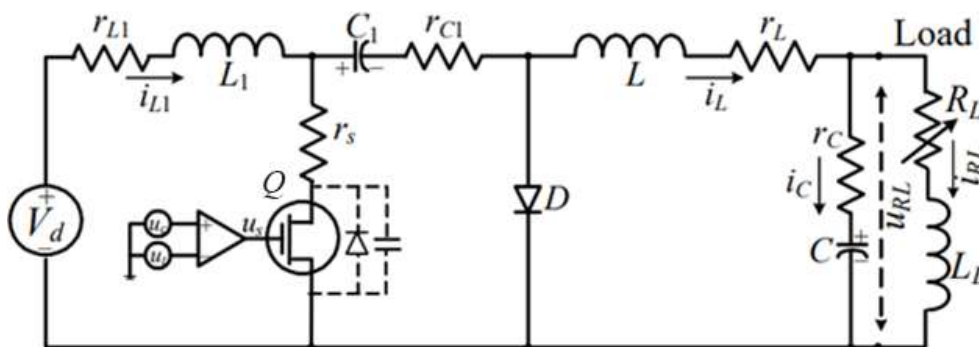


Рис. 1. Схема електрична принципова перетворювача Кука

Відповідно до [3], принцип дії схеми такий: коли ключ  $Q$  закритий, діод  $D$  відкрито і ємність  $C_1$  заряджається струмом, який протікає через індуктивність  $L_1$ . Коли ключ  $Q$  відкритий, струм через індуктивність  $L_1$  росте; діод  $D$  закрито напругою конденсатора  $C_1$ ; конденсатор  $C_1$  розряджається і віддає енергію через контур, сформований  $C_1$ ,  $C$ , навантаженням схеми  $R_L L_L$  та індуктивністю  $L$ . Коли ключ  $Q$  закривається, ємність  $C_1$  заряджається заново, у той час як індуктивність  $L$  віддає енергію навантаженню схеми. Діод і транзистор *перемикається* одночасно. Конденсатор  $C_1$  – ключовий елемент для передачі енергії від джерела  $V_d$  до навантаження.

Щоб отримати математичну модель перетворювача, запишемо систему диференціальних рівнянь Кірхгофа для двох випадків – коли ключ  $Q$  закритий і коли він відкритий.



Використовуючи концепцію усереднення, система результируючих нелінійних диференціальних рівнянь має вигляд

$$\begin{cases} \frac{du_{C1}}{dt} = \frac{1}{C_1}(i_{L1} - i_{L1}d_D + i_Ld_D), \\ \frac{du_C}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - i_{RL}), \\ \frac{di_{L1}}{dt} = \frac{1}{L_1}[-u_{C1} - (r_{L1} + r_{C1})i_{L1} + u_{C1}d_D + (r_{C1} - r_s)i_{L1}d_D + r_s i_L d_D + V_d], \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}[-u_C - (r_L + r_C)i_L + r_C i_{RL} - u_{C1}d_D + r_s i_{L1}d_D - (r_{C1} + r_s)i_L d_D], \\ \frac{di_{RL}}{dt} = \frac{1}{L_L}[u_C + r_C i_L - (r_C + R_L)i_{RL}]. \end{cases} \quad (1)$$

У цій системі нелінійних диференціальних рівнянь  $d_D = 1$  репрезентує закритий ключ  $Q$ , а  $d_D = 0$  – відповідно відкритий ключ  $Q$ . Для подальшого аналізу схеми задаємо значення її параметрів, які відповідають джерелам живлення БПЛА.

$$r_s = 0,01 \text{ Ом}; r_L = 0,093 \text{ Ом}; r_{L1} = 0,1 \text{ Ом}; r_C = 0,065 \text{ Ом}; r_{C1} = 0,07 \text{ Ом}; C_1 = 10^{-7} \text{ Ф}; \\ C = 10^{-7} \text{ Ф}; L = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}; L_1 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}; L_L = 0,0001 \text{ Гн}; R_L = 20 \text{ Ом}; V_d = -30 \text{ В}.$$

**Первинний аналіз отриманої нелінійної динамічної системи.**

MATLAB/SIMULINK модель для системи (1) зображена на рис. 2.



Рис. 2. MATLAB/SIMULINK модель нелінійного перетворювача Кука

Для заданої функції керування

$$u(t) = \begin{cases} 0,5, & 0 \leq t < 0,0033 \text{ sec}; \\ 0,25, & 0,0033 \leq t < 0,0066 \text{ sec}; \\ 0,75, & 0,0066 \leq t < 0,01 \text{ sec}. \end{cases}$$

У результаті моделювання отримано графічні залежності, що ілюструють динаміку струмів та напруг на елементах схеми:

$$u_{C1}(t), u_C(t), V_d(t), [\text{В}] \quad i_{L1}(t), i_L(t), i_{RL}(t), [\text{А}] \quad u(t), [\text{В.о.}]$$

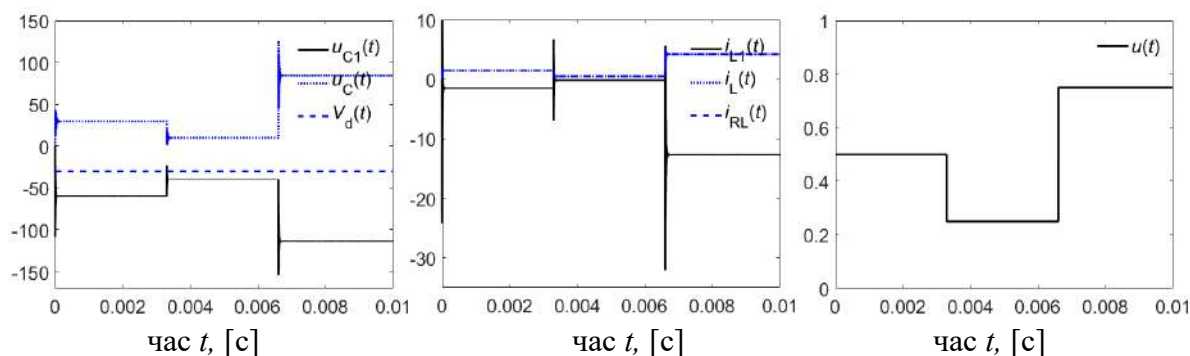


Рис. 3. Зміна напруг  $u_{C1}(t)$ ,  $u_C(t)$  та струмів  $i_{L1}(t)$ ,  $i_L(t)$ ,  $i_{RL}(t)$  на елементах схеми відповідно до функції керування  $u(t)$

Як видно з отриманих графіків, система характеризується значними перерегулюваннями при перехідних процесах, викликаних стрибкоподібною зміною функції керування, що може негативно відобразитись на стійкості системи. Отже, варто розв'язати задачу оптимізації законів керування для цієї системи. Оптимізація може бути здійснена по багатьох параметрах. У цій статті розглянемо випадок оптимізації системи для забезпечення стабілізації напруги. При цьому розглянемо один із найбільш популярних засобів – використання ПД регулятора.

**Лінеаризація моделі навколо точки рівноваги.**

Для розробки оптимального алгоритму управління проведемо лінеаризацію нашої нелінійної системи. Лінеаризація — це процес апроксимації нелінійної системи та отримання аналогічної лінійної системи, яка поводить себе так само, як первинна нелінійна система навколо певної робочої точки, зазвичай точки рівноваги. Одним із методів, який використовується для лінеаризації нелінійних динамічних систем, є метод Якобі.

Спершу отримаємо значення напруг, струмів та функції керування для точки рівноваги, яка відповідає стану системи, коли всі перехідні процеси у схемі вже завершенні.

Представимо систему нелінійних диференціальних рівнянь (1), яка описує досліджуваній перетворювач, у матричній формі. Матричне представлення нелінійної системи дозволить нам використати функцію jacobian() математичного пакета MATLAB для отримання для отримання лінеаризованої системи навколо точки рівноваги.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{u}_{C1}(t) \\ \dot{u}_C(t) \\ \dot{i}_{L1}(t) \\ \dot{i}_L(t) \\ \dot{i}_{RL}(t) \end{bmatrix} = A \cdot x + B \cdot u + G[x, u] + V, \tag{2}$$

- де  $A$  і  $B$  – матриці лінійної складової системи;
- $G$  – матриця нелінійної складової системи;
- $V$  – матриця постійної складової системи;
- $u$  – закон управління системою;
- $x$  – вектор стану нелінійної динамічної системи.

Із системи рівнянь (1), ми можемо отримати матриці  $A$ ,  $B$ ,  $G$ ,  $V$  та  $x$ , які для досліджуваної системи мають вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L_1} & 0 & \frac{-(r_{L1}+r_{C1})}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} & 0 & \frac{-(r_L+r_C)}{L} & \frac{r_C}{L} \\ 0 & \frac{1}{L_L} & 0 & \frac{r_C}{L_L} & \frac{-(r_C+R_L)}{L_L} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad G[x, u] = \begin{bmatrix} \frac{-i_{L1}+i_L}{C_1} \\ 0 \\ \frac{u_{C1}+(r_{C1}-r_s)*i_{L1}+r_s*i_L}{L_1} \\ \frac{-u_{C1}+r_s*i_{L1}-(r_{C1}+r_s)*i_L}{L} \\ 0 \end{bmatrix} * u; \quad V = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} Vd; \quad x = \begin{bmatrix} u_{C1} \\ u_C \\ i_{L1} \\ i_L \\ i_{RL} \end{bmatrix},$$

де  $C_1$  та  $C$  – значення ємностей конденсаторів схеми рис. 1;

$L_1, L$  та  $L_L$  – значення індуктивностей;

$r_{L1}, r_{C1}, r_L, R_L, r_s$  – еквівалентні значення активних опорів елементів схеми рис. 1;

$u_{C1}, u_C, i_{L1}, i_L, i_{RL}$  – функції, що описують динаміку напруг і струмів нелінійної системи, що лінеаризується.

Маючи нелінійну динамічну систему е вигляді системи нелінійних диференційних рівнянь (1), та її запис в матричному вигляді, отримаємо лінеаризовану систему за допомогою часткових похідних Якобі [4] використовуючи вбудовану в MATLAB функцію `jacobian()`.

Представимо MATLAB код отримання матриць Якобі за допомогу вбудованої MATLAB функції – `jacobian()`:

```
syms uc1 uc il1 il irl dd;
syms rs rl rL1 rc rc1 C C1 L L1;
syms RL LL Vd
A = [0, 0, 1/C1, 0, 0;
     0, 0, 0, 1/C, -1/C;
     -1/L1, 0, -(rL1+rc1)/L1, 0, 0;
     0, -1/L, 0, -(rL+rc)/L, rc/L;
     0, 1/LL, 0, rc/LL, -(rc+RL)/LL;];
B = [0;0;0;0;0];
G = [(-il1+il)/C1;
     0;
     (uc1+(rc1-rs)*il1+rs*il)/L1;
     (-uc1+rs*il1-(rc1+rs)*il)/L;
     0;] * dd;
V = [0;0;Vd/L1;0;0];
```

```
states = [uc1 uc il1 il irl];
f = A * [uc1; uc; il1; il; irl] + B * dd + G + V;
A_jacobian = jacobian(f, states);
B_jacobian = jacobian(f, dd);
```

Представимо MATLAB код отримання матриць Якобі за допомогу отримання часткових похідних:

```
syms uc1 uc il1 il irl dd;
syms rs rl rl1 rc rc1 C C1 L L1;
syms RL LL Vd
syms x1 x2 x3 x4 x5;
syms dx1 dx2 dx3 dx4 dx5;
%% declare matrixes
A = [0, 0, 1/C1, 0, 0;
     0, 0, 0, 1/C, -1/C;
     -1/L1, 0, -(rl1+rc1)/L1, 0, 0;
     0, -1/L, 0, -(rl+rc)/L, rc/L;
     0, 1/LL, 0, rc/LL, -(rc+RL)/LL];
B = [0;0;0;0;0];
G = [(-il1+il)/C1;
     0;
     (uc1+(rc1-rs)*il1+rs*il)/L1;
     (-uc1+rs*il1-(rc1+rs)*il)/L;
     0] * dd;
V = [0;0;Vd/L1;0;0];
%% Go back to equations from matrixes.
f = A * [uc1; uc; il1; il; irl] + B * dd + G + V;
x1=uc1; x2=uc; x3=il1; x4=il; x5=irl;
dx1=subs(f(1)); dx2=subs(f(2)); dx3=subs(f(3)); dx4=subs(f(4)); dx5=subs(f(5));
%% Calculate partial derivatives
Ja=[diff(dx1,x1) diff(dx1, x2) diff(dx1, x3) diff(dx1, x4) diff(dx1, x5);
    diff(dx2,x1) diff(dx2, x2) diff(dx2, x3) diff(dx2, x4) diff(dx2, x5);
    diff(dx3,x1) diff(dx3, x2) diff(dx3, x3) diff(dx3, x4) diff(dx3, x5);
    diff(dx4,x1) diff(dx4, x2) diff(dx4, x3) diff(dx4, x4) diff(dx4, x5);
    diff(dx5,x1) diff(dx5, x2) diff(dx5, x3) diff(dx5, x4) diff(dx5, x5)];
Jb = [diff(dx1,dd); diff(dx2,dd); diff(dx3,dd); diff(dx4,dd); diff(dx5,dd)];
```

Результати розрахунку матриць Якобі отриманої лінійної системи представлено нижче

$$A_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1-dd}{C_1} & \frac{dd}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} \\ \frac{dd-1}{L_1} & 0 & \frac{dd \cdot (r_{c1} - r_s) - (r_{l1} + r_{c1})}{L_1} & \frac{rs \cdot dd}{L_1} & 0 \\ -\frac{dd}{L} & -\frac{1}{L} & \frac{r_s \cdot dd}{L} & \frac{-(r_L + r_C) - dd \cdot (r_{c1} + r_s)}{L} & \frac{r_C}{L} \\ 0 & \frac{1}{L_L} & 0 & \frac{r_C}{L_L} & \frac{-(r_C + R_L)}{L_L} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$B_J = \begin{bmatrix} \frac{i_L - i_{L1}}{C_1} \\ 0 \\ \frac{u_{C1} + i_L \cdot r_s + i_{L1} \cdot (r_{C1} - r_s)}{L_1} \\ \frac{-u_{C1-iL} \cdot (r_{C1} + r_s) + i_{L1} \cdot r_s}{L} \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{4}$$

де  $u_{C1}, u_C, i_{L1}, i_L, i_{RL}$  та  $dd$  – значення режимних параметрів, які описують точку рівноваги нелінійної системи, навколо якої було виконано лінеаризацію.

Враховуючи (3) і (4) математична модель лінеаризованої системи матиме вигляд

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} u_{C1}(t) \\ \dot{u}_C(t) \\ i_{L1}(t) \\ \dot{i}_L(t) \\ i_{RL}(t) \end{bmatrix} = A_J \cdot x + B_J \cdot u, \tag{5}$$

де  $A_J$  та  $B_J$  – відповідні матриці коефіцієнтів Якобі;

$x$  – вектор стану лінійної динамічної системи;

$u$  – закон управління системою.

**Моделювання лінеаризованої системи.** На основі системи лінійних диференціальних рівнянь (5), будемо MATLAB SIMULINK модель та проводимо її моделювання.

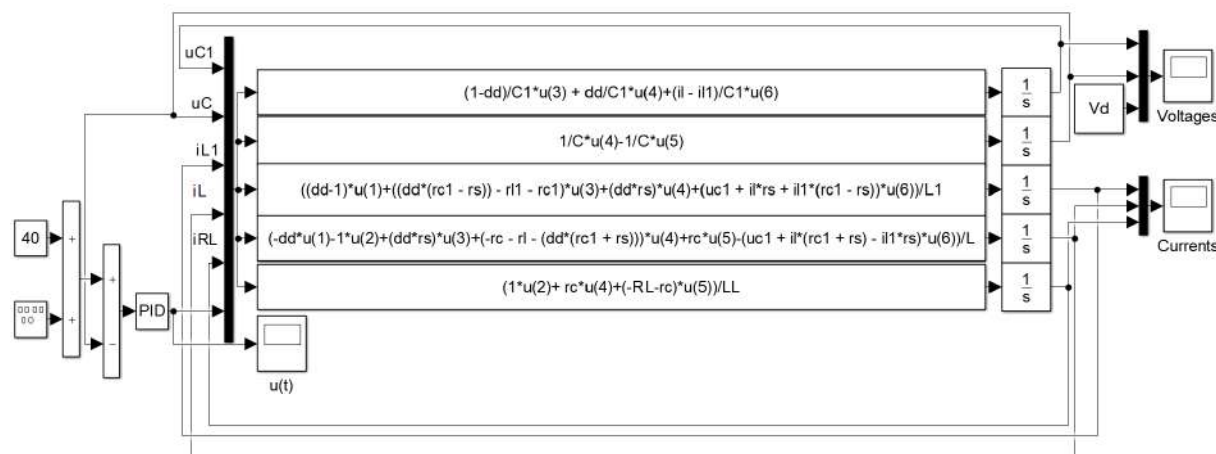


Рис. 4. MATLAB/SIMULINK модель лінеаризованого перетворювача Кука з ПІД регулятором

Результати моделювання лінійної системи наведено на рис. 5.

$$u_{C1}(t), u_C(t), V_d(t), [B] \quad i_{L1}(t), i_L(t), i_{RL}(t), [A] \quad u(t), [B.O.]$$

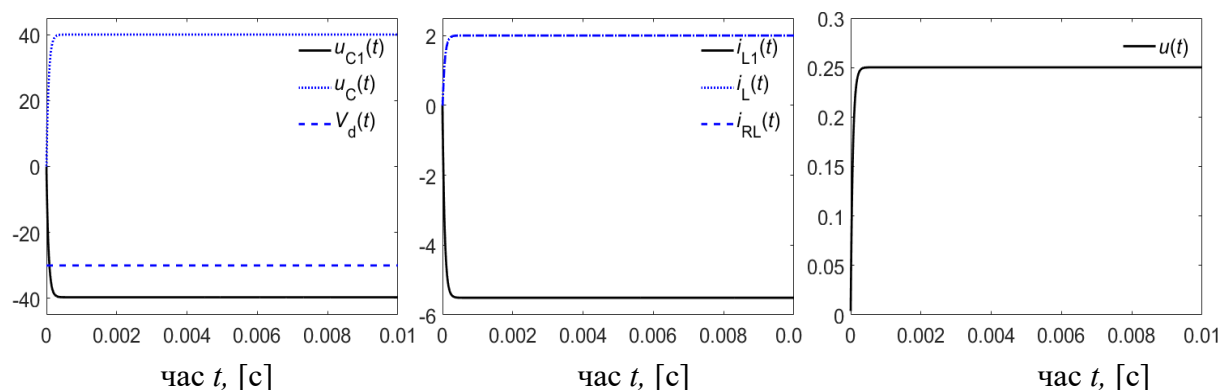


Рис. 5. Зміна напруг  $u_{C1}(t), u_C(t)$ , струмів  $i_{L1}(t), i_L(t), i_{RL}(t)$  і функції керування  $u(t)$  лінеаризованого перетворювача Кука, керованого ПІД регулятором

З аналізу результатів моделювання видно, що напруга на виході перетворювача стабілізована на рівні 40 В, пульсації відсутні, що свідчить про досягнення цілей щодо задачі керування.

**Синтез закону керування за допомогою лінійно-квадратичного регулятора.**

Задача синтезу лінійно-квадратичного регулятора (ЛКР) є фундаментальною концепцією в теорії оптимального керування для лінійних систем. Він призначений для обчислення оптимальних входів керування (синтезу закону управління) для досягнення системою бажаного стану з мінімізацією функції витрат. У нашому випадку розглянемо розширену систему (5), задавши як контрольовану функцію  $u_C(t)$  – напругу на конденсаторі С (рис. 1).

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_J x + B_J u \\ y(t) = Hx \end{cases}, \tag{6}$$

де перший вираз – система (5),

другий вираз описує, який саме вихід системи (5) є важливим для розглянутого перетворювача.

Оскільки при синтезі закону керування нас у цьому випадку цікавить тільки напруга  $u_C(t)$ , то матриця  $H$  матиме вигляд

$$H = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Відповідно до [5], щоб аналітично синтезувати закон управління відстеження, необхідно врахувати динаміки помилки стану ( $\dot{x}_e(t)$ ) та відстеження ( $\dot{e}(t)$ ).

$$\begin{aligned} \dot{x}_e(t) &= r - y = r - Hx = r - u_C; \\ \dot{e}(t) &= -e + \dot{r} - \dot{y} = -e + \dot{r} - \frac{1}{C} i_L + \frac{1}{C} i_{RL}; \end{aligned}$$

Розширимо лінійну модель (5) отриманими рівняннями опису помилок

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{x}_e(t) \\ e(t) \end{bmatrix} = A \cdot x + A_r \cdot r + B \cdot u, \tag{7}$$

де  $A, A_r, r$  та  $B$  – матриці коефіцієнтів рівняння Якобі, які наведено нижче;  $x$  – вектор стану лінійної динамічної системи, який також описує помилки стану та відстеження;  $u$  – закон управління системою.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1-dd}{C_1} & \frac{dd}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & 0 & 0 \\ \frac{dd-1}{L_1} & 0 & \frac{dd*(r_{C1}-r_s)-(r_{L1}+r_{C1})}{L_1} & \frac{r_s*dd}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{dd}{L} & -\frac{1}{L} & \frac{r_s*dd}{L} & \frac{-(r_L+r_C)-dd*(r_{C1}+r_s)}{L} & \frac{r_C}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_L} & 0 & \frac{r_C}{L_L} & \frac{-(r_C+R_L)}{L_L} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C} & \frac{1}{C} & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} u_{C1} \\ u_C \\ i_{L1} \\ i_L \\ i_{RL} \\ x_e \\ e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_r \mathbf{r} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \dot{r} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{i_L - i_{L1}}{C_1} \\ 0 \\ \frac{u_{C1} + i_L * r_s + i_{L1} * (r_{C1} - r_s)}{L_1} \\ \frac{-u_{C1} - i_L * (r_{C1} + r_s) + i_{L1} * r_s}{L} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

Рівняння (13) описує лінеаризовану модель перетворювача Кука, яка враховує помилки стану та відстеження.

Маючи описану лінеаризовану динамічну систему, можемо скористатись відомим результатом синтезу лінійно-квадратичного регулятора:

$$u = -G^{-1} B^T K x,$$

де  $G$  – матриця коефіцієнтів, яка враховує вагу керуючого сигналу;

$K$  – рішення алгебраїчного рівняння Ріккати.

$$Q + A^T K + K A - K B G^{-1} B^T K = 0,$$

де  $Q$  – діагональна матриця, що враховує вагу кожної змінної простору стану.

Рішення рівняння Ріккати легко знайти за допомогою функції `lqr()` математичного пакета MATLAB.

Ілюстрація результатів синтезу закону керування для досліджуваної схеми представлено на рис. 6-8.

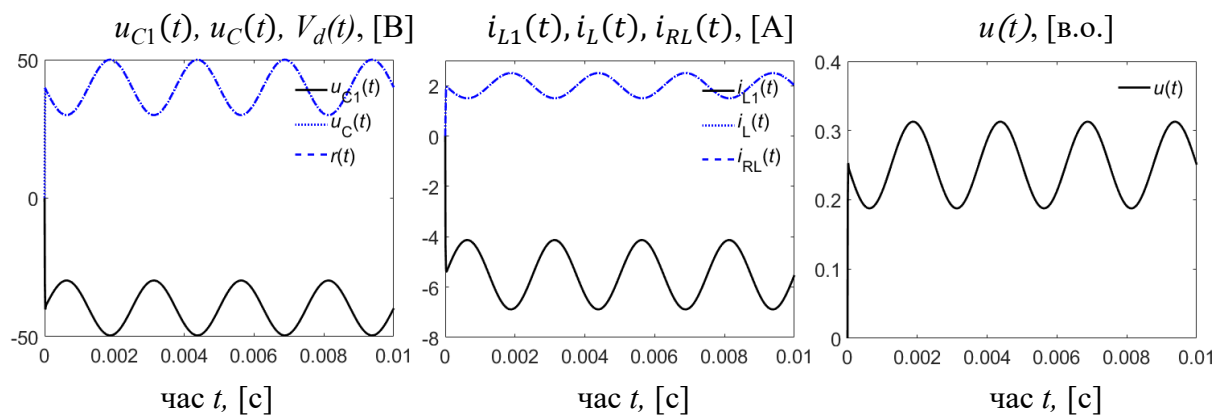


Рис. 6. Зміна напруг  $u_{C1}(t), u_C(t)$ , струмів  $i_{L1}(t), i_L(t), i_{RL}(t)$  на елементах схеми відповідно до функції керування  $u(t)$ , що має синусоїдальну форму.

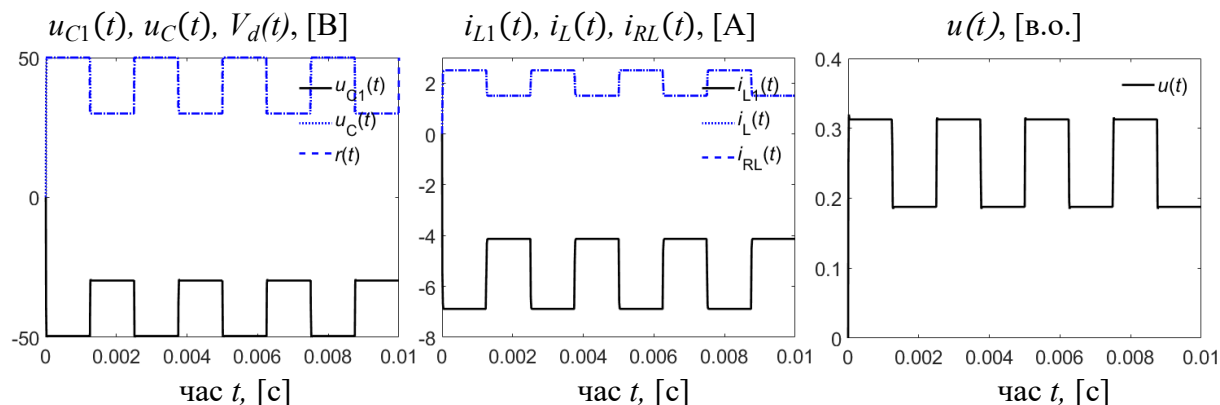


Рис. 7. Зміна напруг  $u_{C1}(t), u_C(t)$ , струмів  $i_{L1}(t), i_L(t), i_{RL}(t)$  на елементах схеми відповідно до функції керування  $u(t)$ , що має П-подібну форму

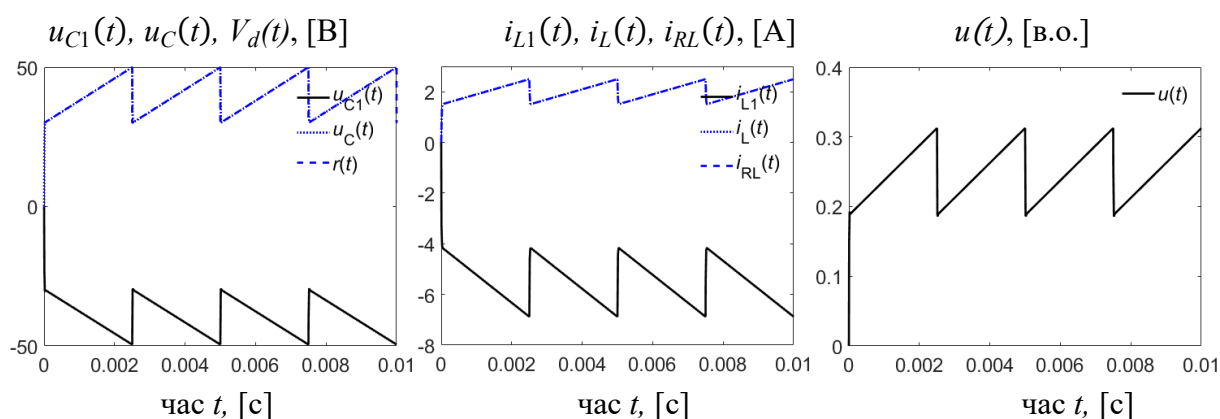


Рис. 8. Зміна напруг  $u_{C1}(t), u_C(t)$ , струмів  $i_{L1}(t), i_L(t), i_{RL}(t)$  на елементах схеми відповідно до функції керування  $u(t)$ , що має пилкоподібну форму.

Як видно з отриманих залежностей, синтезований за описаною методикою закон керування є ефективним для сигналів різної форми та динаміки, що дозволяє його використовувати в складних технічних системах, як то БПЛА, наземних, надводних та підводних роботизованих технічних засобів.

**Висновки.** У цій роботі представлено алгоритм формування закону керування нелінійних динамічних систем з використанням пакета MATLAB. На прикладі напівпровідникового перетворювача Кука показано реалізацію лінеаризації нелінійної моделі; вирішення задачі синтезу лінійно-квадратичного регулятора лінеаризованої моделі та застосування такого регулятора для управління вихідною нелінійною динамічною системою. Отримані результати отримано в рамках виконання науково-дослідної роботи 0123U101819 «Мультиагентна система захисту об'єктів критичної інфраструктури на основі рою мультикоптерних дронів» та можуть бути використані при розробці систем керування БПЛА, наземних, надводних та підводних роботизованих технічних засобів.

### Список використаних джерел

1. Lewis, F. L. Optimal Control / F. L. Lewis, D. Vrabie, V. L. Syrmos. – 3rd ed.–John Wiley & Sons, 2012. – 540 p.
2. Mohan, N. Power Electronics: Converters, Applications, and Design / N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins. – 3rd ed. – New York, NY, USA: Wiley, 2002. – Pp. 184-185.
3. Lyshevski, S. E. Mechatronics Part 2: Actuators, Sensors and Electronics" EEEE-583/683, Rochester Institute of Technology, Rochester, USA, April, 2023.



4. Panfilov A. Matrices, Linearization, and the Jacobi matrix [Electronic resource] / Alexander Panfilov, Kirsten H.W.J. ten Tusscher, Rob J. de Boer // Theoretical Biology. – Utrecht University, 2024. – Accessed mode: <https://tbb.bio.uu.nl/rdb/books/math.pdf>.
5. Lyshevski, S. E. Optimal Control Part 3-2: Control and Optimization of Nonlinear Dynamic Systems" EEEE-765, Rochester Institute of Technology, Rochester, USA, April, 2023.
6. Huang, X. Robust safety-critical control of nonlinear systems with small perturbations / X. Huang, L. Long // Nonlinear Dyn. – 2024. – № 23. – Pp. 21291-21307. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11071-024-10151-7>.
7. Isidori, A. Robust Autonomous Guidance: An Internal Model Approach / A. Isidori, L. Marconi, A. Serrani. – Springer Science & Business Media; 2003.
8. Abdelhamid, B. Robust Fuzzy Adaptive Fault-Tolerant Control for a Class of Second-Order Nonlinear Systems / B. Abdelhamid, C. Mohamed // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. – 2024 – Vol. 38, № 10. DOI: <https://doi.org/10.1002/acs.3916>.
9. Camacho, E. F. Model Predictive Control / E. F. Camacho. – New York, USA: Springer, 2007.
10. Model predictive control for autonomous ground vehicles: a review / S. Yu, M. Hirche, Y. Huang, H. Chen, F. Allgöwer // Autonomous Intelligent Systems. – 2021. – Vol. 1, № 4. DOI: [10.1007/s43684-021-00005-z](https://doi.org/10.1007/s43684-021-00005-z).
11. Hybrid adaptive control for aerial manipulation / M. Orsag, C. Korpela, S. Bogdan, P. Oh // J. Intell. Robot. Syst. – 2014. – Vol. 73. – Pp. 693–707.
12. Park, C. Adaptive Incremental Nonlinear Dynamic Inversion Control for Aerial Manipulators / C. Park, A. Ramirez-Serrano, M Bisheban // Aerospace. – 2024. – № 11. – Pp. 671. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace11080671>.
13. Lee, H. Estimation, control, and planning for autonomous aerial transportation / H. Lee, H. J. Kim, // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2016. – № 64. – Pp. 3369–3379. DOI: [10.1109/TIE.2016.2598321](https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2598321).
14. Russell, S. Artificial Intelligence: A Modern Approach / S. Russell, P Norvig. – Third Edition. – Pearson Education, Limited, 2016. – 1132 p.
15. Gladun, A. Ya. Ontology-Oriented Multy-Agent System for Decentralized Control of UAV's Group / A. Ya. Gladun, K. O. Khala// Cybernetics and Computer Engineering. – 2024. – № 2(216). – Pp. 41-69. DOI: [10.15407/kvt216.02.041](https://doi.org/10.15407/kvt216.02.041).
16. Xingmin, WEI. Control and Stabilization of Chaotic System Based on Linear Feedback Control Method / WEI Xingmin, LI Dekui // Wuhan University Journal of Natural Sciences. – 2024. – № 29(3). – Pp. 284-292. DOI: <https://doi.org/10.1051/wujns/2024293284>.

### References

1. Lewis, F.L., Vrabie, D., Syrmos, V.L. (2012). *Optimal Control*. (3rd ed.). John Wiley & Sons.
2. Mohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P. (2002). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 3rd ed. NY, USA: Wiley.
3. Lyshevski, S.E. (April, 2023). Mechatronics Part 2: Actuators, Sensors and Electronics. EEEE-583/683. Rochester Institute of Technology, Rochester, USA.
4. Panfilov, A. Matrices, Kirsten, H.W.J. ten Tusscher, Rob, J. de Boer. (n.d.). *Linearization, and the Jacobi matrix*. Utrecht University. <https://tbb.bio.uu.nl/rdb/books/math.pdf>.
5. Lyshevski, S.E. (April, 2023). Optimal Control Part 3-2: Control and Optimization of Nonlinear Dynamic Systems. EEEE-765. Rochester Institute of Technology, Rochester, USA.
6. Huang, X., Long, L. (2024). Robust safety-critical control of nonlinear systems with small perturbations. *Nonlinear Dyn*. <https://doi.org/10.1007/s11071-024-10151-7>.
7. Isidori, A, Marconi, L, Serrani, A. (2003). *Robust Autonomous Guidance: An Internal Model Approach*. Springer Science & Business Media.
8. Abdelhamid, B., Mohamed, C. (2024). Robust Fuzzy Adaptive Fault-Tolerant Control for a Class of Second-Order Nonlinear Systems. *Int J Adapt Control Signal Process*. <https://doi.org/10.1002/acs.3916>.
9. Camacho, E.F. (2007). *Model Predictive Control*. New York, USA: Springer.
10. Yu, S., Hirche, M., Huang, Y., Chen, H., Allgöwer, F. (2021). Model Predictive Control for Autonomous Ground Vehicles: A Review. *Autonomous Intelligent Systems*, 1(1), doi:10.1007/s43684-021-00005-z.

11. Orsag, M., Korpela, C., Bogdan, S., Oh, P. (2014). Hybrid adaptive control for aerial manipulation. *J. Intell. Robot. Syst.*, 73, 693–707.
12. Park, C., Ramirez-Serrano, A., Bisheban, M. (2024). Adaptive Incremental Nonlinear Dynamic Inversion Control for Aerial Manipulators. *Aerospace*, 11, 671. <https://doi.org/10.3390/aerospace11080671>.
13. Lee, H., Kim, H.J. (2016). Estimation, control, and planning for autonomous aerial transportation. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 64, 3369–3379.
14. Russell, S., Norvig, P. (2016). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Third Edition. (Pearson Education, Limited).
15. Gladun, A. Ya., Khala, K.O. (2024). Ontology-Oriented Multy-Agent System for Decentralized Control of UAV's Group. *Kibernetika i vyčislitel'naâ tehnika*, 216, 41-69. DOI: 10.15407/kvt216.02.041.
16. WEI Xingmin, LI Dekui. (2024). Control and Stabilization of Chaotic System Based on Linear Feedback Control Method[J]. *Wuhan Univ J of Nat Sci*, 29(3), 284-292.

Отримано 10.09.2024

UDC 621.32

***Volodymyr Kazymyr<sup>1</sup>, Anatoliy Prystupa<sup>2</sup>, Yevhenii Yatchenko<sup>3</sup>***

<sup>3</sup>Doctor of Sciences, Professor, Professor of the Department of Information and Computer Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [vkazymyr@gmail.com](mailto:vkazymyr@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8163-1119>. **ResearcherID:** [Q-2925-2016](https://orcid.org/Q-2925-2016)

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies Department  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**Email:** [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/F-5507-2014). **SCOPUS Author ID:** [57190807222](https://orcid.org/57190807222)

<sup>2</sup>PhD Student at the Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies Department  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [yevhenii.yatchenko@gmail.com](mailto:yevhenii.yatchenko@gmail.com). **ORCID:** [0009-0000-5900-0572](https://orcid.org/0009-0000-5900-0572)

**Scopus author ID** [59273801700](https://orcid.org/59273801700)

## OPTIMAL CONTROL OF A NONLINEAR DYNAMIC SYSTEM

*The work describes the method of obtaining the control law of a nonlinear dynamic system by linearizing this system around the equilibrium point. The stages of development of optimal control of a nonlinear dynamic system using the example of a Cook converter using the MathLab package are outlined: obtaining a mathematical model of the converter; obtaining parameters of the equilibrium point of a nonlinear system using a proportional-integral-differential (PID) regulator; linearization of the mathematical model around the equilibrium point; solving the quadratic controller problem and obtaining the tracking control law for the linearized model; control of a nonlinear dynamic system using a control law developed for a linearized system.*

*The results were obtained within the framework of the research work 0123U101819 'Multi-agent system for the protection of critical infrastructure facilities based on a swarm of multi-copter drones' and can be used in the development of control systems for UAVs, ground, surface and underwater robotic vehicles*

**Keywords:** Modelling; control systems; Hamilton-Jacobi equation; optimal control; approximation; nonlinear system, linearisation.

*Fig.: 8. References: 16.*

## РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-3(37)-208-216

УДК 711+332.5

**Ольга Сергіївна Петраковська<sup>1</sup>, Марія Юрїївна Михальова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри землеустрою і кадастру  
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)  
E-mail: [petrakovska.os@knuba.edu.ua](mailto:petrakovska.os@knuba.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9437-9730>  
Scopus Author ID: 57208029712. ResearcherID: AAC-8135-2019

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри землеустрою і кадастру  
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)  
E-mail: [mykhalova.myu@knuba.edu.ua](mailto:mykhalova.myu@knuba.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2242-5507>  
Scopus Author ID: 57245147600. ResearcherID: U-7863-2017

### ТРАНСФОРМАЦІЯ ПОНЬЯТЬ І ЗАВДАНЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ЗОНУВАННЯ ТЕРИТОРІЇ

Функціональне зонування дозволяє оптимізувати використання території, забезпечуючи збалансоване поєднання різних функцій; допомагає уникнути хаотичної забудови, яка може призводити до конфліктів між різними типами землекористування; сприяє ефективній організації міського простору та мінімізує витрати на будівництво й обслуговування інфраструктури тощо. У статті досліджено трансформацію понятійного апарату та завдань функціонального зонування в Україні та їх взаємозв'язок з підходами до просторового планування. Проведене дослідження дозволило структурувати етапи трансформації понять і завдань функціонального зонування територій в Україні. Трансформації функціонального зонування території відбулася у відповідь на зміни в економічних умовах, суспільних потребах і технологічних можливостях. Результати дослідження ілюструють, що в Україні цей процес ускладнений неврегульованістю нормативно-правової бази й інерційністю структури, у повноваженнях яких є різні складові цього комплексного процесу.

Стаття є науково-методичною.

**Ключові слова:** зонування; функціональна зона; територіальна зона; цільове призначення земельної ділянки; просторове планування.

Бібл.: 18.

**Актуальність теми дослідження.** У багатьох країнах функціональне зонування є обов'язковим елементом містобудівної документації. Функціональне зонування дозволяє оптимізувати використання території, забезпечуючи збалансоване поєднання різних функцій; допомагає уникнути хаотичної забудови, яка може призводити до конфліктів між різними типами землекористування; сприяє ефективній організації міського простору та мінімізує витрати на будівництво й обслуговування інфраструктури; забезпечує чітке розуміння можливостей використання землі, що знижує ризики та сприяє залученню капіталу в розвиток територій тощо. В Україні законодавчі вимоги щодо зонування територій змінювались за часи незалежності. Динаміка цих змін віддзеркалює підходи і методи планування та використання земельних ресурсів у відповідь на нові виклики. У статті досліджено трансформацію понятійного апарату та завдань функціонального зонування в Україні.

**Постановка проблеми.** Історія розвитку функціонального зонування відображає еволюцію суспільних, економічних, технологічних змін та соціальних пріоритетів на різних етапах людської цивілізації. Трансформація завдань функціонального зонування території показує зміни у підходах до планування та використання земельних ресурсів у відповідь на нові виклики.

В Україні розвиток функціонального зонування має свою історію. Коріння зонування в Україні походило з досвіду Радянського Союзу щодо зонування територій при розробленні містобудівної документації.

Протягом останніх років відбувалася активна трансформація нормативно-правової бази щодо планування використання територій. Зміни, які відбулися, також стосуються

© О. С. Петраковська, М. Ю. Михальова, 2024

і питання щодо функціонального зонування. На сучасному етапі питання зонування переважно досліджувалось фахівцями з містобудування, які присвячені вивченню змісту поняття «функціональне зонування» як інструменту просторової організації міста та обґрунтуванню його важливості для покращення основних форм життєдіяльності населення [6; 9]. Ґрунтовних комплексних досліджень, особливо з питань зонування в містобудівному аспекті, не проводилося.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оскільки метою дослідження є аналіз понятійного апарату та завдань функціонального зонування, у статті зроблений акцент на трансформації законодавчих положень, які регулювали ці питання в Україні.

Дуже цікавим з погляду трансформації розуміння зонінгу і його впливу на розвиток є закордонні наукові дослідження. У дослідженні [3] розглянуто еволюцію зонінгу в США, де він був започаткований, з 1980 року. У ньому розглядається стійкість місцевих підходів до зонування і висловлюється цікава думка щодо порівняння розвитку зонування з еволюцією загального права.

У роботі [2] автор аналізує переваги і недоліки підходів до зонування в США, регламентовані в 1916 і 1961 роках, у результаті чого пропонує певні правила, яких слід дотримуватись при розробленні нормативно-правової бази про зонування. По-перше, довіра ринку. Це означає насамперед, що головною метою зонування має бути запобігання заподіянню конкретної шкоди розвитку, а не примусове створення конкретних переваг. Іншими словами, справжньою метою зонінгу є пом'якшення окремих провалів ринку, а не витіснення ринку як механізму розвитку міста. Добре зрозумілі закони земельної економіки, коли їм дозволено діяти з мінімальними нормативними обмеженнями, зазвичай можуть створювати економічно вигідні, сприятливі споживачам, привабливі інвесторам моделі розвитку. По-друге, правила мають бути простими, гнучкими та передбачуваними. Зонування має бути досить гнучким, щоб враховувати зміни в моделях розвитку. Від державних службовців не можна очікувати, що вони зможуть передбачити майбутні тенденції розвитку міста, демографії та інфраструктури. По-третє, автор зазначає, що, як тільки ми напишемо правила, можемо дати їм спокій. Це спрямовано та те, що правила зонування мають бути законодавчо визначеними і повинні застосовуватися автоматично на основі законності без дискреційного перегляду, за винятком апеляцій. Дійсно, дотримання зонування повинно бути настільки простим і чітким, щоб його могли контролювати посадовці різних рівнів.

Що цікаво, автор зазначає, що якщо написані розумні, відкриті та достатньо гнучкі правила, ми можемо жити з ними практично без поправок протягом, можливо, півстоліття.

**Мета дослідження.** Визначити ключові етапи трансформації понять і завдань функціонального зонування територій в Україні та їх взаємозв'язок з підходами до просторового планування. У процесі дослідження використано методи порівняльного аналізу.

**Виклад основного матеріалу.** Зонінг як метод просторового планування був вперше запроваджений у Сполучених штатах Америки у 1916 році, коли була ухвалена Постанова про зонування 1916 року (Zoning Resolution of 1916) [1]. Це стосувалося міста Нью-Йорк, яке стало першим у світі, яке офіційно прийняло зонування як інструмент регулювання міського простору. Цей документ був розроблений, щоб запобігти трьом потенційно можливим видам шкоди: надмірній щільності, зіставленню несумісних видів діяльності та виявленню візуальних порушень. Він визначав різні зони для житлових, комерційних і промислових функцій у межах міста, встановлюючи певні правила й обмеження для кожної з них. Згодом Зонінг був адаптований і розвинутий у багатьох країнах світу і став важливим інструментом містобудівного планування.

Вимоги до зонування та розміщення основних функцій міста (житлових, промислових, транспортних, рекреаційних тощо), а також до забезпечення необхідної інфраструктури в населених пунктах встановлювались будівельними нормами і правилами (СНиП П-60-75 «Планировка и застройка населённых пунктов», СНиП 2.07.01-89\*. «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений»).

Зонування як концепція просторового планування з'явилося в Україні в період після здобуття Україною незалежності в 1991 році, проте підходи до його впровадження спиралися на радянські методи містобудування [7].

Наприкінці 90-х років в Україні почали розробляти нові підходи до забудови міста, враховуючи західний досвід зонінгу, що передбачає детальне регулювання використання земельної ділянки з конкретними функціями. У 2000 році першим законом України щодо просторового планування, визначається обов'язковість розроблення регіональних і місцевих правил забудови, які були нормативно-правовими актами і встановлювали певні регламенти і правила [15]. Місцеві правила забудови, як і містобудівна документація, склалися із текстової та графічної частини, яка включала план зонування. У них визначався перелік переважних і допустимих видів забудови та іншого використання земельних ділянок у межах окремих зон, для кожної з яких згідно з державними будівельними нормами, встановлюються єдині умови й обмеження забудови та іншого використання земельних ділянок. На плані зонування зазначався поділ населеного пункту на зони з допустимими та переважними видами використання земельних ділянок [16].

У 2011 році Законом України «Про регулювання містобудівної діяльності» скасовано дію попереднього («Про планування та забудову територій») і план зонування територій (зонінг) стає обов'язковою складовою містобудівної документації на місцевому рівні, яка визначає умови та обмеження використання території населених пунктів [16]. У подальшому процедура розробки зонінгу деталізується і уточнюється підзаконними актами, якими встановлювались вимоги до його складу і змісту – ДСТУ-Н Б Б.1-1-12:2011 «Настанова про склад та зміст плану зонування території (зонінг)» та ДБН Б.1.1-22:2017 «Склад та зміст плану зонування території» [5; 18]. На той час було встановлено, що зонування – це встановлення *територіальних зон* у межах населених пунктів із визначенням відповідних видів використання території, об'єктів нерухомості та встановлення містобудівних регламентів<sup>1</sup>.

Вид використання території визначався як «збудова та інше використання території, що поєднуються за подібністю відповідних ознак». Тоді вперше було введено поняття дозволеного виду використання території і розрізнялися переважні (безумовно дозволені) та супутні (допоміжні), які є дозволеними за наявності переважних видів використання. У складі графічного матеріалу розроблялась схема зонування, на якій відображалось розташування і *типи територіальних зон<sup>2</sup> (підзон)*, що забезпечувало визначення відповідних умов та обмежень у межах населеного пункту. Основними типами територіальних зон були житлові, громадські, ландшафтно-рекреаційні, курортні, транспортної і інженерної інфраструктури, виробничі, комунально складські, сільськогосподарського призначення, історико-культурного і спеціальні, які фактично переважно відображають функцію цієї зони. Проте законодавчого визначення поняття «функціональне призначення» було відсутнє.

<sup>1</sup> Містобудівний регламент – сукупність обов'язкових вимог до використання земельних ділянок, що встановлюються у межах відповідних територіальних зон і визначають дозволені види використання території земельних ділянок, граничні (мінімальні і (або) максимальні) розміри земельних ділянок, граничні параметри дозволеного будівництва та реконструкції об'єктів нерухомості, обмеження використання земельних ділянок і об'єктів нерухомості, що встановлюються відповідно до законодавства України.

<sup>2</sup> Територіальна зона – територія (у визначених межах) на схемі зонування, відповідно до якої встановлені містобудівні регламенти.

Трансформація поняття зонування відбувалась постійно. Уже у 2012 році план зонування території встановлює функціональне призначення, вимоги до забудови окремих територій (функціональних зон) населеного пункту, їхньої ландшафтної організації. Серед обов'язкових вимог, з дотриманням яких здійснювався зонінг визначаються врахування місцевих умов під час визначення функціональних зон і залишається встановлення для кожної зони дозволених і допустимих видів використання територій для містобудівних потреб, умов та обмежень щодо їх забудови.

Слід зауважити, що зонінг уже тоді відігравав вагоме значення при зміні цільового призначення земельної ділянки. У разі її невідповідності плану зонування території та/або детальному плану території така зміна заборонялась.

Зі змінами, які відбулися після 2020 року, на виконання положень закону № 711 [13], трансформація понять і завдання плану зонування перейшла на новий рівень.

План зонування території (зонінг) втратив свою самостійність як вид містобудівної документації і став складовою комплексного плану просторового розвитку території територіальної громади (ТГ) або генерального плану населеного пункту і визначає умови та обмеження використання території у межах *визначених функціональних зон* [16]. План зонування розробляється як окремий розділ під назвою «Функціональне зонування території територіальної громади» і містить інформацію щодо меж існуючих та проектних функціональних зон усієї території ТГ, виду функціонального призначення та правового режиму використання територій в кожній зоні [11, п. 84,5]. З'являється визначення *функціонального використання* території – існуюче використання території за переважною функцією (громадська, житлова, виробнича тощо) і *функціонального призначення території* – перспективне використання території за переважною функцією, яка встановлена планом зонування території у складі відповідного виду містобудівної документації [11]. Таким чином, основним завданням зонінгу є розподіл територій за функцією. Потребує додаткового пояснення питання існуючих і проектних функціональних зон. Якщо проектні функціональні зони, це ті, що встановлені в результаті реалізації проектних рішень комплексного і генерального планів, то що таке існуюча – та що існувала до розробки таких планів, чи як?

У результаті аналізу стає очевидним, що функціональне використання території відповідає попередньому визначеному переліку територіальних зон. Дуже важливим кроком на сьогодні є кількісне визначення частки переважного виду використання території (земельної ділянки) - використання, яке відповідає виду функціонального призначення території для даної функціональної зони й займає сумарну площу території не менше 60 % у межах однієї функціональної зони. Таким чином сумарна площа земельних ділянок з усіма видами цільового призначення, визначеними як супутній вид використання, не може перевищувати 40 % площі [11].

На відміну від попереднього визначення виду використання території, сучасне поняття пов'язано з цільовим використанням і визначено як набір дозволених видів цільового призначення земельних ділянок, що поєднуються за подібністю відповідних ознак. Визначення функціональної зони<sup>3</sup> само по собі принципово відрізняється від визначення територіальної зони, але в поєднанні з містобудівним регламентом стає зрозуміло ідентичність їхнього змістовного наповнення. Функціональна зона, як раніше територіальна, визначає встановлені обмеження у використанні земель. Крім того, категорія земель та

<sup>3</sup> Функціональна зона території - визначена комплексним планом просторового розвитку території територіальної громади, генеральним планом населеного пункту, планом зонування території частина території територіальної громади, щодо якої визначений певний набір дозволених (переважних (основних) та супутніх) видів цільового призначення земельних ділянок та відповідно до законодавства встановлені обмеження у використанні земель у сфері забудови.

вид цільового призначення земельної ділянки визначаються в межах відповідного виду *функціонального призначення території*, передбаченого затвердженими видами містобудівної документації місцевого рівня [4, ст. 21, п.3]. Зміна цільового призначення земельної ділянки допускається виключно за умови дотримання правил співвідношення між новим видом цільового призначення земельної ділянки та видом функціонального призначення території, визначеного відповідною містобудівною документацією на місцевому рівні. Необхідно зробити особливий акцент та тому, що відомості про межі існуючих та проєктних функціональних зон мають вноситись до Державного земельного кадастру, а розроблення містобудівної документації вважається завершеним і містобудівна документація вважається чинною не раніше моменту внесення відповідних даних до містобудівного кадастру та Державного земельного кадастру.

Назва функціональної зони визначається назвою виду функціонального призначення території відповідного класу або підкласу, встановленого класифікатором видів цільового призначення земельних ділянок, видів функціонального призначення територій та співвідношення між ними, а також правил їх застосування, затвердженого в Порядку ведення державного земельного кадастру (надалі Порядок) [14, дод. 58]. Перелік переважних та супутніх видів цільового призначення земельних ділянок у межах кожної функціональної зони визначається відповідно до класу/підкласу виду функціонального призначення територій, встановленого тим же Порядком [14, дод. 60]. Підгрупи встановлені відповідно до функціональних зон на підставі містобудівного законодавства: сільбищна, виробнича [8] та додана ще природоохоронні та ландшафтно-рекреаційні території і сільськогосподарські території, якою ніколи не було як визначеної для забудови територій населених пунктів [8]. Перелік переважних та супутніх видів цільового призначення земельних ділянок у межах кожної функціональної зони визначається відповідно до класу/підкласу видів функціонального призначення територій та співвідношення між ними, а також правил їх застосування.

Постановою Кабінету Міністрів України у 2021 році [12] визначено, що до Державного земельного кадастру вносяться відомості про межі функціональних зон, серед яких назва, код (номер) виду функціональної зони згідно з Порядком (додатком 2), до переліку територіальних зон в якому додані межі функціональних зон (код 024) [14]. При визначенні облікових номерів функціональних зон згідно з пунктом 28 Порядку, перша складова номеру визначається кодом групи об'єктів Державного земельного кадастру згідно з додатком 2, де визначений перелік територіальних зон. Тобто виходячи наведеного, відповідно до сучасного нормативно-правового регулювання функціональні зони є різновидом територіальних зон, які фактично відображають суміш зон дії обмежень, меж певних територій та інших територій із особливими режимами використання.

При цьому, за офіційними даними Держгеокадастру вперше у 2023 році до ДЗК внесені відомості про 5 функціональних зон у межах населених пунктів Лісники і Тарасівка Київської області, а також Давидів Львівської області [17]. Наведені дані свідчать про дуже повільний процес виконання вимог законодавства щодо внесення функціональних зон. Це може бути спричинено, відсутністю комплексних і генеральних планів, розроблених із дотриманням сучасних вимог і неврегульованістю цього процесу в практичній площині.

З урахуванням зазначеного, проявляється необхідність врегулювання змістовного наповнення понять «територіальна» і «функціональна» зона й регламентування їх взаємозв'язку.

Особливий акцент варто зробити на ролі функціонального зонування при зміні цільового призначення земельних ділянок на сучасному етапі. До внесення до Державного земельного кадастру відомостей про функціональні зони, зміна цільового призначення

земельних ділянок здійснюється за проєктами землеустрою щодо їх відведення. На сьогодні, зміна цільового може здійснюватися їхніми власниками без розроблення проєкту землеустрою на підставі заяви державному кадастровому реєстратору:

- для земельних ділянок, розташованих у межах функціональних зон, інформація про які внесена в ДЗК,
- до внесення до Державного земельного кадастру відомостей про функціональні зони - на підставі витягу з містобудівної документації із зазначенням відомостей про функціональну зону та всіх обмежень у використанні земель, зазначених у містобудівній документації. Перелік та обсяг відомостей, що зазначаються в такому витягу, визначаються Кабінетом Міністрів України в Порядку ведення Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва [10]. Запит щодо надання витягу з містобудівної документації із зазначенням функціональної зони, у межах якої розташована земельна ділянка може робити державний кадастровий реєстратор, або він може бути отриманий заявником самостійно. У такому разі витяг з містобудівної документації додається до заяви про внесення до Державного земельного кадастру відомостей про зміну цільового призначення земельної ділянки.

Не зовсім зрозуміло й потребує роз'яснення положення [4, ст.20, п.10], що включення земельної ділянки із визначеним видом цільового призначення до меж функціональної зони не тягне за собою обов'язковості зміни виду її цільового призначення незалежно від того, чи належить цей вид до переліку видів цільового призначення, визначення яких є можливим у межах такої зони. Як це працює у разі, коли цільове призначення земельної ділянки не відповідає функціональному призначенню території.

Враховуючи повномасштабне вторгнення РФ в Україну, є певний перелік перехідних і тимчасових положень законодавства, які встановлюють правила, в тому числі до функціонального зонування, на період воєнного стану і певний термін після нього, з урахування необхідності скорішого відновлення територій і повернення їх інвестиційної привабливості. Наприклад, відповідно до прикінцевих положень [16, п.6-3] до 1 січня 2025 року функціональне призначення території може визначатися детальним планом території. Дія цього положення не поширюється на території, де затверджені комплексні або генеральні плани населеного пункту відповідно до [13].

Окрім завдань функціонального зонування зазначених вище, функціональні зони визначають можливість забудови встановлені в містобудівних умовах і обмеженнях. В Додатку 2 до Порядку ведення Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва наданий перелік критеріїв аналізу поданих/внесених даних на їх повноту, відповідність формату, логічність та достовірність. Одним із таких критеріїв є співвідношення функціонального призначення території, цільового призначення земельної ділянки і коду об'єкта згідно з ДК БС 018-2000. Треба зазначити, що ДК БС 018-2000 замінений національним класифікатором НК 018:2023 "Класифікатор будівель і споруд", що також потребує певних узгоджень. За результатами аналізу даних щодо їх повноти, відповідності формату, логічності та достовірності визначається рівень ризику (низький, середній, високий, критичний) визначається з урахуванням критеріїв рівнів ризику, серед яких, до критичного рівня ризику належать електронні документи, за результатами аналізу яких щодо їх повноти, відповідності формату, встановлено, що на дату надання містобудівних умов та обмежень, невідповідності цільового та функціонального призначення земельної ділянки містобудівній документації на місцевому рівні. І все це потребує додаткового аналізу і виявлення відповідності різних містобудівних і земельних регуляторів.



**Висновки.** Трансформації функціонального зонування території відбулася у відповідь на зміни в економічних умовах, суспільних потребах і технологічних можливостях, що дозволило еволюціонувати від простих моделей до комплексного, гнучкого та адаптивного планування земельних ресурсів у сучасних умовах. Воно включає перехід від традиційного поділу території за функціональним призначенням до більш комплексного, який враховує багатофункціональність, сталий розвиток, інтеграційну інфраструктуру та збереження природного середовища та правові питання. При цьому в Україні цей процес ускладнений неврегульованістю нормативно-правової бази й інерційністю структур, у повноваженнях яких є різні складові цього комплексного процесу.

### Список використаних джерел

1. Ann Regan. Zoning Resolution of 1916. 2016 [Electronic resource] / Ann Regan // Celebrating 100 Years of Zoning. – Accessed mode: <https://rpa.org/news/lab/celebrating-100-years-of-zoning>.
2. Peter, D. Salins. Simple Rules for a Complex Society [Electronic resource] / D. Peter // Redesigning New York's Zoning. City journal. – 1993. – Accessed mode: <https://www.city-journal.org/article/simple-rules-for-a-complex-society#:~:text=Zoning%20Against%20Harms,the%20most%20blatant%20visual%20offenses>.
3. Property in Land and Other Resources [Electronic resource] / Edited by Daniel H. Cole and Elinor Ostrom, 2012. – 287 p. – Accessed mode: [https://www.lincolnst.edu/app/uploads/2024/04/evolution-of-zoning-since-1980s-localism\\_0.pdf](https://www.lincolnst.edu/app/uploads/2024/04/evolution-of-zoning-since-1980s-localism_0.pdf).
4. Земельний кодекс України № 2768-III від 25.10. 2001 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2768-14>.
5. Настанова про склад та зміст плану зонування території (зонінг). ДСТУ-Н Б Б.1-1-12:2011 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/5-1-0-1010>.
6. Пандас, А. В. Функціональне зонування як інструмент регулювання просторового потенціалу великого міста / А. В. Пандас // Экономика: реалии времени. – 2015. – № 1(17). – Режим доступу: <https://economics.net.ua/files/archive/2015/No1/43-48.pdf>.
7. Петраковська, О. С. Підходи до просторового планування: ретроспектива та сучасний стан [Електронний ресурс] / О. С. Петраковська, М. Ю. Михальова // Просторовий розвиток. – 2022. – Вип. 1. – С. 117-128. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/spdev\\_2022\\_1\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/spdev_2022_1_11).
8. Планування та забудова територій. ДБН Б 2..2-12:2019 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2019/07/DBN-B22-12-2019.pdf>.
9. Плешкановська, А. М. Функціонально-планувальна оптимізація використання міських територій [Електронний ресурс] : монографія / А. М. Плешкановська. – Київ : Ін-т Урбаністики, 2005. – 190 с. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/351010233\\_Funkcionalno-planuvalna\\_optimizacia\\_vikoristanna\\_miskih\\_teritorij](https://www.researchgate.net/publication/351010233_Funkcionalno-planuvalna_optimizacia_vikoristanna_miskih_teritorij).
10. Порядок ведення Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва. Постанова КМУ № 681 від 23.06.2021 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/681-2021-%D0%BF>.
11. Порядок розроблення, оновлення, внесення змін та затвердження містобудівної документації [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України № 926 від 01.09.2021. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/926-2021-%D0%BF#n609>.
12. Про внесення змін до деяких актів Кабінету Міністрів України [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України № 821 від 28.07.2021. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/821-2021-%D0%BF#Text>.
13. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо планування використання земель [Електронний ресурс] : Закон України № 711-IX від 17.06.2020. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/711-20#n3>.
14. Про затвердження Порядку ведення Державного земельного кадастру [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України № 1051 від 17.10.2012. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012>.
15. Про планування та забудову територій [Електронний ресурс] : Закон України № 1699-III від 20.04. 2000. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1699-14> (втратив чинність 12.03.2011).

16. Про регулювання містобудівної діяльності [Електронний ресурс] : Закон України № 3038-VI від 17.02.2011. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3038-17>.

17. Публічний звіт В.о. Голови Держгеокадастру за 2023 рік [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://land.gov.ua/wp-content/uploads/2024/03/publichnyj-zvit\\_23.pdf](https://land.gov.ua/wp-content/uploads/2024/03/publichnyj-zvit_23.pdf).

18. Склад та зміст плану зонування території. ДБН Б.1.1-22:2017 [Електронний ресурс] : Наказ Мінрегіону № 344 від 27.12.2017. – Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=75765](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=75765).

### References

1. Regan, A. (2016). Zoning Resolution of 1916. Retrieved from <https://rpa.org/news/lab/celebrating-100-years-of-zoning>.

2. Salins, P.D. (1993). Simple Rules for a Complex Society. Redesigning New York's Zoning. City journal. <https://www.city-journal.org/article/simple-rules-for-a-complex-society#:~:text=Zoning%20Against%20Harms,the%20most%20oblatant%20visual%20offenses>.

3. Cole, D.H., Ostrom, E. (Eds.). (2012). Property in Land and Other Resources. Retrieved from [https://www.lincolnst.edu/app/uploads/2024/04/evolution-of-zoning-since-1980s-localism\\_0.pdf](https://www.lincolnst.edu/app/uploads/2024/04/evolution-of-zoning-since-1980s-localism_0.pdf)

4. Zemelnyi Kodeks Ukrainy [Land Code of Ukraine] № 2768-III of 25.10.2001. <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2768-14>.

5. Nastanova pro sklad ta zmist planu zonuвання terytorii (zoninh). DSTU-N B B.1-1-12:2011 [Instruction on the composition and content of the territory zoning plan (zoning). DSTU -H B B.1-1-12:2011]. <https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/5-1-0-1010>.

6. Pandas, A.V. (2015). Funktsionalne zonuвання yak instrument rehuliuвання prostоровoho potentsialu velykoho mista [Functional zoning as a tool for regulating the spatial potential of a large city]. *Ekonomika: realii vremeni – Economics: Realities of Time, 1(17)*. <https://economics.net.ua/files/archive/2015/No1/43-48.pdf>.

7. Petrakovska, O.S., Mykhalva, M.Yu. (2022). Pidkhody do prostоровoho planuvannya: retrospektyva ta suchasnyi stan [Approaches to spatial planning: retrospective and current status]. *Prostorovy rozvytok – Spatial development, 1*, 117-129. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2022.1.117-128>.

8. Planuvannya ta zabudova terytorii. DBN B 2..2-12:2019 [Planning and development of territories. DBN B 2.2-12:2019]. <https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2019/07/DBN-B22-12-2019.pdf>.

9. Pleshkanovska, A.M. (2005). *Funktsionalno-planuvalna optymizatsiia vykorystannia miskykh terytorii [Functional planning optimization of the use of urban areas]*. Logos. [https://www.researchgate.net/publication/351010233\\_Funktsionalno-planuvalna\\_optimizacia\\_vikoristanna\\_miskih\\_teritorij](https://www.researchgate.net/publication/351010233_Funktsionalno-planuvalna_optimizacia_vikoristanna_miskih_teritorij).

10. Poriadok vedennia Yedynoi derzhavnoi elektronnoi systemy u sferi budivnytstva [Procedure for maintaining the Unified State Electronic System in the field of construction], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 681 of 23.06.2021. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/681-2021-%D0%BF>.

11. Poriadok rozroblennia, onovlennia, vnesennia zmin ta zatverdzhennia mistobudivnoi dokumentatsii [Procedure for developing, updating, amending and approving urban planning documentation], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 926 of 1.09.2021. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/926-2021-%D0%BF#n609>.

12. Pro vnesennia zmin do deiaktykh aktiv Kabinetu Ministriv Ukrainy [On making changes to some acts of the Cabinet of Ministers of Ukraine], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 821 of 28.07.2021. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/821-2021-%D0%BF#Text>.

13. Pro vnesennia zmin do deiaktykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo planuvannya vykorystannia zemel [On making changes to some legislative acts of Ukraine regarding land use planning], Law of Ukraine № 711-IX of 17.06.2020. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/711-20#n3>.

14. Pro zatverdzhennia Poriadku vedennia Derzhavnoho zemelnogo kadastru [On approval of the Procedure for maintaining the State Land Cadastres], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 1051 of 17.10.2012. Retrieved from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012>.

15. Pro planuvannya ta zabudovu terytorii [About planning and development of territories], Law of Ukraine № 1699-III of 20.04.2000. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1699-14>.

16. Pro rehuliuвання mistobudivnoi diialnosti [On regulation of urban planning activities], Law of Ukraine № 3038-VI of 17.02.2011. <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3038-17>.

17. Publichnyi zvit V.o. Holovy Derzhheokadastru za 2023 rik [Public report of Acting Head of the State Geocadastre for 2023]. [https://land.gov.ua/wp-content/uploads/2024/03/publichnyj-zvit\\_23.pdf](https://land.gov.ua/wp-content/uploads/2024/03/publichnyj-zvit_23.pdf).

18. Sklad ta zmist planu zonuвання terytorii. DBN B.1.1-22:2017 [Composition and content of the territory zoning plan. DBN B.1.1-22:2017], Order №344 of 27.12.2017. [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=75765](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=75765).

Отримано 28.08.2024

UDC 711+332.5

**Olga Petrakovska<sup>1</sup>, Mariia Mykhalova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Doctor Technical Sciences, Professor,  
Head of the Department of Land Management and Cadastre  
Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [petrakovska.os@knuba.edu.ua](mailto:petrakovska.os@knuba.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9437-9730>  
**Scopus Author ID:** [57208029712](https://orcid.org/57208029712). **ResearcherID:** [AAC-8135-2019](https://orcid.org/AAC-8135-2019)

<sup>2</sup>PhD in Technical Science, Associate Professor,  
Associate Professor the Department of Land Management and Cadastre  
Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [mykhalova.myu@knuba.edu.ua](mailto:mykhalova.myu@knuba.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2242-5507>  
**Scopus Author ID:** [57245147600](https://orcid.org/57245147600). **ResearcherID:** [U-7863-2017](https://orcid.org/U-7863-2017)

**TRANSFORMATION OF CONCEPTS AND TASKS  
OF FUNCTIONAL ZONING OF THE TERRITORY**

*Functional zoning allows optimization of the use of territories, providing a balanced combination of various functions; helps to avoid chaotic urban development, which can lead to conflicts between different types of land use; contributes to the efficient organization of urban space and minimizes the costs of infrastructure construction and maintenance; provides a clear understanding of the possibilities of land use, which reduces risks and promotes the attraction of capital in the development of territories, etc. In Ukraine, the development of functional zoning has its history. Zoning, as a concept of spatial planning, appeared in Ukraine in the period after gaining independence in 1991, but approaches to its implementation were based on Soviet urban planning methods. The article examines the transformation of the conceptual apparatus and tasks of functional zoning in Ukraine and their relationship with approaches to spatial planning. Methods of comparative analysis were used in the research process. The research that was conducted, made it possible to structure the stages of transformation of the concepts and tasks of functional zoning of territories in Ukraine. It includes a transition from the traditional division of the territory by functional purpose to a more comprehensive one, that takes into account multifunctionality, sustainable development, integration infrastructure, and preservation of the natural environment and legal issues. The results of the study illustrate that in Ukraine this process is complicated by the unsettled regulatory framework and the inertia of the structures that are empowered by various components of this complex process.*

*The article is scientific and methodical.*

**Keywords:** zoning; functional area; territorial zone; land plot purpose; spatial planning.

**References:** 18.

**Степан Петрович Шаповал<sup>1</sup>, Юрій Васильович Пришляк<sup>2</sup>, Богдан Іванович Гулай<sup>3</sup>,  
Микола Петрович Генсецький<sup>4</sup>, Мар'яна Євгенівна Касинець<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор кафедри теплогазопостачання та вентиляції

Національний університет "Львівська політехніка" (Львів, Україна)

E-mail: [stepan.p.shapoval@lpnu.ua](mailto:stepan.p.shapoval@lpnu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4985-0930>. ResearcherID: [S-3421-2017](https://orcid.org/S-3421-2017)

<sup>2</sup>аспірант кафедри теплогазопостачання та вентиляції

Національний університет "Львівська політехніка" (Львів, Україна)

E-mail: [yurii.v.pryshliak@lpnu.ua](mailto:yurii.v.pryshliak@lpnu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0511-2568>. ResearcherID: [LGZ-2116-2024](https://orcid.org/LGZ-2116-2024)

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання та вентиляції

Національний університет "Львівська політехніка" (Львів, Україна)

E-mail: [bogdan.i.gulai@lpnu.ua](mailto:bogdan.i.gulai@lpnu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6951-6994>. ResearcherID: [V-7301-2017](https://orcid.org/V-7301-2017)

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, доцент

ВСП "Техніко-економічний коледж Національного університету "Львівська політехніка" (Львів, Україна)

E-mail: [gens2005@ukr.net](mailto:gens2005@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0460-8131>. ResearcherID: [LGZ-8263-2024](https://orcid.org/LGZ-8263-2024)

<sup>5</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання та вентиляції

Національний університет "Львівська політехніка" (Львів, Україна)

E-mail: [mariana.y.kasynets@lpnu.ua](mailto:mariana.y.kasynets@lpnu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7686-7482>. ResearcherID: [V-7536-2017](https://orcid.org/V-7536-2017)

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ГІБРИДНІ СОНЯЧНІ КОЛЕКТОРИ ІНТЕГРОВАНІ У СВІТЛОПРОЗОРИ КОНСТРУКЦІЇ БУДІВЕЛЬ

Одним із ключових завдань в сучасній енергетиці є забезпечення теплом енергоефективних будівель за допомогою відроджуваних джерел енергії, зокрема сонячної енергії. Через обмежений простір для розміщення геліоколекторів на будівлях, перспективною є інтеграція сонячних систем теплопостачання в конструкції зовнішніх огорожень будівель. У цій статті розглянуто наукові аспекти застосування основних типів сонячних колекторів, а також їх класифікацію. Авторами запропонована конструкція гібридного теплового та фотоелектричного сонячного колектора й подана методика розрахунку теплових характеристик системи теплопостачання з використанням такого геліоколектора. У статті наведено аналіз розрахунку теплових процесів у гібридних сонячних колекторах, які інтегровані у світлопрозорі фасади будівель і споруд. Тут особлива увага зосереджена на визначенні коефіцієнта корисної дії такого пристрою. Дані, представлені у статті, показують, що математична модель процесів теплообміну в гібридному геліоколекторі потребує додаткових експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** сонячна енергія; геліоколектор; гібридний сонячний колектор; фотоелектричний сонячний колектор; тепла продуктивність; геліосистема.

Рис.: 2. Бібл.: 24.

**Актуальність теми дослідження.** На сьогодні дедалі більшого поширення набувають системи сонячного енергопостачання, зокрема гібридні геліоколектори, які конструктивно поєднують у собі два типи – фотоелектричні та теплові. Це дозволяє максимально використовувати сонячне випромінювання, перетворюючи його одночасно в одній установці як в електричну, так і теплову енергію. Особливо це актуально за обмеженої площі для встановлення таких систем. Гібридні геліоколектори можуть працювати ефективно за різних умов - включаючи хмарні дні, ранкову та вечірню дифузію сонячного світла, що забезпечує більшу стабільність в енергопостачанні порівняно з традиційними сонячними енергетичними системами. Використання гібридних геліоколекторів сприяє створенню стабільних і незалежних від зовнішніх факторів систем енергопостачання. Це особливо важливо в умовах збільшення змін клімату та нестабільності в енергетичному секторі, а також забруднення навколишнього середовища.

Гібридні сонячні системи майже не завдають шкоди навколишньому середовищу, оскільки вони використовують безкоштовну та екологічну сонячну енергію. Це призводить до зменшення викидів CO<sub>2</sub> та інших шкідливих речовин в атмосферу, сприяючи збереженню природних ресурсів та зменшенню впливу на зміну клімату. Також впровадження гібридних геліоколекторів може призвести до суттєвого зниження енерговитрат на теплопостачання будівель та збільшення енергетичної незалежності, що стає привабливим для підприємств, громадських установ та приватних осіб.

**Постановка проблеми.** Для проектування систем сонячного теплопостачання з гібридними сонячними колекторами необхідно вживати заходів для широкого впровадження таких систем. Тому важливим є розроблення відповідних конструкцій та проведення досліджень теплофізичних характеристик, щоб максимально забезпечити ефективне використання гібридних сонячних систем і досягти економічності та максимальної ефективності в їх експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Гібридні геліосистеми, що поєднують фотоелектричні та теплові компоненти, нині є предметом значного наукового інтересу через їхню високу ефективність для виробництва як електричної, так і теплової енергії. Аналіз останніх публікацій дає змогу оцінити сучасний стан досліджень у цій галузі та визначити напрями для подальших розробок.

У роботі [1] наведено, що пасивне використання сонячної енергії в архітектурних формах споруд має важливе значення для проектування енергоефективних будівель. У праці [2] зазначено, що для максимального відбору сонячної енергії в умовах обмеженого простору вивчення інтеграції геліосистем у світлопрозорі конструкції будівель є одним з найважливіших підходів у геліотехніці. На даний час існує багато напрацювань використання елементів зовнішніх захищень будівель в якості складових гібридних сонячних систем. Основні з них це геліюпокрівля, геліостіна та геліовікно [3]. Для підвищення ефективності систем сонячного теплопостачання активно застосовують спеціальні гібридні електричні та теплові сонячні приймачі [4]. Одночасно вивчаються їхня структура й особливості для запобігання перегріву та підвищення продуктивності [5]. Окреме місце посідають дослідження різноманітних систем теплозабезпечення на основі гібридних сонячних колекторів. Дані дослідження спрямовані на визначення основних переваг і недоліків використання таких геліоколекторів для енергоефективних будівель [6; 7].

У роботі [8] представлено, що для покращення теплопередачі в гібридних системах окремо досліджені конструктивні особливості та основні теплові характеристики термосифонних сонячних колекторів. Подібні дані наводяться в [9], де досліджуються колектори на основі алюмінієвих канавчатих теплових труб. Відомі геліонагрівники, які інтегровані в скляні фасади будівель. Такі гібридні сонячні колектори містять у своїй конструкції електричні фотопанелі та оребрені трубки, в яких циркулює рідинний теплоносій [10]. У праці [11] наведено дані, що поряд із традиційними матеріалами існують геліоколектори, де абсорбер виготовлений з гофрованого вуглеграфітового трикотажного полотна, яке може бути застосовано в гібридних системах.

Дослідження низько потенціальних енергетичних систем є основним рушієм підвищення ефективності геліосистем загалом [12]. Науковці у своїй праці [13] показують щорічний прогрес технологій використання фотоелектричних теплових колекторів із плоскими водяними збірниками, підкреслюючи їхню ефективність. Сьогодні є вже цілі стратегії стійкого впровадження сонячних іригаційних насосів, адаптованих для роботи з гібридними геліосистемами, які відображені в роботі [14]. Особливу увагу відведено екологічній складовій при використанні гібридних сонячних колекторів як покриття будівель [15]. Також у джерелах [16; 17] наведено дані про проведення безліч предметних оцінок ресурсного потенціалу сонячної електро- та теплоенергетики для модернізації систем теплопостачання населених пунктів України.

Огляд літератури показав значний прогрес у розробці гібридних геліосистем та їх інтеграції в архітектурні конструкції будівель. Подальші дослідження мають бути спрямовані на покращення теплових і електричних характеристик таких систем, а також на оптимізацію їхніх конструктивних рішень для підвищення ефективності та зменшення витрат на енергію.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Аналіз останніх публікацій та досліджень показав, що питання вибору та проектування вищезгаданих гібридних геліоколекторів на сьогодні є обмеженим, оскільки такі системи мало досліджені. Особливо немає вичерпних даних, щодо теплотехнічних характеристик таких систем, а також актуальних методик їх розрахунку.

**Метою статті** є розробка та формування методики розрахунку теплових характеристик запропонованої конструкції гібридного геліоколектора.

**Виклад основного матеріалу.** Сьогодні сфера геліоенергетики стрімко розвивається та створюються нові види та типи сонячних колекторів. На основі аналізу відповідних праць [18; 19; 20] було систематизовано класифікацію сонячних колекторів (рис. 1).

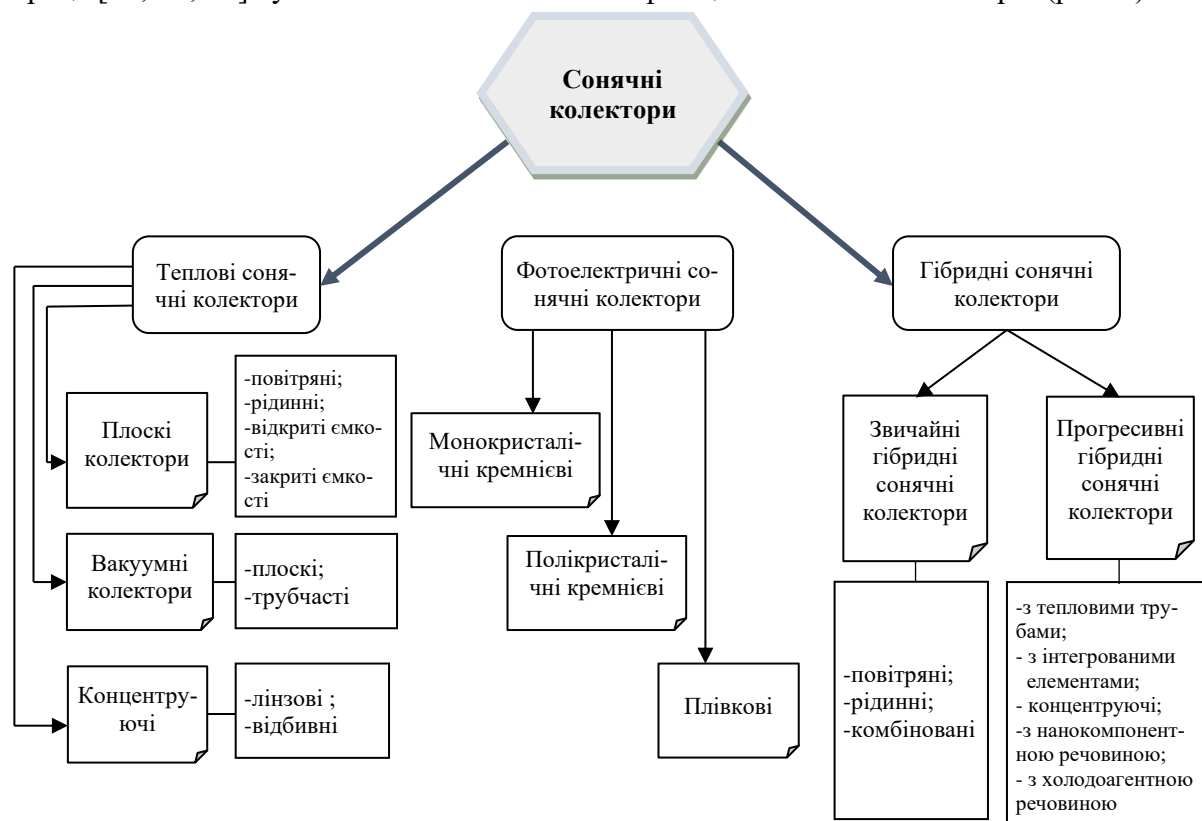


Рис. 1. Узагальнена класифікація сонячних колекторів

Джерело: розроблено авторами.

На основі огляду літературних джерел [21; 22] та даних з рис. 1 можна побачити, що на сьогодні з'явився новий тип сонячних колекторів, а саме – гібридні геліоколектори, які активно розвиваються та набувають широкого вжитку. Наведені дані вказують, що системи з такими сонячними колекторами можуть водночас здійснювати генерацію, як електричної так і теплової енергії. Це, в свою чергу, дозволяє кінцевому споживачу обирати пріоритетність того чи іншого рішення. Ці характеристики можна використати в єдиному схемному рішенні, якщо поєднати в одну конструкцію фотоелектричний і тепловий сонячний колектор. До того ж, враховуючи зростаючу популярність скляних світлопрозорих фасадів на будівлях, є можливість інтегрувати гібридні геліоколектори з такими фасадами.

Для вирішення поставленого завдання, в галузі енергоефективного будівництва, оптимальним рішенням є тепловий та фотоелектричний гібридний сонячний колектор. З метою дослідження теплових- та електричних характеристик запропонованої конструкції розроблено модель гібридного сонячного колектора (рис. 2). Ця модель на етапі теоретичних досліджень сприятиме ефективному вирішенню ряду задач, перед практичним

застосуванням. На рис. 2 наведено схему теплового фотоелектричного гібридного сонячного колектора, конструкція якого містить вертикальні ролети з ламелями, на які закріплено фотоелектричні елементи.

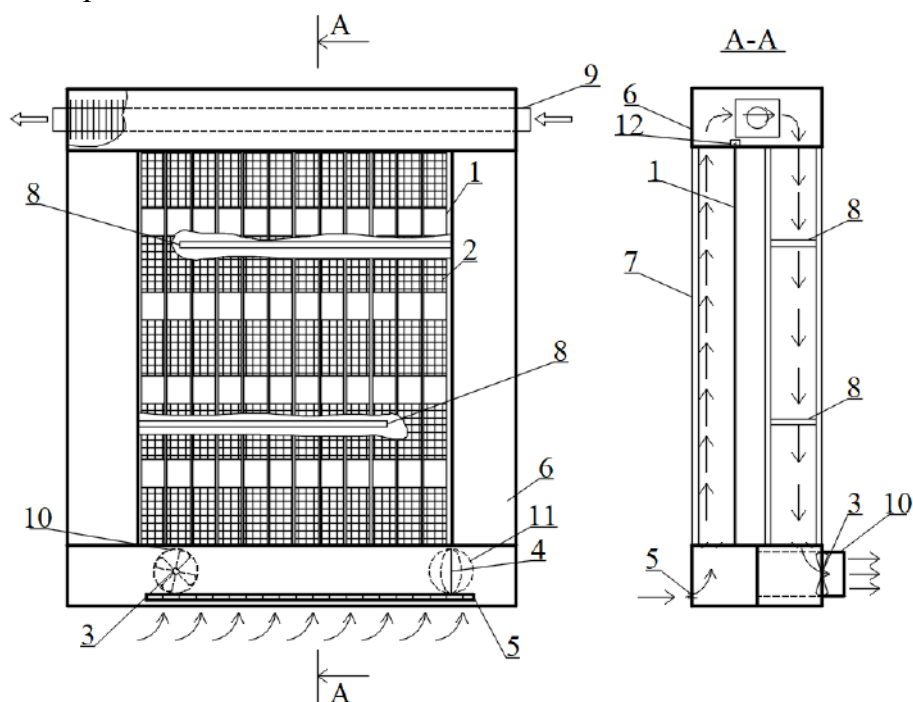


Рис. 2. Гібридний геліоколектор

- 1 – ламелі, 2 – фотоелектричні модулі, 3 – вентилятор, 4 – повітряний клапан,  
 5 – решітка щілинного типу, 6 – корпус, 7 – енергозберігаючі склопакети,  
 8 – скляні поперечні неповні перегородки, 9 – теплообмінник, 10 – вхідний патрубок,  
 11 – вихідний патрубок, 12 – механізм повороту.

Джерело: розроблено авторами.

Гібридний геліоколектор працює таким чином: сонячне випромінювання проходить крізь енергозберігаючі склопакети 7 та потрапляє на ламелі 1, що мають можливість повороту навколо своєї осі, на поверхні яких розміщені фотоелектричні модулі 2, які в подальшому перетворюють сонячну енергію в електричну для живлення вентилятора 3 та для потреб споживача, одночасно сонячне випромінювання нагріває корпус скляного фасаду будівлі 6, в якому розміщено теплообмінник з теплоносієм 9. Завдяки вбудованому вентилятору 3 нагріте повітря через вихідний та вхідний патрубки циркулює між шибками склопакету 7 та між скляними перегородками 8, а за допомогою решітки щілинного типу 5 та повітряному клапану 4 є можливість вибору режиму роботи: із забором свіжого повітря чи без. Поворотний механізм 12 застосовують для руху фотоелектричних модулів 2 навколо своєї осі та забору ламелей 1, тим самим регулюючи надходження сонячного випромінювання безпосередньо в приміщення.

Якщо говорити про світлопрозорі фасади, то дані елементи виконуватимуть функцію штор. Для житлових будівель є рекомендація, що частка звичайного засклення повинна бути не більше ніж 18 %, а для громадських будівель – 25 % залежно від архітектурно-кліматичної зони. Але фактично даний показник переважно перевищений, що вимагає обов'язкового застосування сонцезахисних конструкцій. Також ролети з ламелями додатково можуть захищати приміщення в будівлях, до яких немає особливих нормативних вимог щодо інсоляції. Вибір напрямку влаштування фотоелементів та їхній розмір для

конструкції гібридного сонячного колектора розраховується згідно геометричних параметрів, які встановлюються за комплексними картами сонячної активності. Під час вибору сонячного колектора важливо звертати увагу на відповідність ключовим показникам якості: безпека, продуктивність та ефективність. Крім того, слід враховувати загальну площу колектора та температурні параметри. Ці характеристики можна визначити за допомогою методик розрахунку теплових і електричних сонячних колекторів.

Методики випробування сонячних колекторів засновані на використанні різних математичних моделей, що враховують міжнародні стандарти тестування та умови отримання сонячної енергії. При виборі методів випробування дотримуються стандартів ISO. В Україні ці випробування проводяться відповідно до вимог ДСТУ. Щоб дослідити ту чи іншу конструкцію геліоколекторів використовують як натурні, так і лабораторні способи досліджень, які в свою чергу бувають стаціонарні та нестаціонарні.

Лабораторні дослідження можуть проводитися з використанням імітаторів сонячного випромінювання або без них. У разі відсутності такого імітатора, геліоколектор розглядається, як звичайний теплообмінний пристрій, досліджений у роботі [23]. Під час лабораторних випробувань не враховуються зміни метеорологічних умов. Водночас натурні дослідження супроводжуються неконтрольованими факторами, зумовленими метеозмінами довкілля. Тому лабораторні випробування застосовуються для визначення загального коефіцієнта теплових втрат у колекторі, а натурні – для оцінки його оптичних характеристик.

Коефіцієнт корисної дії теплового сонячного колектора визначають за формулою:

$$\eta_{ТСК} = \eta_0 - U_{\text{конв}} \cdot X - U_{\text{випром}} \cdot I_e \cdot X^2, \quad (1)$$

де  $\eta_0$  – ступінь ефективності геліоколектора коли тепловтрати відсутні;  $U_{\text{конв}}$  і  $U_{\text{випром}}$  – коефіцієнти тепловтрат конвекцією та випромінюванням відповідно, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $I_e$  – інтенсивність сонячного випромінювання, Вт/м<sup>2</sup>;  $X$  – відношення різниці температур між сонцепоглинаючою поверхнею сонячного колектора  $t_{СПП}$ , C і зовнішньою температурою  $t_z$ , °C, до величини  $I_e$ , (м<sup>2</sup>·°C)/Вт.

Для порівняння різного типу, виду й конструкцій геліоколекторів застосовують так званий  $f$ -метод розрахунку системи сонячного теплозабезпечення [24]. Цей метод базується на даних тривалих спостережень з використанням математичної моделі для побудови рівнянь регресії, які описують залежність  $f$ -методу від значень двох безрозмірних комплексів. Першим таким є  $x$ -комплекс. Показує відношення втрат тепла сонячним колектором протягом місяця дотримуючись значення певної фіксованої (базової) температури до теплового навантаження за місяць (2):

$$x = \frac{A \cdot f_R \cdot k_{СПП-Д} \cdot (t_{\text{баз}} - t_{\text{н.сер}}^{\text{міс}}) \cdot \Delta \tau}{J_{\text{н.сер}}^{\text{міс}}}, \quad (2)$$

де  $A$  – площа адсорбера (сонцесприймаючої поверхні) геліоколектора, м<sup>2</sup>,  $k_{СПП-Д}$  – коефіцієнт теплопередачі між сонцесприймаючою поверхнею та оточуючим середовищем, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_{\text{баз}}$  – базова температура, °C;  $t_{\text{н.сер}}^{\text{міс}}$  – температура навколишнього середовища протягом місяця, °C;  $\Delta \tau$  – час роботи геліоколектора за місяць, с. Формула (2) є доцільною для теплових сонячних колекторів, в яких теплоносієм є повітря.

$y$ -комплекс – це другий комплекс. Він відображає, як поглинута сонячна радіація відноситься до теплового навантаження за певний визначений проміжок часу:

$$y = \frac{A \cdot f_R \cdot (\tau \cdot \alpha) \cdot j_{\text{над}}^{\text{дн}} \cdot N}{J_{\text{нав}}^{\text{міс}}}, \quad (3)$$



де  $(\tau \cdot \alpha)$  – приведена усереднена поглинальна здатність ( $\tau$  – пропускна здатність системи покриття для розрахункового кута падіння сонячного випромінювання;  $\alpha$  – поглинаюча направлена здатність поглинаючого покриття;  $j_{\text{над}}^{\text{дн}}$  – інтегральний денний потік теплової енергії, яка надходить (падає) на покриття кДж/м<sup>2</sup>;  $N$  – кількість днів роботи сонячного колектора за місяці;  $J_{\text{наб}}^{\text{міс}}$  – місячне теплове навантаження потоку енергії, кДж. Вважається, що  $f$ -метод є найуніверсальнішим. Однак одночасно є складним, якщо виконувати оптимізаційні розрахунки.

Коефіцієнт корисної дії поглинальної здатності геліоколектора можна визначити за таким співвідношенням:

$$\eta = f_R^{cp} \left[ (\tau \cdot \alpha) - \frac{U_{\text{нов}} \cdot (\bar{t} - t_3)}{I_g} \right], \quad (4)$$

де  $f_R^{cp}$  – коефіцієнт відводу теплової енергії (за Європейською практикою);  $U_{\text{нов}}$  – повний коефіцієнт теплопередачі теплових втрат геліоколектора, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\bar{t}$  – середня температура сонячного колектора, °С;  $t_3$  – температура оточуючого середовища, °С. Формула (4) відображає лінійний зв'язок між ККД геліоколектора і приведеною температурою, коли виконується умова, що повний коефіцієнт теплопередачі теплових втрат сонячного колектора є постійною величиною.

При натурних дослідженнях американська асоціація ASHRAE рекомендує ККД геліоколектора визначати за допомогою наступного рівняння:

$$\eta = f_R \cdot (\tau \cdot \alpha)_n - F_R \cdot U_{\text{нов}} \cdot \frac{t_{\text{вх}} - t_3}{I_g}, \quad (5)$$

де  $f_R$  – коефіцієнт відводу теплової енергії згідно американської практики.

Коли невідоме значення коефіцієнта відведення теплоти, то ККД теплового геліоколектора визначають, як відношення повної теплопродуктивності такого геліоколектора до інтенсивності сонячного випромінювання, яке надійшло на поверхню сонячного колектора загалом:

$$\eta_{\text{ТСК}} = \frac{q_{\text{пов}}}{I_g}, \quad (6)$$

де  $q_{\text{пов}}$  – наведена повна теплопродуктивність теплового сонячного геліоколектора, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q_{\text{пов}} = (\dot{m} \cdot c_p)_{\text{СК}} \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}), \text{ Вт/м}^2, \quad (7)$$

де  $\dot{m}$  – приведена масова витрата теплоносія через сонячний колектор, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Отже, основні критерії, що впливають на ККД геліоколектора є:

1. Інтенсивність сонячного випромінювання
2. Температура оточуючого середовища;
3. Конструктивні особливості сонячного колектора, його світлопропускні властивості та властивості, які показують, наскільки ефективно геліоколектор поглинає тепло;
4. Характеристики сонячного колектора, які були початково виставлені: кут встановлення геліоколектора, витрата теплоносія, температура рідинного теплоносія на вході.

На ефективність геліоколектора значно впливає зміна азимута або кута нахилу абсорбера відносно теплового потоку. Крім того, важливу роль відіграють метеорологічні умови, такі як швидкість, напрямок, частота вітру, забруднення пилом і затінення. Зокрема, при куті нахилу колектора від 0 до 50° щодо горизонту вплив забруднення може досягати близько 5 %.

Для сонячних колекторів з фотоелементами використовуються інші методики розрахунку їхніх параметрів.

**Висновки.** За останні кілька десятиліть, все більше науковців спрямовують свої дослідження на розробку, вдосконалення та вивчення комбінованих систем сонячного теплопостачання на основі гібридних геліоколекторів, які, порівняно з традиційними тепловими чи фотоелектричними, мають покращену загальну теплопродуктивність.

Дослідження різних конструкцій гібридних сонячних колекторів є дуже важливими у вдосконаленні сучасних енергетичних систем та сприяє постійному розвитку технологій використання сонячної енергії. Розуміння їхнього потенціалу та впровадження новітніх розробок у цій області є критичними для досягнення енергетичної стійкості, сталого економічного розвитку та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Проведений аналіз вказує на недостатню кількість досліджень у сфері гібридних геліоколекторів, особливо щодо їхніх теплотехнічних характеристик і методик розрахунку. Авторами визначено стан розвитку геліотеплотехніки на сьогодні та розглянуто наявні на ринку системи. На основі цього аналізу розроблено конструкцію гібридного сонячного колектора і запропоновано методики для розрахунку його теплових характеристик. Отримані результати є важливими для подальших досліджень та практичного впровадження гібридних геліоколекторів у різні сфери енергетики

Незважаючи на велику кількість запропонованих конструкцій гібридних сонячних колекторів, практичних рішень стосовно їхнього застосування є дуже мало, тому необхідно продовжувати подальші експерименти та дослідження, особливо у напрямку інтеграції таких систем у світлопрозорі конструкції будівель.

#### Список використаних джерел

1. Давиденко, С. П. Пасивне використання сонячної енергії в архітектурних формах / С. П. Давиденко // Енергоефективність в будівництві та архітектурі. – 2016. – № 8. – С. 107-112.
2. Венгрин, І. І. Енергоефективні геліосистеми, інтегровані в світлопрозорі конструкції будівель : дис. ... канд. техн. наук / І. І. Венгрин ; Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2022.
3. Шаповал, С. П. Використання сонячної теплової енергії за рахунок комбінованого геліовікна / С. П. Шаповал // Енергоефективність в будівництві та архітектурі. – 2017. – № 9. – С. 250-253.
4. A Hybrid Electric and Thermal Solar Receiver / L. A. Weinstein, K. McEnaney, E. Strobach, S. Yang, B. Bhatia, L. Zhao, Y. Huang, J. Loomis, F. Cao, S. V. Boriskina, Z. Ren, E. N. Wang, G. Chen // *Joule*. – 2018. – Vol. 2, № 5. – Pp. 962-975. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.02.009>.
5. Jun, Y.-J. A study on the structure of Solar/Photovoltaic Hybrid system for the purpose of preventing overheat and improving the system performance / Y.-J. Jun, K.-S. Park, Y.-H. Song // *Solar Energy*. – 2021. – Vol. 230. – Pp. 470-484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.019>.
6. Шаповал, С. П. Система теплозабезпечення будівель на основі гібридних сонячних колекторів [Електронний ресурс] / С. П. Шаповал, Б. І. Гулай, М. Є. Касинець, Ю. В. Пришляк // Екологія. Ресурси. Енергія: багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях: робоча програма та тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції. – Київ : Київський національний університет будівництва і архітектури, 2023. – С. 69-70. – Режим доступу: <https://is.lpnu.ua/sciencelp/research/nonparticlesedit.aspx?id=129091>.
7. Shapoval, S. Building heat supply system based on hybrid solar collectors / S. Shapoval, M. Kasynets, B. Gulai, Y. Prishlyak // *Theory and Building Practice*. – 2023. – Vol. 5, № 2. – Pp. 55-60. DOI: <https://doi.org/10.23939/jtbp2023.02.055>.

8. Желих, В. М. Визначення теплових характеристик термосифонного сонячного колектора / В. М. Желих // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. – 2012. – № 742. – С. 75-78.
9. Козак, Д. В. Теплотехнічні характеристики комбінованого сонячного колектора на основі алюмінієвих канавчатих теплових труб : дис. ... канд. техн. наук / Д. В. Козак ; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ, 2018.
10. Венгрин, І. Дослідження сонячних колекторів, інтегрованих в конструкцію скляного фасаду будівлі/споруди: необхідність та особливості / І. Венгрин // Theory and Building Practice. – 2019. – Vol. 1, № 1. – С. 38-46. DOI: 10.23939/jtbp2019.01.038.
11. Приймак, О. В. Дослідження тепловідачі абсорбера сонячного повітропідігрівача виготовленого з гофрованого вуглеграфітового трикотажного полотна [Електронний ресурс] / О. В. Приймак, П. О. Пасічник // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. – 2016. – № 1. – С. 85–91. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vknutd\\_2016\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vknutd_2016_1_12).
12. Низькопотенціальна енергетика: навч. посіб. / А. О. Редько, М. Н. Безродний, М. В. Загорченко, О. Ф. Редько, Г. С. Ратушняк, М. І. Хмельнюк. – Київ : Друкарня Мадрид, 2016.
13. Technology Progress on Photovoltaic Thermal (PVT) Systems with Flat-Plate Water Collector Designs: A Review [Electronic resource] / A. L. Abdullah, S. Misha, N. Tamaldin, M. A. M. Rosli, F. L. A. Sachit // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2019. – Vol. 59, № 1. – Pp. 107-141. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/287241394.pdf>.
14. Agrawal, Sh. Sustainable deployment of solar irrigation pumps: Key determinants and strategies [Electronic resource] / Sh. Agrawal, A. Jain // WIREs Energy and Environment. – 2018. – Vol. 8, № 2. – Pp. 325. – Accessed mode: <https://www.ceew.in/sites/default/files/Agrawal-Jain-2018-Sustainable-solar-irrigation.pdf>.
15. Efficiency Improvement of Eco-Friendly Solar Heat Supply System as a Building Coating (Open Access) / O. Voznyak, N. Spodyniuk, I. Antypov, E. Dudkiewicz, M. Kasynets, O. Savchenko, S. Tarasenko // Sustainability (Switzerland). – 2023. – Vol. 15, № 3. – Article 2831. DOI: 10.3390/su15032831.
16. Басок, Б. І. Оцінка ресурсного потенціалу сонячної електроенергетики у Одеській області / Б. І. Басок, Ю. А. Веремійчук. – Київ : Видавничий дім «Калита», 2018.
17. Модернізація системи теплопостачання населених пунктів України / Б. І. Басок, О. В. Новосельцев, С. В. Дубовський, Є. Т. Базеев // Теплофізика, Енергоефективність, Енерго-економіка, Екологія. – Київ : Видавничий дім «Калита», 2018.
18. Analysis of a hybrid solar collector photovoltaic thermal (PVT) / A. Khelifa, K. Touafek, B. Moussa, H. Tabet, B. Cheikh, E. Hocine, H. Haloui // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 74. – Pp. 835-843. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.819.
19. Solar-thermal and hybrid photovoltaic-thermal systems for renewable heating / A. Ramos, I. Guarracino, A. Mellor, D. Alonso-Álvarez, P. Childs, N. J. Ekins-Daukes, C. N. Markides // Briefing paper. – 2017. – Vol. 22. DOI: 10.13140/RG.2.2.10473.29280.
20. Ramos, F. Hybrid Photovoltaic-Thermal Collectors / F. Ramos, A. Cardoso, A. Alcaso // IFIP Advances in Information and Communication Technology. – 2010. – Vol. 314. – Pp. 477-484. DOI: 10.1007/978-3-642-11628-5\_53.
21. Calise, F. Experimental and numerical analyses of a flat plate photovoltaic/thermal solar collector / F. Calise, R. D. Figaj, L. Vanoli // Energies. – 2017. – Vol. 10, № 4. – Pp. 1-21. DOI: 10.3390/en10040491.
22. Кувшинов, В. В. Методи розрахунку і підвищення ефективності використання теплофотоелектричних установок [Електронний ресурс] / В. В. Кувшинов // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. – 2013. – № 3. – С. 166-171. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpsnu\\_2013\\_3\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpsnu_2013_3_25).

23. Василюха, Х. В. Вдосконалення нормативно-технічної бази випробувань сонячних перетворювачів : дис. ... канд. техн. наук : 05.01.02 / Василюха Христина Василівна ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Львів, 2017. – 202 с.

24. Козак, Д. В. Теплотехнічні характеристики комбінованого сонячного колектора на основі алюмінієвих канавчатих теплових труб: дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06 / Д. В. Козак; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ, 2018. – 227 с.

### References

1. Davydenko, Ye.P. (2016). Pasyvne vykorystannia soniachnoi enerhii v arkhitekturykh formakh [Passive use of solar energy in architectural forms]. *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi – Energy Efficiency in Construction and Architecture*, (8), 107-112.

2. Venhryn, I.I. (2022). Enerhoefektyvni heliosystemy intehrovani v svitloprozori konstrukttsii budivel [Energy-efficient solar systems integrated into transparent building structures]. *Candidate's thesis*. Natsionalnyi Universytet «Lvivska politekhnika».

3. Shapoval, S.P. (2017). Vykorystannia soniachnoi teplovoi enerhii za rakhunok kombinovanoho heliovikna [Use of solar thermal energy through combined solar windows]. *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi – Energy Efficiency in Construction and Architecture*, 9, 250-253.

4. Weinstein, L. A., et al. (2018). A Hybrid Electric and Thermal Solar Receiver. *Joule*, 2(5), 962-975. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.02.009>.

5. Jun, Y.-J., Park, K.-S., & Song, Y.-H. (2021). A study on the structure of Solar/Photovoltaic Hybrid system for the purpose of preventing overheat and improving the system performance. *Solar Energy*, 230, 470-484. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.019>.

6. Shapoval, S.P., Hulai, B.I., Kasynets, M.Ye., Pryshliak, Yu.V. (2023). Systema teplozabezpechennia budivel na osnovi hibrydnykh soniachnykh kolektoriv [Building heat supply system based on hybrid solar collectors]. *Ekolohiia. Resursy. Enerhiia: bahatofunktsionalni eko – ta enerhoefektyvni, resursozberihaiuchi tekhnolohii v arkhitekturi, budivnytstvi ta sumizhnykh haluziakh – Ecology. Resources. Energy: Multifunctional eco- and energy-efficient, resource-saving technologies in architecture, construction, and related industries: working program and abstracts of the VI International Scientific and Practical Conference* (pp. 69–70). Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury. <https://is.lpnu.ua/sciencelp/research/nonparticlesedit.aspx?id=129091>.

7. Shapoval, S., Kasynets, M., Gulai, B., Prishlyak, Y.(2023). Building heat supply system based on hybrid solar collectors. *Theory and Building Practice*, 5(2), 55–60. <https://doi.org/10.23939/jtbp2023.02.055>.

8. Zhelykh, V.M. (2012). Vyznachennia teplovykh kharakterystyk termosyfonnoho soniachnoho kolektora [Determination of thermal characteristics of a thermosyphon solar collector]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Teoriia i praktyka budivnytstva – Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" Theory and Building Practice*, 742, 75–78.

9. Kozak, D.V. (2018). Teplotekhnichni kharakterystyky kombinovanoho soniachnoho kolektora na osnovi aliuminiievnykh kanavchatykh teplovykh trub [Thermal characteristics of a combined solar collector based on aluminum grooved heat pipes]. *Candidate's thesis*. Natsionalnyi Tekhnichniy Universytet Ukrainy «Kyivskiy politekhnichniy instytut imeni Ihoria Sikorskoho».

10. Venhryn, I. (2019). Doslidzhennia soniachnykh kolektoriv, intehrovanykh v konstrukttsiiu sklianoho fasadu budivli/sporudy: neobkhdnist ta osoblyvosti [Study of solar collectors integrated into the glass facade structure of a building: necessity and features]. *Theory and Building Practice*, 1(1), 38-46. doi: 10.23939/jtbp2019.01.038.

11. Pryimak, O. V., Pasichnyk, P. O. (2016). Doslidzhennia teploviddachi absorbera soniachnoho povitropidhrivacha vyhotovlenoho z hofrovanoho vuhlegrafitovoho trykotazhnogo polotna [Study of heat transfer of a solar air heater absorber made of corrugated carbon-graphite knitted fabric]. *Visnyk Kyivskoho Natsionalnoho Universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Seriya: Tekhnichni nauky*, 1, 85-91. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkntud\\_2016\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkntud_2016_1_12).

12. Redko, A.O., Bezrodnyi, M.N., Zahoruchenko, M.V., Redko, O.F., Ratushniak, H.S., Khmelniuk, M.I. (2016). *Nyzkopotentsialna enerhetyka [Low-potential energy]*. TOV «Drukarnia Madryd».
13. Abdullah, A.L., Misha, S., Tamaldin, N., Rosli, M.A.M., Sachit, F.L.A. (2019). Technology Progress on Photovoltaic Thermal (PVT) Systems with Flat-Plate Water Collector Designs: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 59(1), 107-141. <https://core.ac.uk/download/pdf/287241394.pdf>.
14. Agrawal, Sh., Jain, A. (2018). Sustainable deployment of solar irrigation pumps: Key determinants and strategies. *WIREs Energy Environ*, 8(2), 325. <https://www.ceew.in/sites/default/files/Agrawal-Jain-2018-Sustainable-solar-irrigation.pdf>.
15. Voznyak, O., Spodyniuk, N., Antypov, I., Dudkiewicz, E., Kasynets, M., Savchenko, O., & Tarasenko, S. (2023). Efficiency Improvement of Eco-Friendly Solar Heat Supply System as a Building Coating. *Sustainability*, 15(3), Article No. 2831. DOI:10.3390/su15032831.
16. Basok, B.I., Veremiichuk, Yu.A. (2018). *Otsinka resursnoho potentsialu soniachnoi elektroenerhetyky u Odeskii oblasti [Assessment of solar energy resource potential in the Odesa region]*. Vydavnychiy dim «Kalyta».
17. Basok, B.I., Novoseltsev, O.V., Dubovskyi, S.V., Bazieiev, Ye.T. (2018). Modernizatsiia systemy teplopostachannia naselenykh punktiv Ukrainy [Modernization of heat supply systems in Ukrainian settlements]. *Teplofizyka, Enerhoefektyvnist, Enerhoekonomika, Ekolohiia – Thermophysics, Energy Efficiency, Energy Economics, Ecology*. Vydavnychiy dim «Kalyta».
18. Khelifa, A., Touafek, K., Moussa, B., Tabet, H., Cheikh, B., Hocine, E., Haloui, H. (2015). Analysis of a hybrid solar collector photovoltaic thermal (PVT). *Energy proceding*, 74, 835-843. doi:10.1016/j.egypro.2015.07.819.
19. Ramos, A., Guarracino, I., Mellor, A., Alonso-Elvarez, D., Childs, P., Ekins-Daukes, N. J., Markides, C. N. (2017). Solar-thermal and hybrid photovoltaic-thermal systems for renewable heating. *Briefing paper*, 22. doi:10.13140/RG.2.2.10473.
20. Ramos, F., Cardoso, A., Alcaso, A. (2010). Hybrid Photovoltaic-Thermal Collectors. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 314, 477-484. doi:10.1007/978-3-642-11628-5\_53.
21. Calise, F., Figaj, R. D., Vanoli, L. (2017). Experimental and numerical analyses of a flat plate photovoltaic/thermal solar collector. *Energies*, 10(4), 1-21. doi:10.3390/en10040491.
22. Kuvshynov, V. V. (2013). Metody rozrakhunku i pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannia teplofotoelektrychnykh ustanovok [Methods for calculating and improving the efficiency of photovoltaic thermal installations]. *Zbirnyk naukovykh prats Sevastopolskoho natsionalnoho universytetu yadernoi enerhii ta promyslovosti – Collection of scientific works of the Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry*, 3, 166-171. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpsnu\\_2013\\_3\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpsnu_2013_3_25).
23. Vasylykha, Kh. V. (2017). *Vdoskonalennia normatyvno-tekhnichnoi bazy vyprobuvan soniachnykh peretvoriuvachiv [Improvement of the regulatory and technical base for testing solar converters]*. [PhD dissertation; Natsionalnyi Universytet «Lvivska politekhnika»].
24. Kozak, D.V. (2018). Teplotekhnichni kharakterystyky kombinovanoho soniachnoho kolektora na osnovi aliuminiievnykh kanavchatykh teplovykh trub [Thermal characteristics of a combined solar collector based on aluminum grooved heat pipes]. *Candidate's thesis*. Natsionalnyi Tekhnichniy Universytet Ukrainy «Kyivskyi politekhnichniy instytut imeni Ihoria Sikorskoho».

Отримано 23.09.2024

**Stepan Shapoval<sup>1</sup>, Yurii Pryshliak<sup>2</sup>, Bogdan Gulai<sup>3</sup>,  
Mykola Gensetskyi<sup>4</sup>, Mariana Kasynets<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation  
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [stepan.p.shapoval@lpnu.ua](mailto:stepan.p.shapoval@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4985-0930>. **ResearcherID:** [S-3421-2017](https://orcid.org/0000-0003-4985-0930)

<sup>2</sup>Postgraduate of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation  
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [yurii.v.pryshliak@lpnu.ua](mailto:yurii.v.pryshliak@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-0511-2568>. **ResearcherID:** [LGZ-2116-2024](https://orcid.org/0009-0001-0511-2568)

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation  
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [bogdan.i.gulai@lpnu.ua](mailto:bogdan.i.gulai@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6951-6994>. **ResearcherID:** [V-7301-2017](https://orcid.org/0000-0001-6951-6994)

<sup>4</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Lviv Technical and Economic College of Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [gens2005@ukr.net](mailto:gens2005@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0460-8131>. **ResearcherID:** [LGZ-8263-2024](https://orcid.org/0000-0002-0460-8131)

<sup>5</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation  
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [mariana.y.kasynets@lpnu.ua](mailto:mariana.y.kasynets@lpnu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7686-7482>. **ResearcherID:** [V-7536-2017](https://orcid.org/0000-0002-7686-7482)

## **ENERGY-EFFICIENT HYBRID SOLAR COLLECTORS INTEGRATED INTO TRANSPARENT BUILDING STRUCTURES**

*The article addresses current issues related to the use of hybrid solar collectors that combine photovoltaic and thermal components for maximum utilization of solar radiation. The advantages of such systems in space-constrained conditions and their efficiency under various weather conditions are analyzed. The importance of creating stable and independent energy supply systems, unaffected by external factors, is emphasized, which is particularly relevant in the context of climate change and instability in the energy sector. The environmental benefits of hybrid solar collectors, which reduce CO<sub>2</sub> and other harmful emissions, are highlighted. The challenges associated with the design and implementation of such solar collectors, as well as the need to study their thermophysical characteristics, are outlined. The aim of the article is to conduct a detailed analysis of the development of solar thermal technology, verify existing solar collectors, and develop a method for calculating their thermal characteristics to improve efficiency.*

*The article also explores various types of solar collectors and compiles their classification, including hybrid ones. A review of sources shows that hybrid solar collectors, which use liquid heat carriers to convert solar radiation into thermal energy, are available on the market. Currently, it is known that approximately 90% of solar radiation is absorbed by the surface of photovoltaic collectors, but only 15% is converted into electrical energy and 10% into thermal energy.*

*A design of a hybrid solar collector with a heat exchanger, in which a liquid heat carrier circulates, and with vertical slats where photovoltaic elements are mounted, has been developed. These solutions allow such a solar collector to be integrated into the external envelope of a building.*

*A model of the hybrid solar collector has been developed to study its thermal and electrical properties. The drawings show that photovoltaic elements can be applied to vertical shutters, which is a practical solution for buildings with transparent facades. This model will effectively support research and help solve the tasks before practical application begins.*

*The article presents methods for calculating the thermal parameters of the hybrid solar collector, based on various mathematical models. These methods show that as the ambient temperature decreases, the electrical characteristics of the system improve with constant solar radiation. Research is conducted using natural and laboratory methods, which are divided into stationary and non-stationary types. The thermal efficiency coefficient of the solar collector is determined by formulas that account for efficiency, heat losses, and solar radiation intensity.*

*The authors provide equations indicating that the efficiency of the hybrid solar collector is influenced by its design features, meteorological factors, pollution, and the tilt angle of the collector.*

**Keywords:** hybrid solar collector; solar radiation; energy sector; heat exchanger; thermal energy; photovoltaic elements; thermal efficiency coefficient.

*Fig.: 2. References: 24.*

**Сергій Миколайович Заворотний**

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [zavorotnyiserhii@ukr.net](mailto:zavorotnyiserhii@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2139-8877>. ResearcherID: [KIB-2615-2024](https://pubs.rsos.royalsocietypublishing.org/author/KIB-2615-2024)

**АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕТОДІВ  
МОНІТОРИНГУ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД ОБ'ЄКТІВ  
ІСТОРИКО-КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ**

*У роботі виконано аналіз сучасних інженерно-геодезичних методів моніторингу будівель і споруд з урахуванням особливостей моніторингу об'єктів історико-культурної спадщини. Розглянуто практичний досвід створення нової основи для подальшого моніторингу історичної будівлі міста Вроцлав із висвітленням особливостей створення мережі контрольних точок для періодичного моніторингу деформацій. Наведений найбільш ефективний метод моніторингу розкриття тріщин у будівлях чи спорудах історико-культурного значення на основі практичного досвіду.*

**Ключові слова:** інженерно-геодезичний моніторинг; деформації; будівлі та споруди; нівелювання; опорна мережа.

*Рис.: 4. Бібл.: 9.*

**Актуальність теми дослідження.** В умовах війни одним із найбільш важливих питань після збереження та відновлення територіальної цілісності України є збереження об'єктів історико-культурної спадщини. Місто Чернігів є одним із найбільш древніх міст України, будівлі та споруди історико-культурної спадщини якого мають не тільки місцеве, а й державне значення. Оскільки ці будівлі мають значний період експлуатації виникає необхідність створення моніторингової бази та виконання на її основі періодичного моніторингу об'єктів сучасними методами для уникнення непередбачених руйнівних деформацій унаслідок вибухів та вібрацій пов'язаних із ними. З метою контролю за можливими деформаційними процесами будівель та споруд використовують методи інженерно-геодезичні методи моніторингу. Ця стаття має оглядовий характер та призначена тільки для аналізу наявних методів.

**Постановка проблеми.** Геодезичний моніторинг будівель та споруд включає складну систему вимірювань, фіксації отриманих результатів та їх аналітичної обробки, з метою визначення можливих деформацій. Зазвичай моніторинг виконується в період будівництва та перших років після завершення (залежно від складності об'єкта), коли виникають найбільші деформації. Інші деформації можуть бути спричинені техногенними впливами, допущенням помилок при проектуванні чи в процесі будівництва, використаням неякісних будівельних матеріалів, неправильна експлуатація тощо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Нормативне забезпечення проведення геодезичного моніторингу регламентується нормативною базою [1-4]. Питанням геодезичного моніторингу будівель та споруд займаюся такі вітчизняні науковці, як М. С. Яковенко, Є. В. Зорін, Ю. Б. Мелашенко, О.В. Нестеренко. Зокрема, у роботі [5] викладено матеріали багаторічного досвіду моніторингу будівель та споруд. Методи геодезичного моніторингу висвітлені в роботі [6]. Частково у своїх роботах розглянули інженерно-геодезичний моніторинг історичних будівель розглянуто в роботі [7]

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Виконавши аналіз літературних джерел було визначено, що велику увагу приділяють питанню інженерно-геодезичному моніторингу нового будівництва та супроводу під час процесу осідання об'єкта, водночас проблема моніторингу будівель та споруд історико-культурної спадщини висвітлено частково або відсутні.

**Метою статті** є проведення аналізу сучасних інженерно-геодезичних методів моніторингу будівель та споруд з метою можливості їх використання для збереження об'єктів історико-культурної спадщини міста Чернігова.

**Виклад основного матеріалу.** Будівлі історико-культурної спадщини міста Чернігова є не від'ємною частиною історичного надбання України, об'єкти якого були побудовані майже тисячу років тому. Одним з яскравих представників є Спасо-Преображенський собор, який є одним із найдавніших храмів Русі (1033-1034 рр.). До таких факторів належать: власна вага об'єкта чи комплексу, додаткові навантаження чи їхня динамічна зміна (наприклад, тиск вітру), динамічні впливи (наприклад, вібрації), нестабільності основи, зміни температурних режимів та вологість, тиск води або льоду, якщо будівлі чи споруди знаходяться поблизу водойм, утворення карстів, помилки та недосконалості, що допущені під час будівництва, втрата пружних властивостей та міцнісних характеристик будівельних матеріалів та інше [2].

З метою усунення передчасного руйнування та запобігання знищенню будівель та споруд історико-культурної спадщини Чернігова, необхідно проводити періодичний геодезичний моніторинг. Сучасні інженерно-геодезичні методи моніторингу будівель та споруд, що застосовуються в цивільному будівництві, надають можливість завчасно виявити недопустимі деформації та передбачити незворотний процес руйнування.

Дані методи характеризуються можливістю отримання великої кількості інформації включаючи визначення числових характеристик переміщення характерних точок будівель та споруд у певний проміжок часу за допомогою їх фіксації в місцевих або умовних системах координат [2].

Відповідно до [1] у процесі моніторингу історичних споруд визначаються такі характеристики деформацій: для наземної частини будинку: а) відхили від вертикалі (крен) будівельних конструкцій (осей колон, стін, ліфтових шахт тощо) або будівлі (споруди) загалом; б) деформації колон і інших бетонних конструкцій; в) розкриття тріщин, динаміка їхнього розвитку.

Залежно від технічного завдання та характеристик деформацій, які потрібно визначити, можна виокремити такі інженерно-геодезичні методи моніторингу будівель та споруд: моніторинг вертикального переміщення будівель та споруд; моніторинг горизонтального переміщення будівель та споруд; 3D лазерне сканування будівель та споруд; моніторинг за допомогою GNSS вимірів; стереофотограмметрія; моніторинг за допомогою БПЛА; інклінометрія; моніторинг за допомогою автоматизованих геодезичних комплексів (АГК); комбіновані методи.

На рис. 1 наведено сучасні інженерно-геодезичні методи моніторингу будівель та споруд [8].

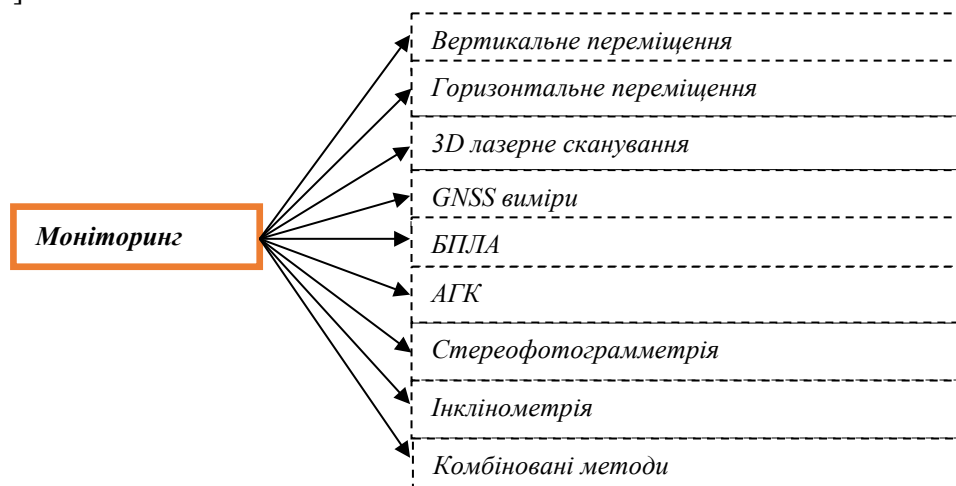


Рис. 1. Сучасні інженерно-геодезичні методи моніторингу будівель та споруд  
Джерело: розроблено автором.



*Моніторинг вертикального переміщення* виконується за рахунок геометричного та тригонометричного нівелювання шляхом фіксування перевищень висотного положення характерних точок будівлі чи споруди у вертикальній площині. Як вказано в [6], до переваг даного методу можна віднести: висока точність (геометричне в порівнянні більш точне, ніж тригонометричне); низька вартість; простота отримання, обробки та аналізу даних. Для вимірів використовуються високоточні прецизійні нівеліри з точністю 0,3 мм/км, а як опорні точки використовують геодезичні марки, що закріплюються в конструктивних елементах будівлі та забезпечують можливість безперебійного доступу для вимірів, жорсткість та міцність [5].

*Моніторинг горизонтального переміщення* реалізують за рахунок виконання лінійно-кутових спостережень планового положення характерних точок будівлі або споруди в горизонтальній площині. Як точки використовуються деформаційні марки, а планове положення зміною координат  $X$  та  $Y$  [6]. Головною перевагою цього методу є висока точність, однак вартість та рівень складності обробки та отримання інформації дещо складніший, ніж у попереднього методу. Враховуючи досвід [5] для виконання моніторингу використовують сучасні тахеометри (з кутковою точністю не менше 2" та 2 мм для віддалі), призми (відбивачі), віхи, оптичні центри та геодезичні марки.

*3D лазерне сканування* є одним із найбільш сучасних та продуктивних методів. Метод реалізується за допомогою сучасних 3D сканерів, які дозволяють отримати 3-вимірну модель об'єкта спостереження [6]. Ця модель відображає всі геометричні параметри об'єкта у вигляді масиву точок, що в свою чергу дозволяє виконувати аналіз кренів будівель та споруд, їхні геометричні характеристики, положення в просторі [4]. Перевагою даного методу є отримання великої кількості інформації у вигляді 3-вимірної моделі, що спрощує процес аналізу, в порівнянні з попередніми методами має значну вартість. Також сканування об'єктів історичного значення надасть можливість відтворити зруйновані конструкції внаслідок деформацій та руйнувань.

*GNSS виміри* забезпечує можливість визначення просторового положення точок за допомогою супутникових навігаційних систем [5]. Перевагою цього методу є миттєве отримання геодезичних координат  $XYZ$  опорних точок спостереження, але конструктивна особливість обладнання, а також часта втрата фіксованого сигналу (зменшення вікна спостереження) біля споруд та будівель унеможлиблює в деяких випадках використання GNSS обладнання для вимірів горизонтального положення будівлі та вертикального переміщення. Здебільшого цей метод використовується для спостереження динаміки змін поверхні ґрунту навколо будівель, створення опорних мереж для геодезичного моніторингу.

*БПЛА*. Цей метод є додатковий до інших методів та може бути застосований для створення попередніх креслень, отримання зображень у важкодоступних зонах, які характерні для історико-культурних об'єктів, сезонного спостереження тощо. БПЛА можуть бути оснащені камерою високої чіткості, RFID-зчитувачем, пристроєм GNSS, Wi-Fi, а також інфрачервоний, ультразвуковий чи лазерний сканер [3].

*Автоматизовані геодезичні комплекси* включають у себе цілий клас сучасного обладнання. До них належать роботизовані тахеометри, датчики постійного стеження, датчики нахилу, електронні рівні [5]. Ці прилади можуть дозволити в автоматичному чи напівавтоматичному режимі виконувати спостереження, використовуючи систему датчиків можливо виконувати постійний моніторинг за деформаціями. Сучасні системи можуть надати не тільки автоматичне виконання робіт, а навіть дистанційне з автоматичним внесенням динаміки змін у базу даних. Перевагою даного методу є швидкість отримання результатів спостережень, автономність процесу, зменшення трудовитрат, можливість виконання моніторингу в режимі реального часу [5]. Недоліком є потреба у кваліфікованих спеціалістах, залежно від комплексу – значна вартість.

*Стереофотограмметрія* застосовується для об'єктів зі складною геометричною формою, об'єктів, які мають швидку динаміку змін, забезпечуючи можливість поступового фотографування та спостереження за змінами з точністю до міліметрів [3; 5]. Донедавна метод був не дуже поширений, але сучасні стерефотокамери та новітні програмні забезпечення, дозволили покращити якість і збільшити швидкість обробки зображення для аналізу [8]. У результаті можливо отримати змодельовану поверхню на площину, така особливість цього методу надає можливість зберігати інформацію про об'єкти історико-культурного значення не тільки у вигляді числових показників, а й у вигляді логічно пов'язаних фото матеріалів, що дозволить при пошкодженні будівлі внаслідок воєнних дій чи значних деформацій відтворити її первісний стан.

*Інклінометрія* [8] є більш вузькоспрямованим методом і використовується в індивідуальних проєктах. Він полягає у використанні труби (моніторингова шахта), яка встановлюється у вертикальне або горизонтальне положення (залежно від характеру спостереження), по якій транспортують зонд у двох взаємно перпендикулярних напрямках (площинах). Шахта має властивість приймати деформований стан (нахилятися, прогинатися, приймати опуклу чи випуклу форму) відповідно до форми об'єкта [8].

*Комбінований метод* може поєднувати в собі деякі або всі вищевказані методи з метою виконання найбільш ефективного та економічно обґрунтованого геодезичного моніторингу. Залежно від характеру об'єкта, його складності, терміну спостережень, деякі методи можуть бути поєднані, а інколи навіть всі разом.

Обираючи методи для моніторингу споруди та будівлі історико-культурної спадщини, потрібно врахувати всі особливості та ретельно вивчати об'єкт, оскільки на відміну від типового будівництва історичні будівлі та споруди мають своє унікальне конструктивне та планове рішення, фундаменти, ландшафт, кліматичні та погодні умови. Також потрібно враховувати, що часто такі об'єкти розташовані комплексом, що потребує ще більш детального вивчення та процесу попередньої підготовки. Такими комплексами в місті Чернігові є комплекс історичних будівель на Валі (Спасо-Преображенський собор XI ст., Борисоглібський собор XII ст., Чернігівський колегіум XVIII ст.), комплекс будівель та споруд Свято-Троїцького собору XVII ст., Антонієві печери – печерний комплекс XI — XIX ст. та інші.

Як приклад у науковій роботі [6] для інженерно-геодезичного моніторингу були обрані два об'єкти в м. Вроцлав (Польща), один з яких Кафедральний собор Івана Хрестителя XI-XIII ст. (рис. 2) [6]. За даними авторів, попри те, що об'єкти мають вагомий історичне значення, вони не перебували під постійним геодезичним моніторингом.

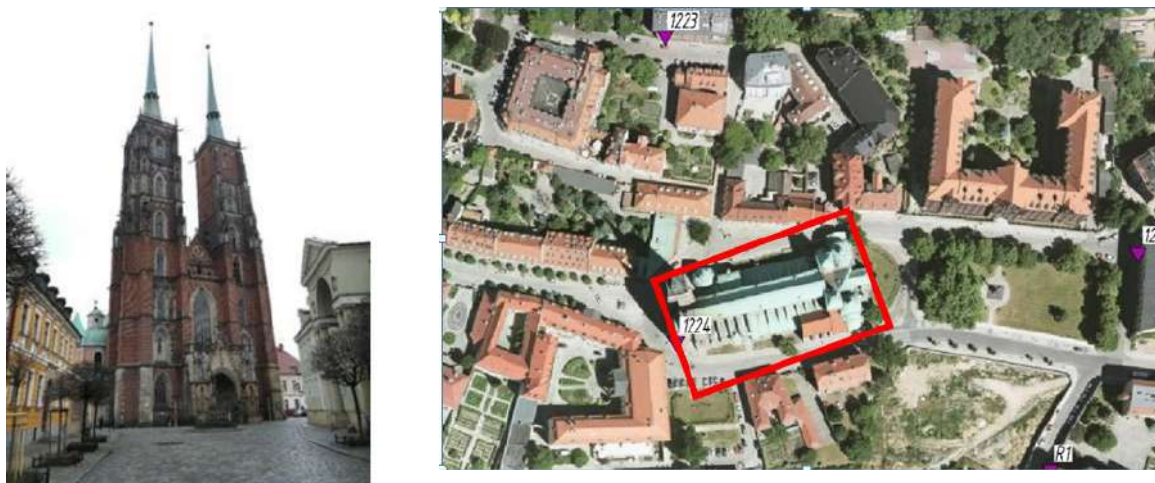


Рис. 2. Кафедральний собор Івана Хрестителя [3]

Оскільки моніторинг цієї будівлі було виконано в перше, за основний метод було обрано моніторинг вертикальних переміщень геометричним прецизійним нівелюванням кодовим цифровим нівеліром Trimble DiNi 0.3. Маючи місцеву опорну геодезичну мережу, було створено горизонтальну контрольну мережу навколо об'єкта (рис. 3, а). Запроєктована нівелірна мережа складалася з 29 ділянок, які утворювали 7 замкнутих нівелірних полігонів [6]. Набір контрольних реперів (рис. 3, а [6]) складався з 20 пунктів [6]. Для подальшого проведення моніторингу була створена кутово-лінійна мережа (рис. 3, б [6]) за допомогою тахеометра Topcon GPT-7503, з точним нівелюванням мережі та використанням супутникових вимірювань GNSS. Також проєктом було передбачено подальше виконання 3D сканування приладом Leica ScanStation C10 [6].

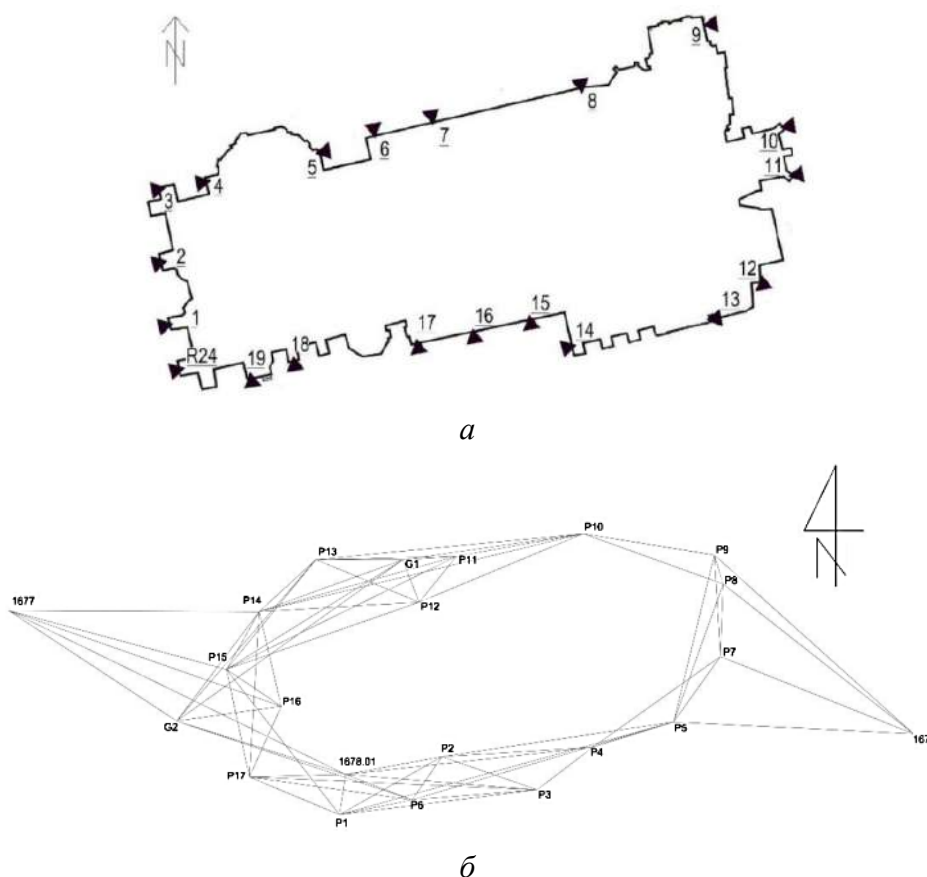
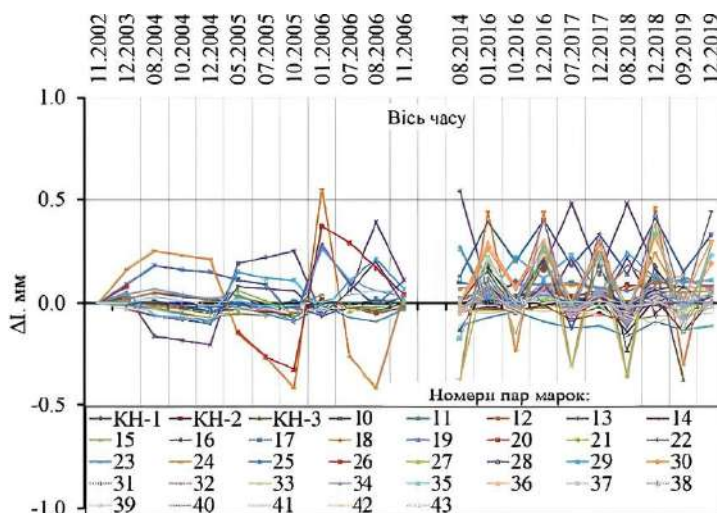
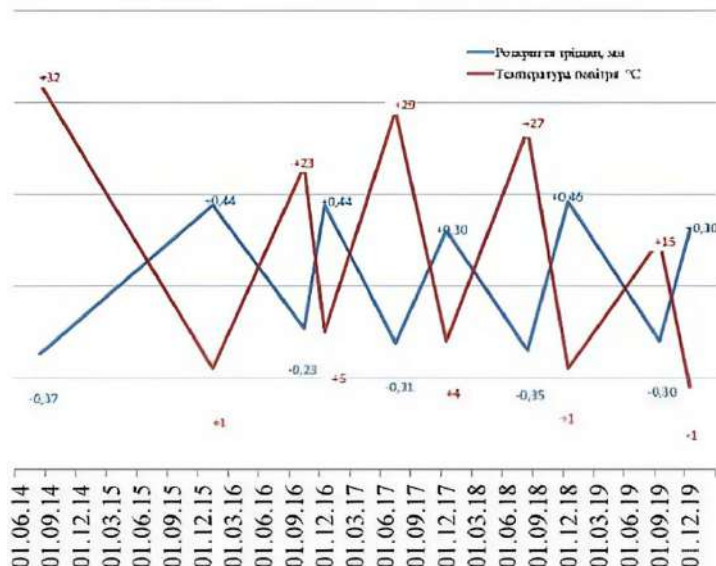


Рис. 3. Горизонтальна контрольна мережа навколо об'єкта та кутово-лінійна мережа: а – горизонтальна контрольна мережа навколо об'єкту; б – кутово-лінійна мережа

Враховуючи великий досвід проведення моніторингів, що наведений у роботі [6], поруч із вищенаведеними методами автори виділяють методи моніторингу змін ширини розкриття тріщин. Дані спостереження виконуються за допомогою комплексу марок та переносного приладу «SDM 50/500» з компаратором [6]. Цей метод найбільш характерний для визначення величини розкриття тріщин на історичних спорудах [6]. Відповідно до розробленого плану експлуатації об'єкта був проведений моніторинг з оцінки розкриття тріщин у конструкціях будівель з метою виявлення ширини розкриття та появи нових тріщин [5]. За період спостережень було виконано 24 цикли визначення зміни розкриття тріщин «Софія Київська». Результати інженерно-геодезичного моніторингу змін розкриття тріщин (рис. 4, а [5]) та залежності розкриття тріщин від температурних змін (рис. 4, б [7]) Софіївського собору наведено на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Результати інженерно-геодезичного моніторингу:  
 а – результати інженерно-геодезичного моніторингу змін розкриття тріщин;  
 б – залежність розкриття тріщин від температурних змін

У свою чергу загалом інженерно-геодезичний моніторинг необхідно виконувати комплексно (визначення крену, осідання, зміщення, розкриття тріщин тощо).

**Висновки.** У результаті проведеного аналізу останніх досліджень та сучасних інженерно-геодезичних методів моніторингу будівель та споруд з рахуванням досвіду моніторингу об’єктів історико-культурного значення, можна зробити такі висновки:

- є такі сучасні інженерно-геодезичні методи моніторингу: моніторинг вертикального переміщення будівель та споруд; моніторинг горизонтального переміщення будівель та споруд; 3D лазерне сканування будівель та споруд; моніторинг за допомогою GNSS вимірів; стереофотограмметрія; моніторинг за допомогою БПЛА; інклінометрія; моніторинг за допомогою автоматизованих геодезичних комплексів (АГК); комбіновані методи;
- найбільш простим, точним та менш вартісним є метод геометричного нівелювання;
- метод лазерного сканування, стереофотограмметрії та БПЛА надають не тільки числові значення, але й можливість відтворювати зображення та форму об’єкта, що важливо для історичних будівель;

- в умовах, коли на історико-культурному об'єкті взагалі не виконували геодезичний моніторинг, найбільш ефективним є комбінований метод, оскільки забезпечує найвищу точність та надає повний обсяг інформації;
- спостереження розкриття тріщин на будівлях історичного значення ефективно виконувати за допомогою комплексу марок та переносного приладу «SDM 50/500» з компаратором;
- з метою збереження об'єктів історико-культурної спадщини Чернігова необхідно виконати первинний інженерно геодезичний моніторинг та створити базу даних з метою проведення періодичних моніторинрів.

#### Список використаних джерел

1. Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Геодезичні роботи у будівництві : ДБН В.1.3-2:2010. Зі Зміною № 1. – [Чинний від 2018-06-01]. – Вид. офіц. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. – (Державні будівельні норми України).
2. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Науково технічний супровід об'єктів : ДБН В.1.2-5:2007. – [Чинні від 2008-01-01]. – Вид. офіц. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2007. – 13 с. – (Державні будівельні норми України).
3. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення : ДБН В.2.1-10:2018. – [Чинний від 2019.01.01]. – Вид. офіц. – Київ: Мінрегіон України, 2018. – 36 с. – (Державні будівельні норми України).
4. Вишукування, проектування і територіальна діяльність. Вишукування. Інженерні вишукування для будівництва : ДБНА.2.1-1-2008. – [Чинний від 01.07.2008]. – Вид. офіц. – – Київ: Мінрегіон України, 2008. – (Державні будівельні норми України).
5. Яковенко, М. Багаторічний моніторинг деформацій будівель і споруд геодезичними методами / М. Яковенко, Ю. Мелашенко, Є. Зорін, І. Бень // Наука та будівництво. – 2023. – № 3 (37). – С. 71-87. DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2023-8>.
6. Kuczyńska, G. Modern geodetic techniques in the monitoring of historic buildings [Electronic resource] / G. Kuczyńska, M. Stawska, A. Walicka // E3S Web of Conferences. – 2019. – № 97. – Pp. 1-11. – Accessed mode: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/23/e3sconf\\_form2018\\_04043.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/23/e3sconf_form2018_04043.pdf).
7. Яковенко, М. С. Моніторинг сезонного розкриття тріщин на прикладі національного заповідника "Софія Київська" [Електронний ресурс] / М. С. Яковенко, О. В. Нестеренко, Є. В. Зорін, І. В. Бень // Сучасні проблеми архітектури та містобудування. – 2021. – Вип. 61. – С. 276-291. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Spm\\_2021\\_61\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Spm_2021_61_22).
8. Яковенко, М. С. Огляд видів геодезичного моніторингу будівель і споруд в складних інженерно-геологічних умовах [Електронний ресурс] / М. С. Яковенко, О. В. Нестеренко // Сучасні проблеми архітектури та містобудування. – 2019. – Вип. 55. – С. 341-350. – Режим доступу: [http://archinform.knuba.edu.ua/article/view/199592/pdf\\_24](http://archinform.knuba.edu.ua/article/view/199592/pdf_24).
9. Анисенко, О. В. Сучасні геодезичні прилади, їх значення і роль у геодезичних вимірюваннях [Електронний ресурс] / О. В. Анисенко, К. А. Платонова // Інвестиції: практика та досвід. – 2019. – № 4. – С. 80-83. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ipd\\_2019\\_4\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ipd_2019_4_13).

#### References

1. Research Institute of Construction Production. (2010). *Systema zabezpechennia tochnosti heometrychnykh parametrov u budivnytstvi. Heodezychni roboty u budivnytstvi : DBN V.1.3-2:2010. Zi Zminoiu № 1 [The system ensures the inaccuracy of geometric construction parameters. Geodetic works in construction (DBN V.1.3-2:2010)]*. Ministry of Regional Development of Ukraine.
2. Research Institute of Construction Production. (2008). *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Naukovo tekhnichniy suprovod ob'ektiv: DBN V.1.2-5:2007 [The system for ensuring the reliability and safety of construction objects. Scientific and technical support of construction objects (DBN V. 2.1-5-2007)]*. Ministry of Regional Construction of Ukraine.
3. State enterprise "State Research Institute of Building Structures". (2018). *Osnovy i fundamenti budivel ta sporud. Osnovni polozhennia: DBN V.2.1-10:2018 [Osnovitafundamentisproud. Basic provisions (DBNV.2.1-10:2018)]*. Ministry of Regional Development of Ukraine.



4. Ukrainian State Main Research and Production Institute of Engineering, Technical and Environmental Research "UkrNDIINTV" (2008). *Vyshukuvannia, proektuvannia i terytorialna diialnist. Vyshukuvannia. Inzhenerni vyshukuvannia dlia budivnytstva : DBNA.2.1-1-2008 [Search, design and territorial activity. search Engineering searches for construction (DBN A. 2.1-1-2008)]*. Ministry of Regional Development of Ukraine.

5. Yakovenko, M., Melashenko, Yu., Zorin, E., & Ben, I. (2023). Bahatorichnyi monitorynh deformatsii budivel i sporud heodezychnymy metodamy [Long-term monitoring of deformations of buildings and structures by geodetic methods]. *Nauka ta budivnytstvo – Science and construction*, 3(37). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2023-8>.

6. Kuczyńska, G., Stawska, M., & Walicka, A. (2019). Modern geodetic techniques in the monitoring of historic buildings. *E3S Web of Conferences*, 97, 1-11. [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/23/e3sconf\\_form2018\\_04043.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/23/e3sconf_form2018_04043.pdf)

7. Yakovenko, M., Nesterenko, O., Zorin, E., & Ben, I. (2021). Monitorynh sezonnoho rozkryttia trishchyn na prykladi natsionalnoho zapovidnyka "Sofia Kyivska" [Monitoring of seasonal opening of cracks as an example. National Reserve "Sofia Kyivska"]. *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia – Contemporary problems of Architecture and Urban Planning*, (61), 276–291. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2021.61.276-291>.

8. Yakovenko, M., Nesterenko, O. (2020). Ohliad vydiv heodezychnoho monitorynhu budivel i sporud v skladnykh inzhenerno-heolohichnykh umovakh [Review of types of geodetic monitoring of buildings and ores in complex engineering and geological conditions]. *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia – Modern problems of architecture and town planning*, 55, 341-350. [http://archinform.knuba.edu.ua/article/view/199592/pdf\\_24](http://archinform.knuba.edu.ua/article/view/199592/pdf_24)

9. Anisenko, O.V. (2019). Cuchasni heodezychni pryklady, yikh znachennia i rol u heodezychnykh vy-miruvanniakh [Modern geodetic devices, their meaning and role in geodetic measurements. *Investytsii: praktyka ta dosvid – Investments: practice and experience*, 4, 80–83. <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2019.4.802>.

Отримано 25.09.2024

UDC 528.4

### Sergii Zavorotnyi

PhD in Technical Sciences, senior teacher departments of geodesy, cartography and land management  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [zavorotnyiserhii@ukr.net](mailto:zavorotnyiserhii@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2139-8877>. ResearcherID: [KIB-2615-2024](https://orcid.org/0000-0002-2139-8877)

## ANALYSIS OF MODERN ENGINEERING AND GEODETIC METHODS OF MONITORING BUILDINGS AND STRUCTURES OF OBJECTS OF HISTORICAL AND CULTURAL HERITAGE

*The article analyzes advanced engineering and geodetic methods of monitoring buildings and structures, taking into account the peculiarities of monitoring objects of historical and cultural heritage. According to the conducted analysis, the following methods were considered: monitoring of vertical movement of buildings and structures; monitoring of horizontal movement of buildings and structures; 3D laser scanning of buildings and structures; monitoring using GNSS measurements; stereophotogrammetry; monitoring using a UAV; inclinometer; monitoring using automated geodetic complexes (AGC); combined methods. The practical experience of creating a new basis for further monitoring a historical building based on the Cathedral of John the Baptist in the city of Wroclaw is considered, highlighting the features of creating a network of control points for periodic monitoring of deformations. This work presents a horizontal control network around the object and an angular linear network, which allows the authors of the work to monitor the geometric parameters of the cathedral. The starting points were the points of the state coordinate system that were within the reach of the object. To solve the problem of monitoring the opening cracks, the most effective method of monitoring buildings or structures of historical and cultural significance was given based on practical experience. As an example, the statistical data of the results of the engineering and geodetic monitoring of changes in the opening of cracks and the dependence of the opening of cracks on temperature changes of St. Sophia's Cathedral are considered. After analyzing the modern methods of engineering and geodetic monitoring and practical experience of real objects, conclusions were made that allowed us to determine the main features of engineering and geodetic monitoring of buildings and structures of historical and cultural significance for the city of Chernihiv. A complex of works necessary for effective monitoring of the city's historical buildings has been determined. This article is an overview and is intended only for the analysis of existing methods.*

**Keywords:** engineering and geodetic monitoring; deformations; buildings and structures; leveling; support network.

Fig.: 4. References: 9.

**Володимир Яковлевич Керш<sup>1</sup>, Сергій Анатолійович Тихонюк<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, професор кафедри міського будівництва та господарства

Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: [kersh@odaba.edu.ua](mailto:kersh@odaba.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6085-5260>

ResearcherID: [LGZ-1769-2024](https://orcid.org/0000-0001-6085-5260)

<sup>2</sup>здобувач ступеня доктора філософії, аспірант кафедри міського будівництва та господарства

Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: [tihoniuk1984@gmail.com](mailto:tihoniuk1984@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9444-3905>

ResearcherID: [LGZ-8666-2024](https://orcid.org/0009-0009-9444-3905)

**ШТУКАТУРНИЙ СКЛАД ДЛЯ БУДІВЕЛЬ ІЗ ВАПНЯКУ-ЧЕРЕПАШНИКУ**

У статті обґрунтована доцільність та на основі комплексних досліджень доведена можливість використання зологіпсоцементних сумішей для оштукатурювання стін будівель з вапняку-черепашника при ремонтно-реставраційних роботах. Показано, що водостійкість затверділої суміші є достатньою для її використання на фасадах будівель. Експериментально доведено, що основні властивості пропонованого ремонтно-реставраційного складу – міцність, паропроникність, адгезія, - узгоджені з властивостями черепашника. Подальші дослідження, спрямовані на покращення властивостей штукатурної суміші за рахунок введення комплексу хімічних добавок.

**Ключові слова:** вапняк-черепашник; зологіпсоцементна суміш; планований експеримент; водостійкість; міцність; паропроникність; адгезія

Рис.: 5. Табл.: 2. Бібл.: 17.

**Постановка проблеми.** Більшість історичних будівель Північного Причорномор'я складено з місцевого природного каменю вапняку-черепашника, який утворився з залишків раковин морських організмів. Екологічно чистий, недорогий будівельний матеріал має досить гарні технічні і експлуатаційні властивості – міцнісні, тепло- і шумозахисні [1]. Однак із часом ці будівлі можуть піддаватися руйнівним процесам, пов'язаним із впливом зовнішніх факторів, таких як вологість, заморозки, механічні пошкодження. Недоліком черепашника є суттєва втрата міцності при його зволоженні, що призводить до зниження несучої здатності конструкції аж до її повної втрати [2]. Руйнування будівель з вапняку в Одесі почастішали останнім часом [3], що, поряд з іншими причинами, є наслідком неграмотної та недбалої експлуатації.

Серед чинників, що призводять до замочування зовнішніх стін, можна виділити такі: відсутність або руйнування вимощення, неякісна гідроізоляція фундаментів або підвальних стін, пошкодження системи відведення води з покрівлі і, найважливіше, на наш погляд, – пошкодження або відсутність взагалі штукатурного шару зовнішніх поверхонь стін. Спроби ремонту стін з черепашника звичайними цементно-піщаними складами призводять до прискорення руйнування конструкцій внаслідок ряду причин: структурна несумісність матеріалів; більша, порівняно з основним шаром, міцність штукатурки; різні деформативні властивості й наприкінці менша паропроникність штукатурного шару, який є перешкодою на шляху виходу пари з конструкції [4].

**Актуальність теми дослідження.** Важливість збереження архітектурної спадщини історичної частини міста Одеси визнано на міжнародному рівні. У 2023 році Комітет всесвітньої спадщини ЮНЕСКО ухвалив рішення про включення історичного центру міста до Списку всесвітньої спадщини [5]. Це рішення визнає видатну універсальну цінність об'єкта та відповідальність усього людства за його захист, що надає йому доступ до посиленої технічної та фінансової міжнародної допомоги. Для відновлення будівель з природного каменю мають використовуватись спеціальні реставраційні склади, які мають різні властивості, залежно від потреби об'єкта.

Імпортні реставраційні склади позиціонуються як універсальні, призначені для кам'яних стін. Проте вапняк-черепашник за своїм хімічним складом, структурою та властивостями принципово відрізняється від, наприклад, глиняної або силікатної цегли; неузгодженість властивостей матеріалу основної стіни і штукатурного шару веде до відокремлення штукатурки від черепашника, розтріскування обох шарів і руйнації стіни.

Таким чином, розробка недорогих вітчизняних штукатурних матеріалів спеціального призначення для стін з черепашника, є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Наявну наукову інформацію було проаналізовано для визначення можливості та оцінки доцільності застосування гіпсовмісних сумішей для зовнішніх штукатурних робіт на фасадах будівель із вапняку-черепашнику. Важливими критеріями оцінки придатності штукатурної суміші для зазначеної цілі можна вважати такі:

- сумісність із матеріалом основної стіни;
- водостійкість;
- міцність;
- паропроникність;
- адгезія;
- деформативні характеристики.

Технічні вимоги до ремонтної композиції, що розробляється, можуть бути сформульовані наступним чином: матеріал має бути структурно сумісним з вапняком-черепашником та мати прискорене твердіння, підвищену водостійкість, хорошу адгезію, узгоджені з основним матеріалом міцність і паропроникність.

*Сумісність* штукатурної суміші з черепашником вкрай важлива для довговічності, міцності та надійності оздоблення. Розглянемо деякі аспекти цієї тези:

*Міцність зчеплення:* черепашник - це вапняний пористий матеріал, який має високу здатність вбирати вологу. Якщо штукатурка не буде структурно сумісна з черепашником, недостатнє зчеплення може призвести до появи тріщин або відшаровування штукатурки. При високій міцності штукатурного шару занадто міцне зчеплення веде до пошкодження матеріалу основного шару стіни.

*Вологообмін:* оскільки черепашник має пористу структуру і хорошу паропроникність, важливо, щоб штукатурка також мала здатність пропускати водяну пару. Це дасть змогу запобігти накопиченню вологи всередині стіни та утворенню цвілі або грибка. Несумісний за властивостями склад може блокувати природний процес вологообміну, що призведе до руйнування як штукатурки, так і черепашнику.

*Деформативні характеристики:* за неузгодженості деформативних властивостей штукатурки і матеріалу основного шару можливе пошкодження одного або іншого з взаємодіючих елементів стіни в результаті температурно-вологісних деформацій.

Однак, крім перерахованих вище чинників, під час проектування складу штукатурних сумішей для ремонту стін з черепашнику мають враховуватися і технологічні фактори, передусім - швидкість затвердіння і зміцнення суміші, а також товщина штукатурного шару, який наноситься за один прохід. Із поширених у будівельній практиці в'язучих найбільш сумісними за властивостями з вапняком-черепашником є вапно і гіпс. Вапнякові суміші, наприклад італійська суміш *Mape-Antique MC* [6], мають високу паропроникність і дозволяють стінам «дихати», що мінімізує утворення конденсату. Однак вапняно-піщані суміші наносяться тонкими шарами, твердіють тривалий час, під час твердіння потребують захисту від атмосферних опадів, замерзання, пересушування, тому їх використання для оздоблювальних робіт на фасадах будівель є проблемним.

З погляду відповідності перерахованим вище вимогам, для ремонту стін з черепашнику краще виглядає суміш на основі гіпсу. Сировина для виробництва гіпсу дуже поширена в земній корі, у тому числі в Україні. Основні переваги гіпсових матеріалів – високі міцність і твердість; час схоплювання можна регулювати в широкому діапазоні змішуванням гіпсу з допоміжними добавками; відносно низька теплопровідність; низька звукопровідність; висока паропроникність; хороша хімічна стійкість; вогнестійкість; невисока вартість [7].



Основним недоліком таких складів слід вважати низьку водостійкість, обумовлену відносно високою розчинністю гіпсу (приблизно 2,5 г на 1 л води). Уже невелике підвищення вологості гіпсових продуктів призводить до істотної втрати міцності. При тривалому впливі підвищеної вологості через порівняно велику розчинність і подальшу рекристалізацію відбувається його руйнування. Тому гіпсові продукти в чистому вигляді не застосовуються для зовнішніх робіт. Одним із найбільш ефективних шляхів підвищення водостійкості гіпсових матеріалів на основі гіпсового в'язучого [8-10] вважається створення сумішей зі зниженою розчинністю на основі гіпсу та цементу з добавкою компонентів з пуцоланічною активністю (ГЦП в'язучі). Цей варіант реалізовано в цій роботі.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Аналіз наявних вітчизняних і зарубіжних джерел дав змогу дійти висновку про відсутність наукової інформації щодо можливого застосування ГЦП в'язучих у штукатурних сумішах для стін із черепашнику, а також щодо досліджень комплексу різноманітних властивостей таких сумішей спеціального призначення, наприклад, міцності, водостійкості, паропровідності, здатності утворювати міцне зчеплення з матеріалом основного шару стіни, а також деформативних властивостей штукатурного шару.

**Метою статті** є оцінка можливості використання гіпсоцементно-пуцоланової суміші як в'язучої основи штукатурного складу для стін будівель з черепашнику за результатами комплексного дослідження властивостей суміші, для чого потрібно було вирішити ряд завдань:

- 1) на основі планованого експерименту виготовити дослідні зразки;
- 2) вивчити вплив компонентів суміші на міцнісні характеристики зразків;
- 3) оцінити вплив компонентів суміші на водостійкість зразків;
- 4) оцінити паропроникність черепашника й опитних зразків;
- 5) оцінити міцність зчеплення штукатурної суміші з різними поверхнями;
- 6) дослідити роль армування суміші фіброволокнами при вологих деформаціях.

**Виклад основного матеріалу.** Завданням цього етапу розробки водостійкої ремонтної композиції з місцевих матеріалів було встановити її базовий склад з використанням гіпсу Г5 в поєднанні з цементом (мелений клінкер) і золою ТЕС як пуцолановою добавкою, та вивчити вплив компонентів на властивості суміші. Для ймовірного підвищення пластичності та водостійкості до складу вихідної суміші вводили гашене вапно. У планованому 3-факторному експерименті В<sub>3</sub> [11] варіювались масовий вміст компонентів у відсотках від фіксованої кількості гіпсу. Основні чинники і рівні їх варіювання наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні чинники і рівні їх варіювання

Номер чинника -i	Чинники	Рівні варіювання		
		X <sub>i</sub> = -1	X <sub>i</sub> = 0	X <sub>i</sub> = +1
1	Кількість цементу (Ц, масові частини на 100 ч. гіпсу)	40	50	60
2	Кількість вапна (В, масові частини на 100 ч. гіпсу)	40	50	60
3	Кількість (З, масові частини на 100 ч. гіпсу)	20	40	60

Джерело: розроблено авторами

Водотверде відношення, підібране за нормальною густиною суміші, дорівнює 0,6. Було виготовлено 90 стандартних балочок (15×6) розміром 40×40×160 мм.

Далі наведені результати досліджень властивостей опитних зразків.

**Міцність.** Оскільки суміш, крім гіпсу, містить цементно-вапняний компонент, який твердіє повільніше, вимірювання міцності проводили через 7 та 28 діб після схоплювання суміші. Графіки залежності міцності від густини у віці 7 і 28 днів показані на рис. 1, а і 1, б відповідно. Сині позначки відповідають міцності на вигин, червоні - міцності на стиск.

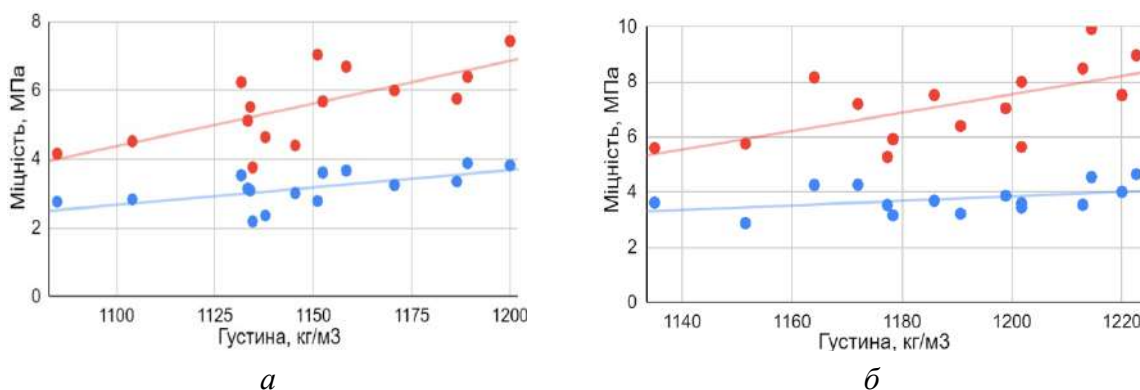


Рис. 1. Залежність міцності на вигин і стиск від густини:

а – у віці 7 днів; б – у віці 28 днів

Джерело: розроблено авторами.

Збільшення міцності через 28 днів порівняно з міцністю через 7 днів становить близько 30 %. Межа міцності деяких з виготовлених зразків на стиск досягає майже 10 МПа, а на розтяг - 4 МПа, навидь при використанні низькосортного гіпсу та без застосування пластифікуючих добавок і армуючих мікронаповнювачів. Така висока міцність штукатурної суміші в затверділому стані, в принципі, непотрібна, особливо для штукатурення черепашнику, але вона дає можливість додавати в суміш різні інертні наповнювачі, наприклад, мелені відходи видобування пиляного вапняку, що дозволить знизити витрату дорогого в'язучого і, відповідно, вартість ремонтної суміші при доведенні (зниженні) міцності до нормативних значень.

**Водостійкість.** Стійкість будівельних матеріалів та виробів до дії води зазвичай оцінюється коефіцієнтом розм'якшення  $K_p$  - це відношення міцності матеріалу, насиченого водою, до його міцності в сухому стані -  $K_p = R_{\text{вол}}/R_{\text{сух}}$ . При значенні коефіцієнта розм'якшення більше 0,8 матеріал вважається водостійким. Коефіцієнт розм'якшення будівельного гіпсу коливається в межах від 0,3 до 0,45. Визначення коефіцієнта розм'якшення гіпсовмісних матеріалів залежить від умов проведення вимірювань.

Коефіцієнт розм'якшення у принципі неоднозначно відображає фактичну водостійкість матеріалу. Його величина залежить від співвідношення міцностей у водонасиченому та сухому станах, і в деяких випадках матеріали з меншою міцністю можуть мати більший  $K_p$ , ніж матеріали з більшою міцністю. Більш коректним критерієм, на наш погляд, може бути індекс водостійкості  $I_v$ , у якому «посилена» роль міцності матеріалу у водонасиченому стані -  $I_v = R_{\text{вол}}^2/R_{\text{сух}}$ , як більш значущої при проектуванні [12].

Водостійкість визначалася після 2 годин замочування зразків і після 48 годин замочування (з урахуванням наявності в суміші компонентів, що повільно тверднуть, - цементу і вапна). Зниження міцності в останньому випадку, порівняно з двогодинним замочуванням, становило в середньому 30 %. Проте мінімальна міцність зразків після 48 годин замочування була в межах 2,5÷4,5 МПа, що перевищує міцність вапняків-черепашників навіть у природному вологому стані. За міцність у сухому стані була прийнята міцність висушених зразків через 7 і 28 діб тверднення.

Як приклад на рис. 2 наведено ізоповерхні значень індексу водостійкості, що розраховані при математичному моделюванні за результатами вимірювань міцності зразків у сухому і вологому стані, які тверднули 7 діб при їх замочуванні впродовж 2 і 48 годин [13].

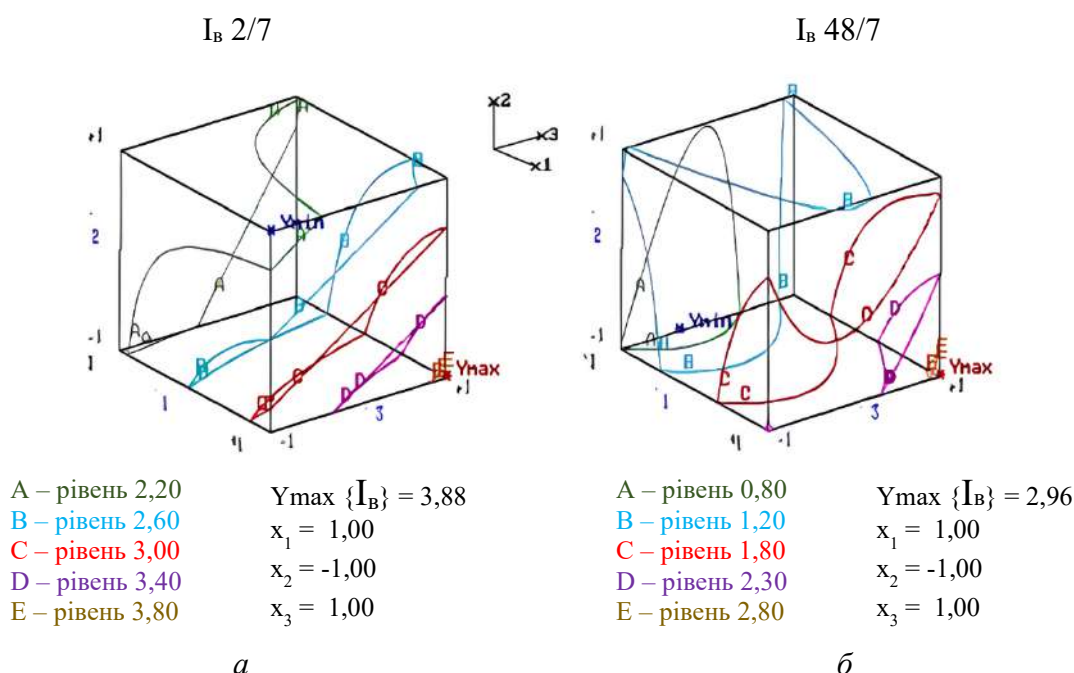


Рис. 2. Ізоповерхні індексу водостійкості  $I_B$  після твердіння зразків 7 діб та зволоження: а – 2 годин; б – 48 годин

Джерело: розроблено авторами.

Коефіцієнт розм'якшення, як більш звичний критерій також був розрахований; для деяких зразків за тих самих умов вимірювання він наближається до 0,8. Проведені дослідження підтвердили достатню водостійкість запропонованих рецептур з можливістю її подальшого покращення.

Аналізуючи моделі  $I_B$  та їхні графічні відображення можна зробити висновок про позитивний вплив на водостійкість ремонтної композиції на ЗГЦ в'язучому вмісту цементу (найбільший у досліджуваному інтервалі) і меншою мірою золи. Підвищення вмісту вапна в досліджуваному інтервалі знижує стійкість штукатурної композиції до води у ранньому віці. Таким чином припущення щодо корисності додавання вапна для підвищення водостійкості гіпсоцементної суміші не виправдалося. Враховуючи також, що вапно нівелює дію пуцоланової добавки, а введення кожного додаткового компонента також ускладнює технологію виготовлення матеріалу, прийнято рішення про виключення вапна зі складу експериментальної суміші при подальших дослідженнях.

*Паропроникність* - один із найважливіших критеріїв вибору штукатурної суміші для стін із черепашнику; узгодженість за цим параметром з основним матеріалом стіни є запорукою продовження життя історичних будівель на тривалий період. Водночас інформація про паропроникність стін старих будівель, зведених із вапняків різного походження, відсутня, так само як і інформація про переносні властивості новостворюваних багатокомпонентних штукатурних сумішей, що зумовило необхідність визначення паропроникності як штукатурних сумішей, які розробляють, так і власне черепашнику.

Паропроникність матеріалів визначали методом «сухої» чашки відповідно до проекту ДСТУ EN ISO 12572:202X [14]. Методику вимірювання паропровідності відпрацьовували на зразках черепашнику, відібраних із реальних будівель міста. Під час відпрацювання методики встановлено, що щільність потоку водяної пари через черепашник стабілізується в проміжку між 4-ми і 8-ми добою від початку вимірювань (рис. 3), причому після 8 діб процес помітно сповільнюється, що пояснюється насиченням вологопоглиначом.

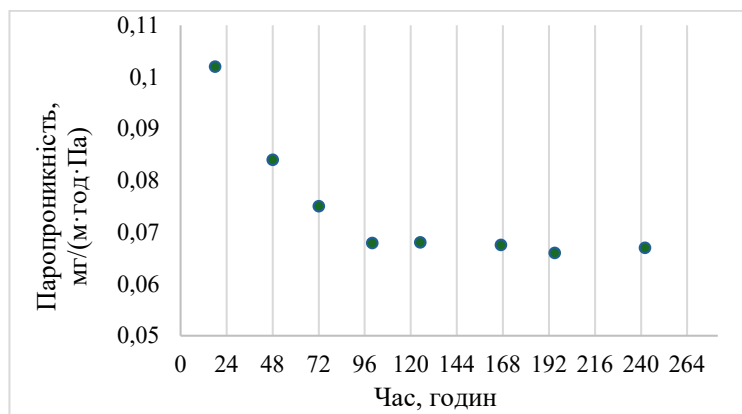


Рис. 3. Зміна паропроникності в часі вимірювання

Джерело: розроблено авторами.

Для зразків вапняку і складів, що розробляються, ухвалено рішення визначати паропроникність на підставі вимірів приросту вологи з 4-ої до 7-ої доби від моменту початку вимірювань. Так само визначено паропроникність зразків затверділої ЗГЦВ суміші, виготовлених у планованому експерименті. Усереднений коефіцієнт паропроникності зразків черепашнику, розрахований за результатами вимірювань, дорівнює 0,07 мг/(м·год·Па), паропроникність запропонованих нами складів коливається в межах  $0,08 \pm 0,09$  мг/(м·год·Па). Подальше підвищення паропропускної здатності штукатурного складу пов'язане з підбором оптимального поєднання компонентів суміші.

*Адгезія.* Міцність зчеплення штукатурної суміші з черепашником є важливим фактором, який впливає на якість оздоблення. Адгезія будівельних і оздоблювальних матеріалів здійснюється в основному за принципом механічного з'єднання, механізм якого полягає в проникненні речовини, що наноситься, в пори зовнішнього шару, або з'єднанні з шорсткою поверхнею. Гіпсова штукатурка характеризується більш високою адгезією порівняно з цементною і цементно-вапняною штукатуркою [15], але для зологіпсоцементних складів дані про адгезію до вапняку відсутні.

Адгезія розроблених складів до поверхонь різної природи вимірювалась «методом відриву» кільця, заповненого сумішшю, від поверхні опорної пластини за допомогою експериментальної установки, що створена на кафедрі ПАТБМ ОДАБА. Враховуючи загальну стратегію розробки ремонтного складу щодо максимально можливого підвищення характеристик на цьому етапі, у тому числі адгезії, вирішено дослідити вплив адгезійної добавки на цю властивість. Водночас було встановлено суттєвий вплив стану опорної поверхні черепашника (наявність тріщин, каверн тощо). На результат вимірювання адгезії. Тому використані два види поверхонь - вапнякові та керамічні (як більш однорідні). Як адгезійну добавку використано добавку вітчизняного виробництва Ceresit CC 81 [16] у кількості 3 та 10 % від маси сухих компонентів при розведенні її водою в пропорції 1/4, згідно з інструкцією виробника. Для порівняння виготовлені контрольні бездобавочні зразки.

Зчеплення запропонованого бездобавочного складу з поверхнею черепашнику, усереднене за п'ятьма результатами вимірювань, характеризується зусиллям відриву на одиницю поверхні контакту – 0,25 МПа. Адгезія цього ж складу до поверхні керамічної плитки – 0,30 МПа. При введенні в суміш адгезійної добавки Ceresit CC 81 у кількості 3% міцність зчеплення штукатурної суміші з поверхнею черепашнику збільшується, порівняно з бездобавочною, – в 1,3 раза, а при введенні 10 % добавки – у 2 рази (рис. 4).

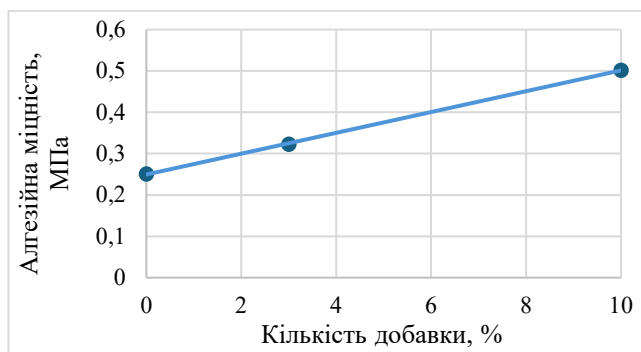


Рис. 4. Залежність міцності зчеплення штукатурної суміші з поверхнею черепашника від вмісту адгезійної добавки

Джерело: розроблено авторами.

Відносна зміна адгезійної міцності контакту суміші з керамічною поверхнею при введенні 3 % добавки становила 1,3 раза, порівняно з бездобавочною сумішшю, а при введенні 10 % добавки – 2,1 раза, проте в абсолютних значеннях адгезія до плитки передбачено вища, ніж до черепашника за будь-яких умов.

Якісно ефективність дії адгезійної добавки, залежно від її вмісту, можна візуально оцінити за слідами відриву суміші від поверхні (рис. 5): відрив кільця з бездобавочною сумішшю відбувається по контактній зоні (рис. 5, а), при 3-відсотковому вмісті добавки роз'єднання відбувається по контактній поверхні з частковим відривом матеріалу черепашника (рис. 5, б), а при 10-відсотковому вмісті - по самому черепашнику (рис. 5, в), що свідчить про перевищення в цьому разі адгезійної міцності контакту над когезійною міцністю черепашника.

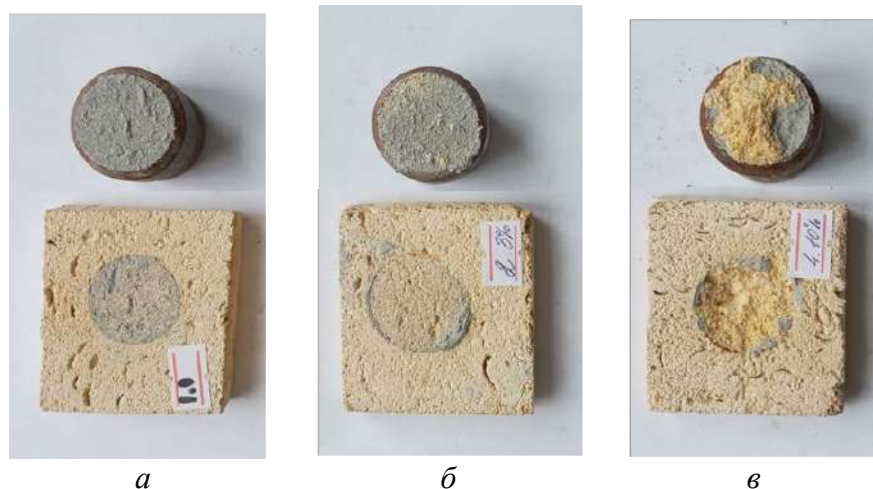


Рис. 5. Характер відриву кільця з експериментальною сумішшю від поверхні черепашника при:

а – відсутності адгезійної добавки; б – вмісті адгезійної добавки 3 %;  
в – вмісті адгезійної добавки 10 %

Джерело: розроблено авторами.

Вочевидь, що на цьому можливості черепашника як фізичної основи для досліджень з підвищення міцності зчеплення з сумішшю вичерпані. Подальше вивчення адгезійних властивостей ремонтного складу слід проводити з використанням керамічної плитки. Потенційне збільшення (в межах вищезазначеної стратегії) адгезійного зчеплення штукатурки з матеріалом основної стіни можливе за введення до суміші комплексу пластифікуючих, гідрофобізуючих та адгезійних добавок.

*Деформативні властивості.* Вологісні й температурні деформації затверділої штукатурної суміші слід мінімізувати, особливо в разі високої міцності зчеплення між шарами штукатурки і основної стіни. Проведено попередні дослідження доцільності застосування базальтової та поліпропіленової фібри у складі штукатурної суміші. Це два типи армувальних волокон, що використовуються для поліпшення властивостей бетону. Вони мають різні переваги та недоліки, які необхідно враховувати при виборі матеріалу для конкретного застосування [17]. За наявною інформацією поліпропіленова фібра - краща для оздоблювальних робіт у житлових і громадських будівлях з помірними експлуатаційними умовами, де не потрібна висока термостійкість і міцність; має відносно невисоку вартість. Базальтова фібра - більш спеціалізований матеріал, використовується там, де потрібні високі показники міцності, термостійкості та стійкості до агресивних середовищ. Оптимальна для об'єктів з екстремальними умовами експлуатації.

Завданням цього дослідження було оцінити вплив фібри на стійкість проєктованої суміші до дії води і величину вологісних деформацій та вибрати вид фібри для подальших досліджень.

Визначалася водостійкість трьох сумішей: без добавки фібри та з 0,1% вмістом базальтової або поліпропіленової фібри. Усереднені результати вимірювань міцності зразків у сухому та водонасиченому стані і показники їхньої водостійкості - коефіцієнт розм'якшення  $K_p$  та індекс водостійкості  $I_v$  наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Міцності зразків у сухому та водонасиченому стані+ і показники їхньої водостійкості  $K_p$  і  $I_v$

Вид фібри	№ зразків у групі	Міцність на згин (сух), МПа	Міцність на стиск (сух), МПа	Міцність на стиск (вол), МПа	$K_p$	$K_p$ ср	$I_v$	$I_v$ ср
Базальтова	1	2,84	3,84	3,2	0,83	<b>0,85</b>	2,67	<b>2,95</b>
	2	2,81	4,25	3,7	0,87		3,22	
Поліпропіленова	1	3,06	4,16	3,68	0,88	<b>0,81</b>	3,26	<b>2,92</b>
	2	2,99	4,8	3,52	0,73		2,58	
Відсутня	1	2,61	2,88	2,48	0,86	<b>0,86</b>	2,14	<b>2,38</b>
	2	2,29	3,52	3,04	0,86		2,63	

Джерело: розроблено авторами.

З даних табл. 2 випливає, що водостійкість пропонованого складу без додавання фіброволокна, оцінювана за  $K_p$ , перевищує водостійкість складів з добавкою фібри, хоча міцність бездобавочного складу мінімальна в будь-якому стані матеріалу. Цей факт ще раз підтверджує нашу тезу про недостатню коректність коефіцієнта розм'якшення, порівняно із запропонованим нами індексом водостійкості. Введення в суміш фібри дає змогу підвищити міцність матеріалу як у сухому, так і у водонасиченому стані в 1,35-1,5 рази, причому ефект від введення базальтової або поліпропіленової фібри приблизно однаковий.

У попередньому експерименті з оцінки впливу фібри на величину вологісних деформацій штукатурної суміші три серії зразків, - без додавання фібри і з фіброю двох зазначених вище видів, піддавалися почерговому зволоженню і висушуванню. Відносна зміна довжини зразків склала: з базальтовою фіброю - 0,5%, з поліпропіленовою фіброю - 0,4 %, бездобавочні - 0,7 %. Враховуючі приблизно однаковий ефект від введення базальтової і поліпропіленової фібри, а також меншу вартість останньої, прийняте рішення про застосування в подальших дослідженнях поліпропіленової фібри.

**Висновки.** У роботі вперше наведено результати комплексного дослідження штукатурного складу на основі зологіпсоцементного в'язучого для ремонтно- реставраційних робіт на фасадах будівель з вапняку-черепашника. Аналіз отриманих результатів вимірювань вла-



стивостей запропонованого складу дозволяє дійти висновку про можливість його застосування для оштукатурювання стін будівель з черепашника. Подальше вдосконалення ремонтного складу пов'язане з використанням комплексу хімічних добавок.

### Список використаних джерел

1. Камінь черепашник, властивості і особливості матеріалу. Статті компанії «ПП Будпостач: газобетон и газоблок по оптовій ціні» [Електронний ресурс] // ПП Будпостач: газобетон и газоблок по оптовій ціні – контакти, товари, послуги, ціни. – Режим доступу: <https://pp-budpostach.com.ua/ua/a227390-kamin-cherepashnik-vlastivosti.html>.
2. Новский, А. В. Известняк-ракушечник / А. В. Новский, В.А. Новский, Ю. Ф. Тугаенко // Исследование и использование в качестве основания фундаментов. – Одесса : Астропринт, 2014. – С. 32.
3. Обвал 4-поверхівки в Одесі – вже п'ятий за 4 місяці: чому це відбувається, і на що чекати людям [Електронний ресурс] // ТСН.ua. – Режим доступу: <https://tsn.ua/ukrayina/obval-4-poverhivki-v-odesi-vzhe-p-yatiy-za-4-misyaci-chomu-ce-vidbuvayetsya-i-na-scho-chekati-lyudyam-1563342.html>.
4. Kersh, V. Repair mixture for limestone-shell buildings / V. Kersh, D. Levytskyi, S. Tykhoniuk // Актуальні проблеми енергоресурсозбереження та екології: Актуальні проблеми енергоресурсозбереження та екології : V Міжн. наук.-техн. конф., (м. Одеса, 13-14 грудня 2023р.). – Одеса, 2023. – С. 76-78.
5. Исторический центр Одессы включён в список всемирного наследия ЮНЕСКО [Електронний ресурс] // Newssky.com.ua. – Режим доступу: <https://newssky.com.ua/istoricheskij-czentr-odessy-vklyuchyon-v-sписок-vsemirnogo-naslediya-yunesko>.
6. MAPE-ANTIQUÉ MC [Electronic resource] // Italy. – Mode of access: <https://www.mapei.com/it/en/products-and-solutions/products/detail/mape-antique-mc>. – Title from screen.
7. Дворкин, Л. И. Строительные минеральные вяжущие материалы / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Москва : Инфра-Инженерия, 2011. – 544 с.
8. Кондращенко, О. В. Гіпсові будівельні матеріали підвищеної міцності і водостійкості (фізико-хімічні та енергетичні основи): автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Олена Володимирівна Кондращенко; Українська держ. академія залізничного транспорту. – Харків, 2004. – 40 с.
9. Єфіменко, А. С. Підвищення водостійкості гіпсових матеріалів поліфракційними мінеральними добавками : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Артем Сергійович Єфіменко. – Харків : УкрДУЗТ, 2021. – 167 с.
10. Новосад, П. В. Підвищення водостійкості гіпсових в'язучих / П. В. Новосад, М. А. Саницький, О. Р. Позняк // Вісник НУ “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва. – 2018. – № 888. – С. 111-116.
11. Вознесенский, В. А. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, Я. П. Иванов, И. И. Николов. – Киев: Будивельник, 1989. – 240 с.
12. Керш В. Я. Описание водостойкости гипсосодержащих композиций с помощью комбинированного критерия / В. Я. Керш, А. В. Фоц, А. В. Колесников // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2017. – Вип. 168. – С. 133-139.
13. Керш, В. Підвищення водостійкості штукатурної суміші на основі гіпсовміщуючого в'язучого / В. Керш, Д. Левицький, С. Тихонюк, і А. Фоц // Містобудування та територіальне планування. – 2024. – Вип. 86. – С. 300-313.
14. ДСТУ EN ISO 12572:202X (EN ISO 12572:2016, IDT; ISO 12572:2016, IDT). Гіротермічні характеристики будівельних матеріалів та виробів. Визначення властивостей пропускання водяної пари (паропроникності). Чашковий метод. (проект, остаточна редакція) [Електронний ресурс]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ». – Режим доступу: [https://gazobeton.org/sites/default/files/sites/all/uploads/ДСТУ%20EN%20ISO\\_12572\\_остаточна%20ред.pdf](https://gazobeton.org/sites/default/files/sites/all/uploads/ДСТУ%20EN%20ISO_12572_остаточна%20ред.pdf).
15. Види та призначення штукатурок у будівництві. Застосування [Електронний ресурс] // РЕМСУМІ. – Режим доступу: <https://remont.sumy.ua/types-of-plasters/>.
16. CERESIT CO 81 [Electronic resource] // Головна – Ceresit. – Mode of access: [https://www.ceresit.ua/catalog/gidroizolicija/zaxyst-vid-kapiljarnoji-volohy/produkti.html/ceresit-co-81/SAP\\_0201WQC014A5/variation/1683234.html](https://www.ceresit.ua/catalog/gidroizolicija/zaxyst-vid-kapiljarnoji-volohy/produkti.html/ceresit-co-81/SAP_0201WQC014A5/variation/1683234.html).
17. Полипропиленовая фибра и базальтовая фибра сравнение [Електронний ресурс] // Склад строительных материалов, оптовые цены в интернет-магазине Budmat. – Режим доступу: <https://budmat.kiev.ua/stati/polipropilenovaya-i-bazaltovaya-fibra-sravnenie>.

### References

1. Kamin cherepashnyk, vlastyvoli i osoblyvosti materialu [Shell rock stone, properties and features of the material]. (n.d.). <https://pp-budpostach.com.ua/a227390-kamin-cherepashnik-vlastyvoli.html>.
2. Novskiy, A.V., Novskiy, V.A., & Tuhaenko, Yu.F. (2014). *Yzvestniak-rakushechnyk. Yssledovanye y yspolzovanye v kachestve osnovaniya fundamentov [Shell limestone. Research and use as a base for foundations]*. Astroprynt.
3. Obval 4-poverkhivky v Odesi – vzhe piaty za 4 misiatsi: chomu tse vidbuvaietsia, i na shcho chekamy liudiam [The collapse of a 4-story building in Odessa is already the fifth in 4 months: why is it happening, and what should people expect]. (2020). <https://tsn.ua/ukrayina/obval-4-poverhivki-v-odesi-vzhe-p-yatiy-za-4-misyaci-chomu-ce-vidbuvayetsya-i-na-scho-chekati-lyudyam-1563342.html>.
4. Kersh, V., Levytskyi, D., & Tykhoniuk, S. (2023). Repair mixture for limestone-shell buildings. *Zbirnyk tez V Mizhn. nauk.-tekhn. konf. «Aktualni problemy enerhoresursozberezhennia ta ekolohii»*. ODABA.
5. *Istorycheskyi tsentr Odessy vkluchen v spysok vsemyrnoho naslediya YuNESKO [The historical center of Odessa is included in the UNESCO World Heritage List]*. <https://newssky.com.ua/ru/istoricheskij-czentr-odessy-vklyuchyon-v-spisok-vsemirnogo-naslediya-yunesko>.
6. MAPE-ANTIQUE MC. <https://www.mapei.com/it/en/products-and-solutions/products/detail/mape-antique-mc>.
7. Dvorkyn, L.Y., Dvorkyn, O.L. (2011). *Stroytelnye myneralnye viazhushchye materyaly [Construction mineral binding materials]*. Infra-Inzheneryia.
8. Kondrashchenko, O.V. (2005). Hipsovi budivelni materialy pidvyshchenoi mitsnosti i vodostiikosti (fyziko-khimichni ta enerhetychni osnovy) [Gypsum building materials with increased strength and water resistance (physical, chemical and energy bases)]. *Abstract of candidate's thesis*. Kharkiv: UkrDAZT.
9. Yefimenko, A.S. (2021). Pidvyshchennia vodostiikosti hipsovykh materialiv polifraktsiinymy mineralnymy dobavkamy [Increasing the water resistance of gypsum materials with polyfractional mineral additives]. *Candidate's thesis*. Kharkiv: UkrDUZT.
10. Novosad, P. V., Sanytskyi, M. A., & Pozniak O. R. (2018). Pidvyshchennia vodostiikosti hipsovykh viazhuchykh [Increasing the water resistance of gypsum binders]. *Visnyk NU "Lvivska politekhnika". Seriya: Teoriia i praktyka budivnytstva. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 888, 111–116.*
11. Voznesenskyi, V.A., Liashenko, T.V., Yvanov, Ya.P., Nykolov, I.I. (1989). *EVM y optymizatsiia kompozytsonnykh materyalov [Computers and optimization of composite materials]*. Budyvelnyk.
12. Kersh, V.Ya., Foshch, A.V., & Kolesnykov, A.V. (2017). Opysanye vodostoikosty hypsosoderzhashchykh kompozytysi s pomoshchiu kombynyrovannoho kryteriya [Description of water resistance of gypsum-containing compositions using a combined criterion]. *Zbirn. nauk. prats UDUZT*. UDUZT.
13. Kersh, V., Levytskyi, D., Tihoniuk, S., & Foshch, A. (2024). Increasing the water resistance of the plaster mixture based on gypsum-containing binder. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia: Nauk.-tekhn. zbirnyk, 86.*
14. DSTU EN ISO 12572:202X (EN ISO 12572:2016, IDT). Hihrotermichni kharakterystyky budivelnykh materialiv ta vyrobiv. Vyznachennia vlastyvostei propuskannia vodianoï pary (paropronyknosti). Chashkovyi metod. (proekt, ostatochna redaktsiia) [Hygrothermal characteristics of building materials and products. Determination of the properties of water vapor transmission (vapor permeability). Cup method (draft, final version)]. Kyiv: DP «UkrNDNTs».
15. Vydy, osoblyvosti ta zastosuvannia shtukaturok u budivnytstvi [Types, features and application of plasters in construction]. (2015). <https://remont.sumy.ua/types-of-plasters/>
16. CERESIT CO 81. (n.d.). <https://www.ceresit.com/products/waterproofing/product.html/ceresit-co-81.html>.
17. Polipropilenoivaia fibra i bazaltovaia fibra sravnenie. [Polypropylene fiber and basalt fiber comparison]. (n.d.). <https://budmat.kiev.ua/stati/polipropilenovaya-i-bazaltovaya-fibra-sravnenie>.

Отримано 28.10.2024



**Volodymyr Kersh<sup>1</sup>, Sergey Tihoniuk<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD, professor of the Department of Urban Construction and Economy,  
Odessa State Academy of Construction and Architecture (Odessa, Ukraine)  
**E-mail:** [kersh@odaba.edu.ua](mailto:kersh@odaba.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6085-5260>  
**ResearcherID:** [LGZ-1769-2024](https://orcid.org/LGZ-1769-2024)

<sup>2</sup> graduate student of the Department of Urban Construction and Economy,  
Odessa State Academy of Construction and Architecture (Odessa, Ukraine)  
**E-mail:** [tihoniuk1984@gmail.com](mailto:tihoniuk1984@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-9444-3905>  
**ResearcherID:** [LGZ-8666-2024](https://orcid.org/LGZ-8666-2024)

**PLASTER COMPOSITION FOR BUILDINGS MADE OF LIMESTONE-SHELL ROCK**

*Most of the historic buildings in the Northern Black Sea region are made of local natural stone, limestone-shell rock, which has quite good technical and operational properties. However, over time, these buildings can be subjected to destructive processes associated with the influence of external factors such as humidity, frost, and mechanical damage. The disadvantage of shell rock is the loss of strength when it is moistened due to damage to the plaster layer or its absence. Soaking the material leads to a decrease in the bearing capacity of the structure, which can lead to the destruction of buildings. To restore shell rock buildings, special repair, and restoration compositions should be used that are consistent in their properties with the material of the structures. An ash and gypsum cement (AGC) mixture was used as the binder of such a composition. The article first presents the results of a comprehensive study of a number of properties of the proposed mixture: water resistance, strength, vapor permeability, adhesion, based on which a conclusion is made about the possibility and expediency of using mixtures based on ZGC binders for repair and restoration work on the facades of limestone buildings. During the experiments to evaluate water resistance, it was found that the strength of the ZGC composition in the wet state (with a softening coefficient  $K_r$  greater than 0.8) exceeds the strength of shell rock under equilibrium humidity, which makes it possible to recommend this composition for use in facade works. At the same time, we confirmed the greater correctness of our proposed criterion - the water resistance index  $I_v$ . According to the measurement results, it was found that the vapor permeability of the samples with the ZGC mixture exceeds the vapor permeability of shell rock, i.e. the plaster layer will not prevent the escape of water vapor from the structure. The adhesion strength of the ZGC composition with the surface of shell rock, when an adhesive additive is introduced, meets the regulatory requirements and can be further increased by a complex of chemical additives and more thorough surface preparation. The possibility of adjusting the deformation properties of the repair mixture using fiberglass is also shown. Further improvement of the repair composition is associated with the use of a complex of chemical additives.*

**Key words:** limestone-shell rock; ash and gypsum cement mixture; planned experiment; water resistance; strength; vapor permeability; adhesion.

*Fig.: 5. Table: 2. References: 17.*

**Сергій Дмитрович Крячок**

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [geodesist2015@gmail.com](mailto:geodesist2015@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5633-1501>ResearcherID: [N-3061-2016](https://orcid.org/0000-0001-5633-1501). SCOPUS Author ID: [57204332476](https://orcid.org/0000-0001-5633-1501)**ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ  
ДЛЯ ВИКОНАННЯ РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ**

*Огляд існуючих систем візуалізації радіаційного випромінювання показав, що системи комптонівської візуалізації та з рухливими детекторами спроможні працювати у віддаленому радіаційному полі та мають невелику вагу, а тому найбільш придатні для застосування на платформах БПЛА. У результаті аналізу встановлено, що наразі системи комптонівської візуалізації ефективні лише для виявлення джерел радіаційного випромінювання в тісному міському середовищі та приміщеннях, а системи з рухливими детекторами дозволяють виконувати гамма-моніторинг повному обсязі.*

**Ключові слова:** безпілотні літальні апарати; радіаційний моніторинг; системи візуалізації; дистанційне зондування Землі.

*Рис.: 12. Табл.: 1. Бібл.: 18.*

**Актуальність теми дослідження.** За останні десятиліття розвиток цифрових та інформаційних технологій, елементної бази стали поштовхом для створення засобів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), у тому числі з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що значно розширило горизонти застосування геодезичної науки для забезпечення геопросторовою інформацією різних галузей економіки, науки, військової сфери, а також для розв'язання різноманітних інженерних задач і прийняття управлінських рішень [1].

Наразі відбувається активізація існуючих та поява нових терористичних режимів. Це може спровокувати використання ними засобів масового ураження включно з ядерними зарядами. Потенційними цілями для нападу є атомні електростанції, об'єкти інфраструктур, центри прийняття рішень. Крім того, у спеціалізованих лабораторіях та наукових центрах використовуються ядерні реактори малої потужності, які в результаті аварії можуть спричинити викиди радіоактивних речовин. Розвиток ядерних технологій веде до поширення джерел радіоактивного випромінювання.

Тому актуальним є розробка засобів ДЗЗ для моніторингу радіоактивного випромінювання на платформах БПЛА, які націлені на пошук джерел радіоактивного випромінювання, картографування природного підвищеного радіаційного фону або забруднених радіонуклідами територій [2].

Елементна база БПЛА постійно удосконалюються [3]. Завдяки невеликій швидкості та малій висоті польоту БПЛА забезпечується висока роздільна здатність пошуку та картографування радіаційного поля, а конструкції, приладове наповнення та експлуатація мають значно меншу вартість в порівнянні з літаками та гелікоптерами і дозволяють убезпечити операторів від дії радіаційного випромінювання в порівнянні з наземними методами [4]. Стаття є оглядово-аналітичною.

**Постановка проблеми.** Такі різновиди радіації як рентгенівське і гамма-випромінювання від часу їх відкриття широко застосовуються в науці, техніці, промисловості, медицині. Практичне застосування цих випромінювань пов'язане з їх проникною здатністю. Ця властивість дозволяє спостерігати та досліджувати внутрішні структури оптично непрозорих об'єктів та процесів, є маркерами для виявлення джерел радіоактивного випромінювання, однак є небезпечною для здоров'я та життя людини.

Застосування методів досліджень, діагностики та виявлення стає ефективним з розвитком методів візуалізації радіаційного випромінювання. Візуалізація включає в себе детектування та комп'ютерну обробку лічильної і спектральної інформації про радіаційне випромінювання з метою отримання його оптичного уявлення, вивчення структури джерела випромінювання та локалізації його місцеположення [5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У системах візуалізації використовуються різноманітні детектори виявлення радіаційного випромінювання. Їхня дія ґрунтується на тому, що потрапляння високо енергетичної ядерної частинки в матеріальне середовище, веде до його іонізації. Детектори мають свої різновиди за способом фіксації іонізованих потоків. Так, у детекторі Гейгера-Мюллера за високої напруги від 500 В до 800 В між анодом і катодом та наявності в середині балона інертного газу, індукується явище газового підсилення, яке прискорює вільні електрони від початкової іонізації до появи неконтрольованої ланцюгової лавини по всьому об'єму газу, генеруючи електричний імпульс або відлік. Цей процес триває від 200 до 400 мкс, протягом якого детектор вважається «мертвим» і нездатним виявляти нові ядерні частинки, перш ніж він зможе знову почати рахувати імпульси. Для зменшення «мертвого» часу, наприклад, додають всередину газової трубки 10 % етанолу. Детектор фіксує інтенсивність випромінювання за частотою відліків [6; 7].

У сцинтиляційному детекторі використовується властивість матеріального середовища поглинати енергію від зарядженої частки, яка призводить до випромінювання світла – сцинтиляції. Для цього використовуються неорганічні кристалічні сцинтилятори, такі як йодид натрію (NaI), сульфід цинку (ZnS) та інші. Ультрафіолетове світло, що утворюється в сцинтиляторі, фокусується на фотокатоді, викликаючи фотоефект, який посилюється, наприклад, фотопомножувачем. Сигнал від сцинтиляційного детектора пропорційний енергії зареєстрованого гамма-фотона, а частота відліків, яка відповідає частоті спалахів світла, фіксує інтенсивність випромінювання [6; 7].

У напівпровідниковому детекторі падаюче випромінювання призводить до появи електронно-діркових пар у напівпровіднику, завдяки чому формується сигнал детектування. Ці детектори можуть працювати при низькій напрузі, мають низьке енергоспоживання, менш чутливі до електромагнітних полів і значно менші за розміром та через значну щільність твердого тіла можуть забезпечити більше інформації стосовно падаючого випромінювання в порівнянні з іншими типами детекторів [6; 7].

Характеристиками систем візуалізації радіаційного випромінювання є поле зору, просторова роздільна здатність, енергетична роздільна здатність. Кут поля зору є тілесний кут, у середині якого відбувається збір радіаційного випромінювання детектором. Просторова роздільна здатність визначає деталізацію об'єкта зображення. Енергетична роздільна здатність визначає, наскільки добре окремі гамма-лінії в енергетичному спектрі випромінювання можна відрізнити від інших ліній і фону [8].

Існуючі системи візуалізації гамма-поля поділяють на наступні групи: системи із колімованими детекторами; системи із кодовою апертурою; системи із обертовою модуляцією; системи комптонівської візуалізації; системи з рухливими детекторами (спрямовані системи) [5; 8].

Системи візуалізації із колімованими детекторами використовують позиційно-чутливі детектори – матриці чи масиви із окремих детекторів випромінювання або неперервні кристали сцинтиляторів із системою реєстрації положення спалахів від взаємодії гамма-квантів з речовиною сцинтилятора. Наприклад, камера Анжера містить важкий поглинач, виготовлений зі свинцевих або вольфрамових сплавів з багатьма отворами. Отвори можуть мати різну форму, від круглої до шестигранної. Поглинач розміщується перед чутливим до положення детектором гамма-випромінювання (рис. 1). [8].

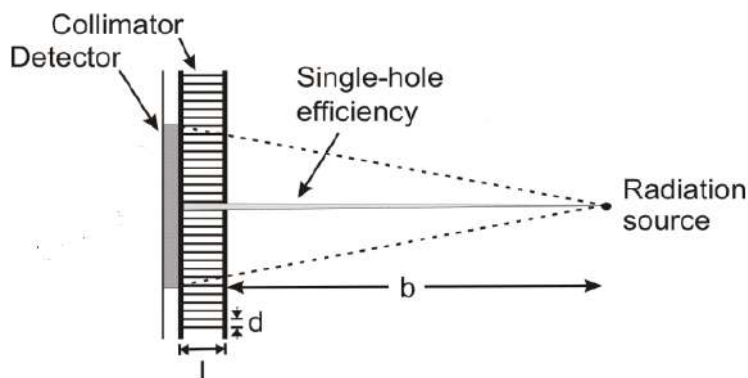


Рис. 1. Камера Анжера: коліматор з детектором та системою паралельних отворів довжиною  $l$  та діаметром  $d$ , який розміщено на відстані  $b$  від джерела радіаційного та у ближньому полі має ефективність одного отвору [8]

У ближньому полі, поширеному в ядерній медицині, гамма-промені від об'єктів можна побачити лише через кілька отворів, більшість падаючих гамма-променів блокується передньою поверхнею коліматора. Отже, просторова роздільна здатність визначається практично ефективністю одного отвору. Перегородки втрачають своє призначення, якщо джерело випромінювання віддаляється від них на відстань, більшу за 10 м. Тоді падаючі гамма-промені можна розглядати як паралельні. Це означає, що жодна структура об'єкта не може бути розрізнена в межах поля зору коліматора. У цьому випадку така система перетворюється в трубку-коліматор, та забезпечує можливість отримання зображень лише шляхом переміщення системи вздовж об'єкта дослідження [8].

Для підвищення ефективності та збільшення поля зору були розроблені коліматори, у вигляді системи отворів, поширених по площин – системи з кодовою апертурою. Системи з кодовою апертурою унікально модулюють кожену позицію в полі зору на чутливий до положення детектор гамма-випромінювання. Отримане зображення необхідно декодувати, використовуючи цифровий або оптичний методи. Застосовуються для отримання рентгенівських зображень. На рис. 2 показано схему системи з кодовою апертурою у вигляді гамма-сканера. Ефективність зображення обмежена в умовах високої активності і складного гамма-фону. Система з кодовою апертурою може лише зменшити інтенсивність фону відносно сигналу, але не може їх повністю розрізнити, особливо для візуалізації протяжних об'єктів. У дальньому радіаційному полі кодована апертура еквівалентна простій точковій системі [8].

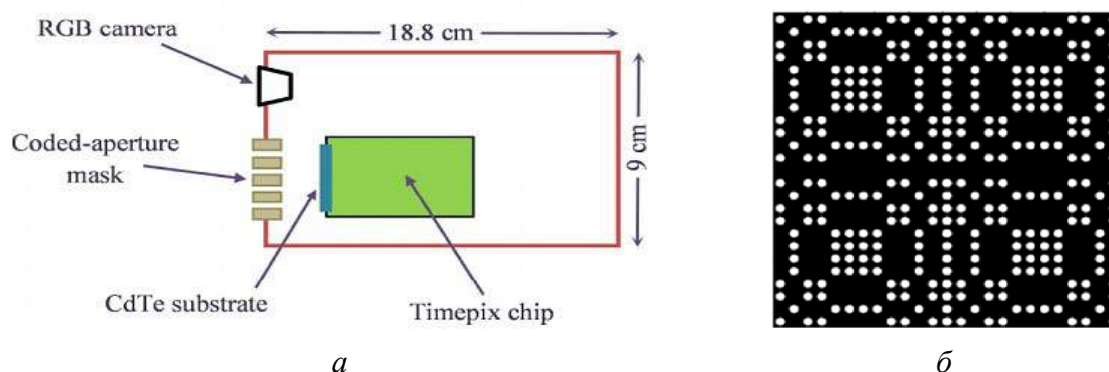


Рис. 2. Гамма-сканер:

*а* – оптична камера, маска з кодовою апертурою, детектор CdTe (на телуридї кадмію), чіп Тітеріх для виявлення радіоактивних фотонів [9];

*б* – вигляд маски з кодовою апертурою, виготовленої з вольфраму [10]

Системи з кодовою модуляцією можуть використовувати принцип «маска-антимаска» (рис. 3, а). Для реалізації такої системи необхідно мати маску, складену з кількох періодів рівномірно-надлишкового масиву, розташування кожного з детекторів навпроти одиничного елемента маски та можливості перетворення маски в антимаску завдяки обертанням її на  $180^\circ$ . Це дозволяє компенсувати нерівномірність фонового опромінення детекторів. Система може працювати з джерелами гамма-випромінювання, розташованими на значних відстанях - за паралельних променів [8].

Система із обертовою модуляцією (обертально-модуляційний коліматор) може складатися з двох наборів паралельних решіток з екрануючого матеріалу (рис. 3, б). Обидві решітки обертаються разом перед детектором, модулюючи випромінювання, що на нього потрапляє. Таким чином, рівень випромінювання залежить від куту надходження сигналу у систему та від поточного кута повороту решіток і може бути відтворений за допомогою відповідного алгоритму. Системі не потрібен чутливий до положення детектор гамма-випромінювання. За дальнього поля випромінювання системи із обертовою модуляцією втрачають свою ефективність [5; 8].

Концепція комптонівської візуалізації спирається на процес комптонівського розсіювання і зв'язок між кутом розсіювання  $\theta$  та енергією падаючого гамма-випромінювання (рис. 4, а).

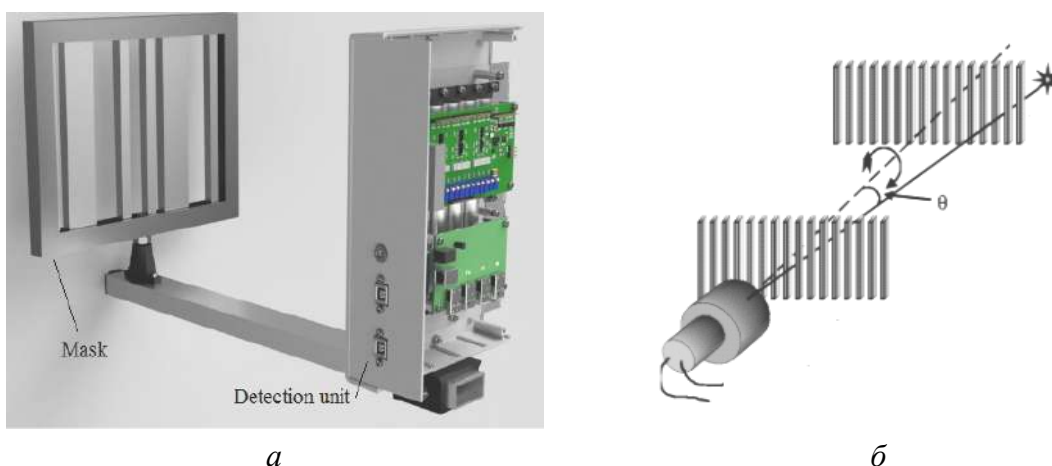


Рис. 3. Системи, що потребують обертання масок:

а – система «маска-антимаска» [11]; б – система із обертовою модуляцією [8]

Система комптонівської візуалізації, на відміну від звичайних і коліматорних систем візуалізації, вимагає, щоб падаюче гамма-випромінювання взаємодіяло принаймні двічі в детекторі: одне комптонівське розсіювання і одне фотоелектричне поглинання. Положення перших двох взаємодій визначають вісь симетрії конуса, кут відкриття якого  $\theta$  визначається енергією першої взаємодії та повною енергією гамма-випромінювання (рис. 4, а). Проекції конусів від кількох взаємодій на сферу будуть перекриватися в місці розташування джерела (рис. 4, б), що дозволяє визначати його положення в трьох вимірах [8].

Комптонівські системи візуалізації є єдиними, які здатні розрізнити фон і джерело випромінювання тому, що можуть вимірювати і те і інше, одночасно. Досягнення у двовимірній сегментації напівпровідникових детекторів та обробці сигналів дозволяють створити ефективні системи комптонівської візуалізації з високою роздільною здатністю. Ця система здатна працювати в дальньому радіаційному полі [8].

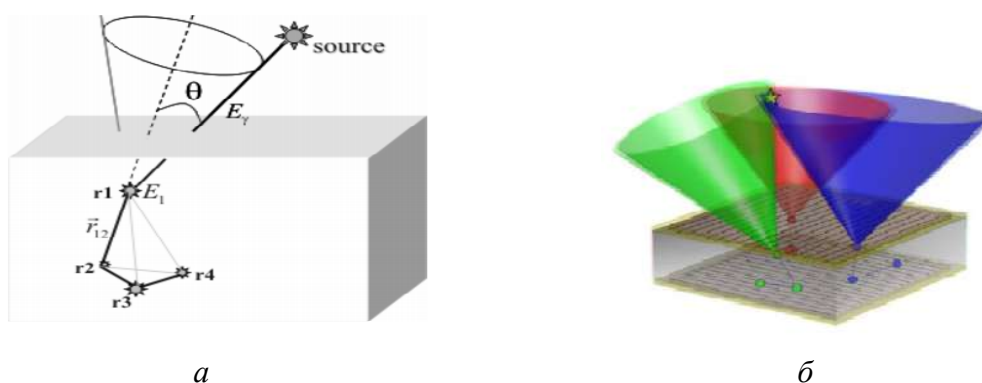


Рис. 4. Ілюстрація принципу комптонівської візуалізації:

*a* – зв'язок між кутом розсіювання  $\theta$  та енергією падаючого гамма-випромінювання;  
*б* – перетин конусів розсіювання, який фіксує місцеположення джерела випромінювання [8]

Системи з рухливими детекторами – це досить прості пристрої, які складаються з нечутливих до положення детекторів. Вони дозволяють визначати місцезнаходження джерел за умови, що система виявлення наближається до джерела. Це наближення виконується шляхом визначення інтенсивності гамма-випромінювання за швидкістю підрахунку в детекторі як функції часу переміщення і/або місця розташування. Системи з рухливими детекторами можуть мати спрямовані або всепрямовані детектори. Кут поля зору  $\beta$  відповідає значенню просторової роздільної здатності. Спрямовані детектори можуть мати екранування (рис. 5, *a*).

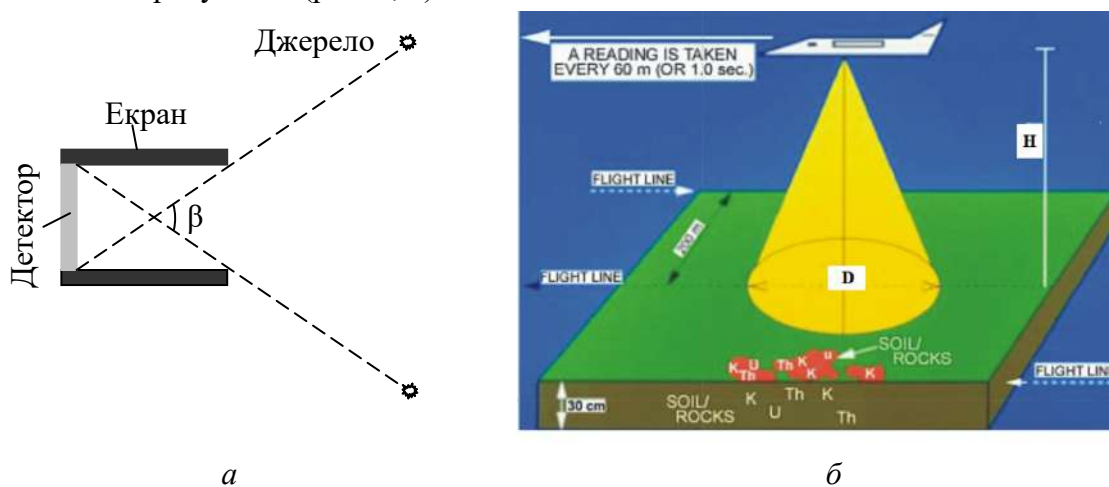


Рис. 5. До системи з рухливим детектором:

*a* – кут поля зору спрямованого детектора  $\beta$  (розроблено автором);  
*б* – система візуалізації з рухливим детектором повітряного базування [8]

Екранування створює тінь, яка дозволяє більш точно і надійно визначення місцезнаходження джерела, ніж це можливо з неекранованим детектором. Такий спрямований детектор має, як правило, вигляд трубки-коліматора. Кут поля зору за висоти  $H$  визначає поле зору - діаметр  $D$  території на земній поверхні, від якої радіаційне випромінювання надходить до детектора (рис. 5, *б*). Ці системи здатні працювати у дальньому радіаційному полі [5; 8].

**Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми.** Зведена інформація стосовно основних технічних параметрів систем візуалізації наведена в таблиці.

Таблиця – Зведена інформація основних технічних параметрів систем візуалізації [8]

Параметри	Коліматор	Кодова апертура	Обертova модуляція	Комптона візуалізація	Рухливий детектор
Кут поля зору	< 60°	< 60°	< 60°	180° чи 360°	30° - 360°
Просторова роздільна здатність	< 30°	< 5°	< 5°	1° - 5°	≥ 30°
Енергетична роздільна здатність	Погана – відмінна	Погана – відмінно	Погана – відмінна	Добра – відмінна	Погана – відмінна
Мінімальна вага, кг	20	20	20	0.5	0.1

Мінімальна вага відповідає детекторам для енергій гамма-випромінювання до 500 МеВ, енергетична роздільна здатність залежить від конкретного типу детектора [8].

Як зазначалось вище, системи з колімованими детекторами та кодовою апертурою втрачають свої властивості стосовно розрізнення в дальньому радіаційному полі та в цьому випадку еквівалентні системам з рухливими детекторами. Системи комптонівської візуалізації та з рухливими детекторами можуть працювати в дальньому радіаційному полі, мають згідно з таблицею найменшу вагу в порівнянні з іншими системами. Тому зрозуміло, що наразі саме системи з рухливими детекторами та комптонівської візуалізації придатні для застосування на БПЛА.

Гамма-випромінювання належать до електромагнітного випромінювання та знаходиться у кінці короткохвильового, високоенергетичного діапазону з довжиною хвилі менше  $2 \cdot 10^{-10}$  м. Це випромінювання є найбільш проникним серед видів радіоактивного випромінювання [12]. Тому на виявлення саме гамма-випромінювання націлені повітряні системи радіаційного моніторингу.

**Мета статті.** Головною метою цієї статті є аналіз особливостей застосування засобів ДЗЗ для гамма-моніторингу у вигляді систем комптонівської візуалізації та з рухливими детекторами, розташованими на платформах БПЛА.

**Виклад основного матеріалу.** Загальні вимоги до системи гамма-моніторингу на платформі БПЛА наведено у статті [2]. Обладнання для виявлення радіації має бути незалежним модулем. Модуль визначення місцеположення складатиметься з GPS, що контролюється мікроконтролером. На БПЛА може бути встановлена відеокамера для візуалізації місцезнаходження даних. Модулі повинні живитися від батареї малих розмірів та ваги. Зібрані дані повинні передаватися на наземну станцію, розташовану в базовому таборі, в режимі реального часу за допомогою телеметричної системи модуля радіочастотного зв'язку. Наземні модулі відображають цифрові карти, взяті, наприклад, з онлайн-карт Google maps. Система повинна бути укомплектована програмним забезпеченням для обробки та інтеграції даних про характеристики радіаційного випромінювання, координати місцезнаходження, висоту.

Відоме застосування системи для розвідки наслідків витоку радіації на атомній станції Фукусіма в Японії [13]. Для дистанційного вимірювання розподілу радіації в середині будівель АЕС "Фукусіма" було розроблено систему дистанційної радіаційної візуалізації з використанням легкої компактної камери Комптона. Система базувалась на мультикоптері, на якому встановлено: камеру Комптона, оптичну камеру, закріплених на кардановому підвісі; бортовий комп'ютер; GPS-приймач, акумулятор живлення (рис. 6, а). Комптонівська камера складалась з двох частин: сенсора гамма-променів, блоку обробки сигналів. Вага всієї установки не перевищувала 1 кг. Гамма-сенсор складався з двох частин - розсіювача та поглинача (рис. 6, б). Кожна частина складалась з багатоелементного сцинтилятора, поєднаного з багатопіксельним лічильником фотонів. Відстань між розсіювачем та поглиначем становила 23,5 мм. Гамма-сенсор з'єднувався з блоком обробки сигналів, який реєстрував і обробляв інфо-



рмацію про положення взаємодії гамма-квантів і значенням енергії, що виділялась в розсіювачі і поглиначі. Оброблені гамма-сигнали та оптичні зображення від оптичної камери надходили на комп'ютер. Для ідентифікації джерела радіаційного випромінювання БПЛА зависав над джерелом радіаційного випромінювання на 3 хвилини на висоті близько 2 метрів. Радіаційні зображення реконструювались методом зворотної проєкції і накладалися на оптичні зображення - для візуалізації радіоактивних речовин (рис. 6, в) [13].

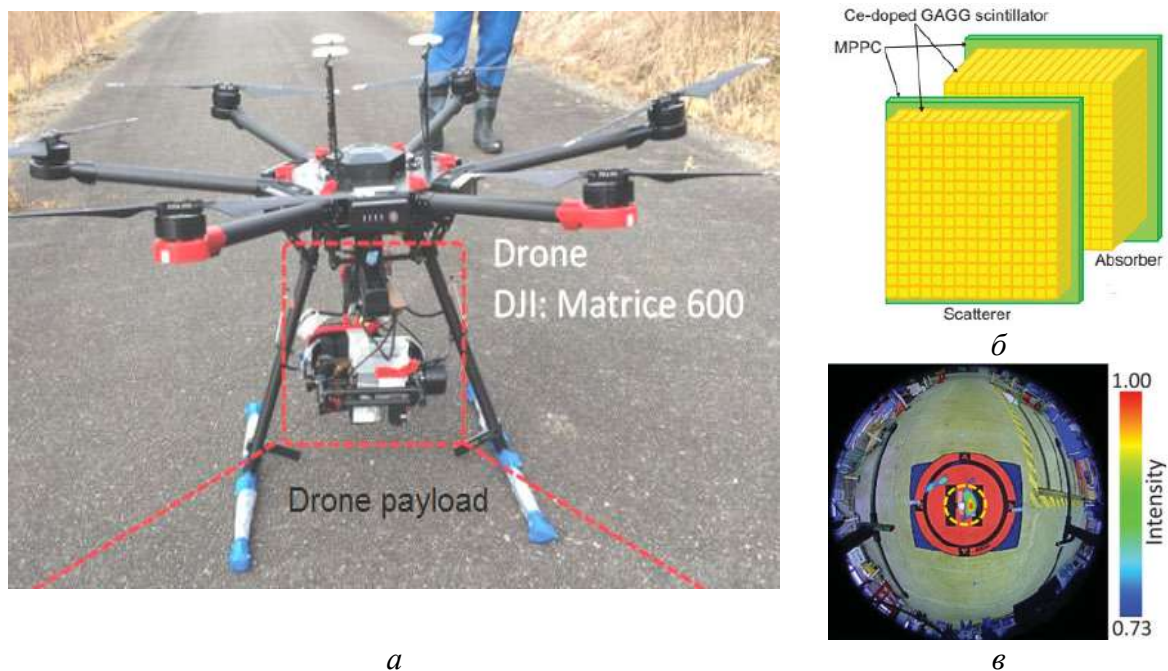


Рис. 6. Системи дистанційної радіаційної розвідки на основі камери Комптона:  
 а – зовнішній вигляд системи на платформі мультикоптера; б – схема гамма-сенсора;  
 в – візуалізація «гарячої точки» на підлозі споруди АЕС [13]

Систему дистанційного радіаційного моніторингу на платформі БПЛА для картографування ядерних могильників та визначення характеристик їх радіаційного випромінювання було використано на території зони відсудження навколо Чорнобильської АЕС [14]. БПЛА коптерного типу містила: гіростабілізовану платформу, на якій розміщувалась система радіаційного моніторингу GR-Smart; давачі орієнтації, швидкості та напрямку польоту; GPS-приймач; радіоканал зв'язку з наземною станцією. Бортова система GR-Smart зберігала під час польоту: географічні координати, висоту, тиск, температуру та спектрометричні дані. Комп'ютеризована наземна станція виконувала: прийом даних через Wi-Fi від GR-Smart; опрацювання даних; ведення бази даних; побудову спектрів радіонуклідів та кількості відліків за секунду; виявлення локальних зон радіоактивного забруднення; визначення потужності дози гамма-випромінювання; визначення координат точкових джерел гамма-випромінювання; побудову контурної карти розподілу гамма-випромінювання та документування даних радіаційного моніторингу.

Основним елементом GR-Smart є спектрометр – аналізатор гамма-випромінювання на основі йодиду натрію NaI (Tl) з кремнієвим фотопомножувачем. Спектральна інформація накопичується у вигляді «амплітуда – час». Інформація від п'яти детекторів з частотою збору гамма-квантів 10 Гц синхронізувалась в одному комплексному детекторі. Канал передачі даних Wi-Fi забезпечував передачу інформації в режимі реального часу на відстань до 1 км. За допомогою система GR-Smart можна обстежувати 3 км<sup>2</sup> за годину. Тривалість польоту – 40 хвилин. Заміна батареї триває 5 хвилин. Тому за один день БПЛА здатен обстежити до 21 км<sup>2</sup> [14].



Для встановлення зв'язку між показами спектрометра і значеннями інтенсивності радіоактивного забруднення було проведено калібрування підсистеми GR-Smart. Для цього було підготовлено калібрувальний майданчик на території Чорнобильської зони з паспортизованими параметрами активності радіонуклідів, отриманими за допомогою наземних вимірювань з висоти 0,5 м. Для таких же радіонуклідів планувалось виконувати обстеження в Чорнобильській зоні. Далі, були виміряні інтенсивності іонізуючого випромінювання над калібрувальним майданчиком та поблизу нього з БПЛА з висоти 10 м. На основі вимірів були сформовані масиви калібрувальних параметрів. За допомогою системи віддаленого радіаційного моніторингу було виконано аерознімання ядерних могильників на території піщаного плато Чорнобильської зони з висоти 30 м та швидкості БПЛА 2,8 м/с (рис. 7) [14].

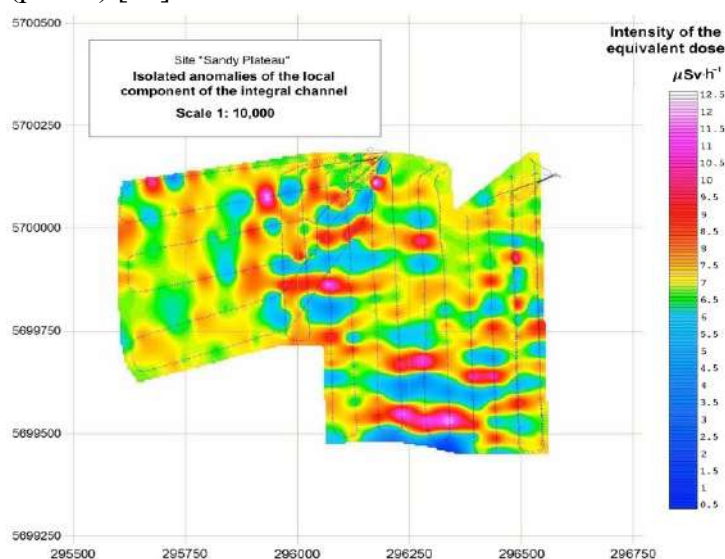


Рис. 7. Карта розподілу еквівалентної дози гамма-випромінювання радіоактивних джерел по території піщаного плато [14]

У роботі [15] наведено відомості стосовно застосування БПЛА вертикального зльоту і посадки з фіксованим крилом (the vertical take-off and landing - VTOL) в якості платформи для повітряного гамма-картографування (рис. 8, а). Така система є корисною для реагування на ядерні аварії, коли терміново потрібно виконати картографування місцевості, а також розвідку корисних копалин і зйомки радіоактивних шахтних майданчиків. VTOL має масу 4,5 кг, крейсерську швидкість 60 км за годину, несе корисне навантаження 800 г, має стійкість до вітру зі швидкістю 45 км за годину, час польоту становить 55 хв. До корисного навантаження належить GPS-приймач та система автономного повітряного радіаційного картографування. До її складу входять: сцинтилятор на кристалі йодиду цезію CsI(Tl); напівпровідниковий детектор на основі телуриду кадмію-цинку - щоб додати можливості гамма-спектрометричного картографування для енергій понад 1,4 МеВ; GPS-приймач. БПЛА має лідар та блок живлення. Радіологічні дані зберігаються і передаються через стільниковий зв'язок – для отримання даних в реальному часі [15].

Для тестування системи VTOL було використано стару уранову копальню. Польоти виконувались за галсами в автоматичному режимі на висоті 70 м зі швидкістю 15 м/с з інтервал між галсами 20 м. Гамма-спектри зібрані з частотою 10 Гц, які під час постобробки були об'єднані в більші часові інтервали 1, 2 і 5 Гц. Отримані спектральні інтенсивності завдяки калібруванню були перетворені в потужності еквівалентної дози. Кожне вимірювання було скориговано за різницю висот над рівнем землі з використанням ви-

соти, зафіксованої LiDAR з борту БПЛА, та з урахуванням коефіцієнта лінійного ослаблення повітря зі стандартною температурою і тиском для відповідних енергій фотонів та приведенне до висоти 1 м над землею поверхнею.

Візуалізація оброблених даних виконана в програмі ArcGIS Pro з інтерполяцією радіометричних даних за допомогою інструменту Empirical Bayesian Kriging. У результаті була отримана карта місцевості з розподілом потужностей доз на території уранової копальні у вигляді ізоліній рівних потужностей доз (рис. 8, б) [15].

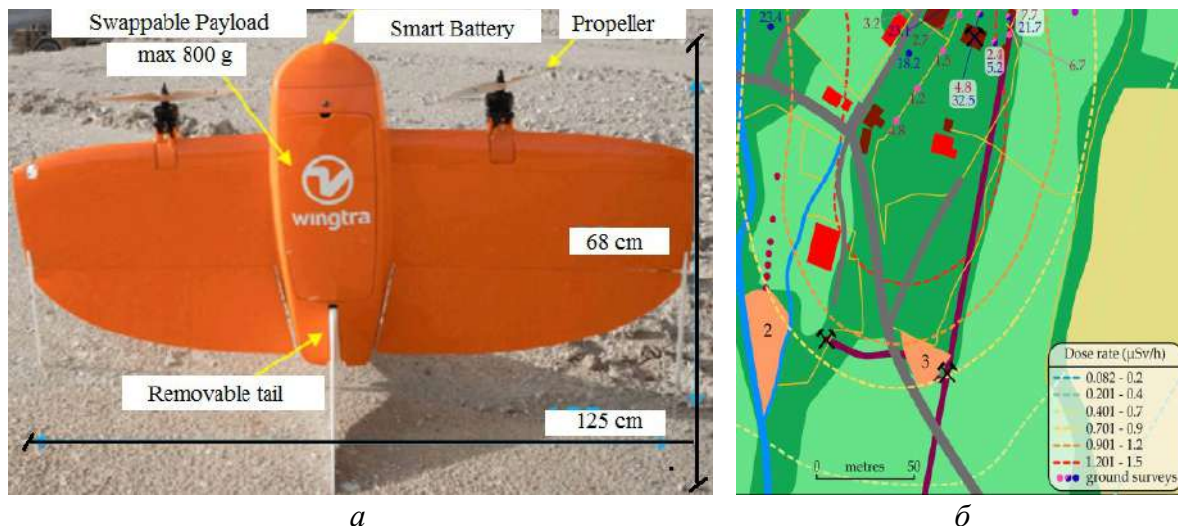


Рис. 8. БПЛА з вертикальним зльотом і посадкою з фіксованим крилом та результати гамма-знімання:

а – корпус БПЛА, що містить корисне навантаження до 800 гр, змінний хвіст, «розумну» батарею, пропелер; б – карта місцевості з розподілом потужностей доз гамма-випромінювання [15]

Система дистанційного виявлення гамма-випромінювання з використанням безпілотних систем та готових компонентів наведена в роботі [16]. Вона розроблена з метою використання у складі мобільної платформи ДЗЗ, зокрема, з БПЛА. Система встановлюється на платформу БПЛА DJI Matrice 200 та містить модулі: детектор гамма-випромінювання; аналогово-цифровий перетворювач електричних сигналів від детектора та їх зберігання; головний модуль, який виконує керування та зв'язок з іншими модулями; радіочастотний модуль – для зв'язку з наземною станцією; давач температури; GPS-модуль; карта пам'яті, де зберігаються спектральні дані та значення температури; блок живлення напругою 5 вольтів.

Як чутливий матеріал для детектора гамма-випромінювання використано кристал на основі йодиду цезію CsI(Tl) розміром  $10 \times 10 \times 40$  мм. Йодид цезію має високий коефіцієнт поглинання гамма-випромінювання завдяки його відносно високій щільності та атомному номеру. Він досить міцний і добре підходить для застосувань у середовищі, де зустрічаються вібрація. Імпульси світла перетворюються в електричні сигнали за допомогою кремнієвого фотоелектричного помножувача (SiPM). Системи може містити кілька каналів виявлення гамма-випромінювання, що працюють одночасно, на основі сцинтиляційних детекторів. Це потенційно підвищує статистичну достовірність виявлення та ідентифікацію джерела радіоактивного випромінювання. З використанням давача температури відбувається керування SiPM – для забезпечення його стабільної напруги. Для зменшення впливу електромагнітних завад система розташована в середині алюмінієвого корпусу та використано версію радіочастотного приймально-передавального модуля,

який працює на частоті 2,4 ГГц. Він може досягати відстані зв'язку до 2 км. Аналогічний модуль, що діє як радіоприймач, використовувався для декодування і отримання даних на наземній станції. Передача даних від БПЛА виконується щосекунди [16].

Графічний інтерфейс наземної станції дозволяє будувати спектри радіонуклідів, а також кількості відліків за секунду (counts per second - CPS) з прив'язкою до координатної інформації – для ідентифікації місцеположення джерела гамма-випромінювання. Реакція системи детектування протестована шляхом опромінення сцинтиляторів закритими каліброваними гамма-випромінювачами  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  та  $^{241}\text{Am}$ . Ці дані були використані для енергетичного калібрування системи детектування, тобто приведення у відповідність каналів виявлення інтенсивності випромінювання до відповідних енергій вказаних гамма-випромінювачів. Система пройшла апробацію для виявлення радіоактивного джерела  $^{137}\text{Cs}$  потужністю 500 МБк. Система змогла ідентифікувати «гарячу точку» радіоактивного поля (рис. 9, а) та визначити природу гамма-випромінювача (рис. 9, б) [16].

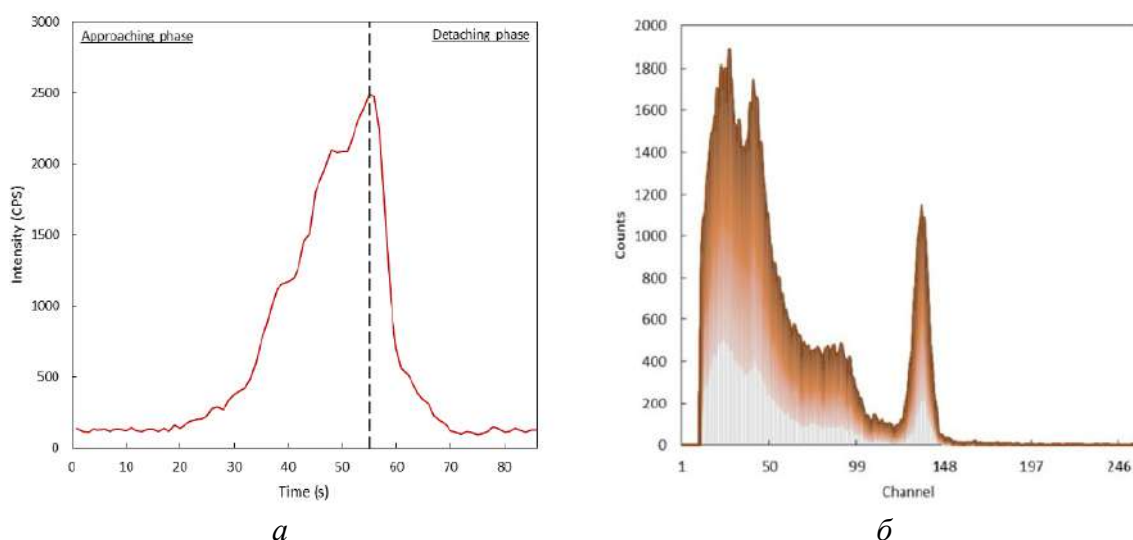


Рис. 9. Результати випробувань системи виявлення радіації:

а – виявлена активність за кількістю відліків за секунду на відстані 55 м від точки старту під час польоту БПЛА; б – зібраний спектр гамма-випромінювання джерела  $^{137}\text{Cs}$ , як залежність інтенсивності випромінювання від енергетичних каналів його реєстрації [16]

Систему виявлення джерел гамма-випромінювання з вдосконаленим детектором радіації (Advanced Radiation Detector for UAV Operations – ARDUO), для розташування на платформі БПЛА у вигляді гвинтокрила з вантажопідйомністю до 6 Кг наведено в статті [17]. Система містить: барометр, приймач GNSS, компас, інерційний вимірювальний прилад – для визначення свого положення і орієнтації кожні 0,02 секунди. Детектор ARDUO має 8 кристалів CsI(Tl) розміром  $2,8 \times 2,8 \times 5,6$  см, розміщених у самозахищеній конфігурації, з кремнієвими фотопомножувачами. Автопілот БПЛА реєструє широту, довготу, висоту над рівнем землі та орієнтацію за допомогою розширеного фільтра Кальмана й набору перелічених давачів, надаючи кожному вимірюванню випромінювання позицію та координати для подальшого аналізу. Інформація щосекунди передається на станцію керування операторові (рис. 10). Номінальні параметри польоту для ARDUO становили: висота 10 м, швидкість 2 м/с, відстань між галсами пошуку 4 м.

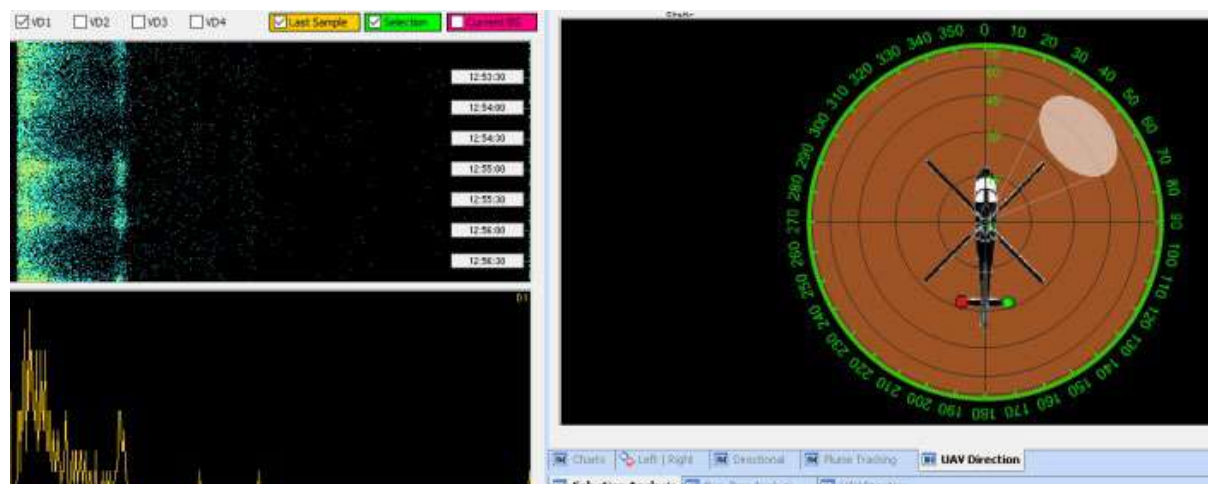


Рис. 10. Перегляд даних на дисплеях оператора в реальному часі над джерелом гамма-випромінювання  $^{137}\text{Cs}$ : верхній лівий дисплей на вертикальній осі показує час; енергію на горизонтальній осі; її кількість по площині дисплея; нижній лівий дисплей показує поточний одnoseкундний енергетичний спектр для одного детектора (для ідентифікації ізотопу); на правому дисплеї показано поточну реконструкцію напрямку, що вказує на джерело за азимута  $50^\circ$  за кута підйому близько  $45^\circ$  [17]

Сутність самозахистної конфігурації детектора у наступному. Кристали ближчі до джерела випромінювання екранують кристали, які розташовані за ними. Тому кристали ближчі до джерела митимуть відносно вищу швидкістю підрахунку гамма-квантів, ніж екрановані кристали (рис. 11, а). Використовуючи відносні швидкості лічби в кожному з восьми кристалів, можна розрахувати вектор напрямку  $v = (u, v, w)$  на джерело у трьох вимірах [17]

$$u = c_1 + c_5 - c_3 - c_7, \tag{1}$$

$$v = c_2 + c_6 - c_4 - c_8, \tag{2}$$

$$w = c_5 + c_6 + c_7 + c_8 - c_1 - c_2 - c_3 - c_4, \tag{3}$$

де  $c_i$  - кількість відліків за секунду в кристалі під номером  $i$ .

Азимут відносно напрямку на ніс гвинтокрила і нахил відносно умовного горизонту обчислюється за формулами (рис. 11, а) [17]

$$Azimuth = \arctg\left(\frac{u}{v}\right) - 45^\circ, \tag{4}$$

$$Elevation = \arccos\left(\frac{w}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}}\right) - 90^\circ. \tag{5}$$

Алгоритм реконструкції напрямку дозволяє видавати результат для будь-якого спектра в реальному часі до ідентифікації ізотопу та є результативним для виявлення місцеположення навіть сильно екранованих ізотопів або змішаних полів випромінювання завдяки широкому діапазону енергій від 0,1 MeV до 3,0 MeV.

Систему виявлення джерел гамма-випромінювання з детектором ARDUO спроможна виконувати гамма-знімання території з відомими ізотопами, розташованими на ній. Для цього під час польоту БПЛА виконується збір гамма-квантів та побудова одnoseкундних координатно орієнтованих спектрів (рис. 11, б). За зміною інтенсивності гамма-випромінювання у малих енергетичних вікнах конкретного ізотопу та відомими координатами будуватиметься карта його розповсюдження в універсальній поперечній проекції Меркатора [17].



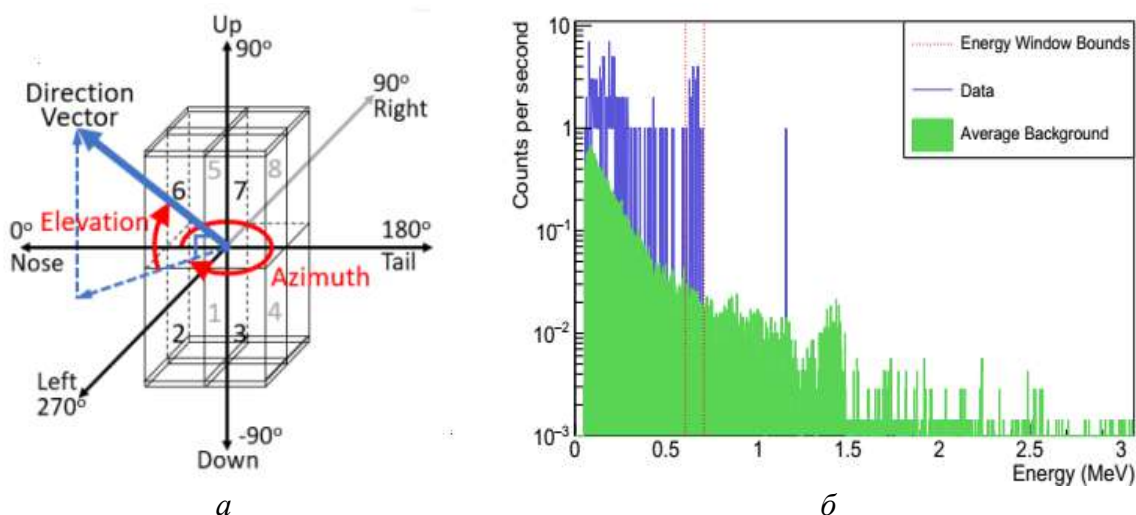


Рис. 11. До ідентифікації напрямку на ізотоп та його необроблений спектр: а – сутність самозахисту детектора ARDUO; б) – зібраний одnoseкундний спектр гамма-випромінювання джерела <sup>137</sup>Cs з фотоніком для енергії 0,662 MeV у межах малого енергетичного вікна шириною 100 KeV) [17]

У статті [18] представлено розробку нової мініатюрної системи для локалізації та оцінки компактних джерел гамма-випромінювання на платформах міні роторних літальних апаратів (рис. 12, а). Система використовує односенсорну камеру Комптона. У камері Комптона використано детектор на основі телуриду кадмію (CdTe) для вимірювання продуктів комптонівського розсіювання у вигляді вхідних високоенергетичних гамма-фотонів. Камера може також виявляти β частки і важкі іони. Сліди частинок можуть бути класифіковані для визначення природи джерела випромінювання. На відміну від двосенсорної камера [13], використано лише один давач для вимірювання продуктів розсіювання. Для цього було використано напівпровідниковий CdTe детектор товщиною 2 мм, здатний викликати у своїй товщі ефекти розсіювання, а також фіксувати продукти розсіювання багатопіксельним сенсором (рис. 12, б) [18].

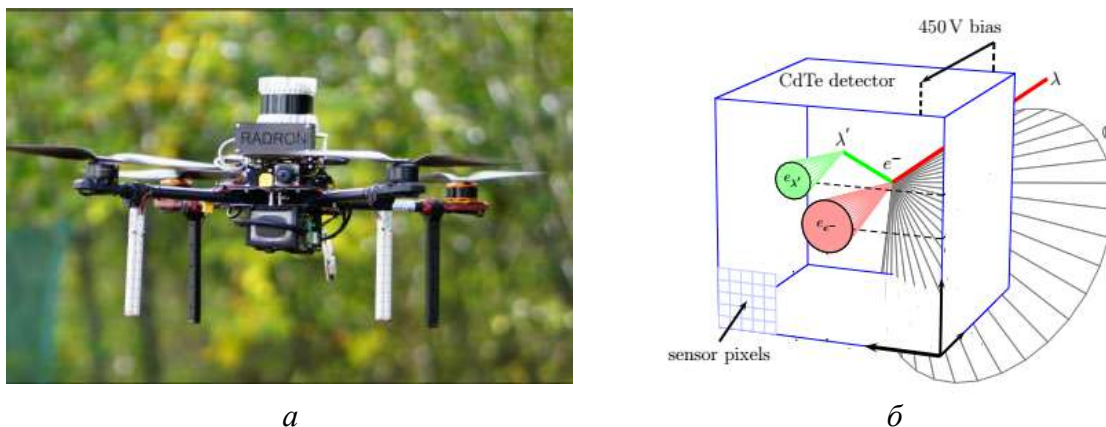


Рис. 12. Мініатюрна система локалізації для виявлення та оцінки компактних джерел гамма-випромінювання: а – зовнішній вигляд системи на платформі міні-БПЛА); б – ілюстрація ефекту комптонівського розсіювання в детекторі CdTe товщиною 2 мм та напругою 450 в, коли вхідний гамма-фотон λ змінює свій імпульс у напрямку λ' від центру розсіювання та утворює електрон e<sup>-</sup> [18]

**Висновки.** У статті виконано огляд існуючих систем візуалізації радіаційного випромінювання: з колімованими детекторами; з кодовою апертурою; з обертовою модуляцією; комптонівської візуалізації; з рухливими детекторами. У результаті стає зрозумілим, що саме системи комптонівської візуалізації та системи з рухливими детекторами завдяки спроможності працювати у віддаленому радіаційному полі та невеликим ваговим характеристикам наразі придатні для застосування на платформах БПЛА.

Аналіз особливостей застосування засобів ДЗЗ для гамма-моніторингу у вигляді систем комптонівської візуалізації та з рухливими детекторами дозволяє зробити такі висновки:

- наразі системи комптонівської візуалізації дозволяють виконувати виявлення джерел радіаційного випромінювання на малих висотах та малих швидкостях із затримкою над джерелом у кілька хвилин - для ідентифікації джерела, що робить їх ефективними для пошуку у локальних місцях міського середовища та приміщеннях, однак не дозволяє виконувати картографування значних територій радіаційного забруднення;

- системи з рухливими детекторами дозволяють проводити гамма-моніторинг у повному обсязі, а саме - виконувати пошук джерел радіоактивного випромінювання, здійснювати картографування природного підвищеного радіаційного фону та забруднених радіонуклідами значних територій.

Подальші перспективи досліджень полягають у вдосконаленні засобів та методів радіаційного моніторингу на платформах БПЛА у напрямку підвищення достовірності його результатів з використанням систем візуалізації на рухливих детекторах.

#### Список використаних джерел

1. Паспорт спеціальності 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія і картографія; Офіційний веб-портал Парламенту України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0047330-07#top>.
2. Widodo, S. Development of drone mounted aerial gamma monitoring system for environmental radionuclide surveillance in BATAN / S. Widodo, A. Abimany, R. Apribra // IOP Journal of Physics: Conf. Series. – 2020. – Vol. 1436. – Pp. 1-7. DOI:10.1088/1742-6596/1436/1/012126.
3. Терещук, О. І. Пристрій визначення положення вертикалі на безпілотних літальних апаратах, призначених для аерознімання / О. І. Терещук, С. Д. Крячок, В. Ю. Беленок, Л. С. Мамонтова, О. Л. Бойко // Вісник ЧНТУ. Технічні науки та технології. – 2021. – № 3 (25). – С. 273-287. DOI:10.25140/2411-5363-2021-3(25)-273-287.
4. Chierici, A. High-Performance Gamma Spectrometer for Unmanned Systems Based on Off-the-Shelf Components / A. Chierici, A. Malizia, D. Giovanni, R. Ciolini, F. d'Errico // Sensors. – 2022. – Vol. 3(22). – Pp. 1-18. DOI:10.3390/s22031078.
5. Махньов, О. І. Розробка оптимальної конструкції системи візуалізації гамма-випромінювання / О. І. Махньов // Електронні системи та сигнали. – 2019. – № 3 (2). – С. 6-10.
6. Molnar, A. Drone-Based Gamma Radiation Dose Distribution Survey with a Discrete Measurement Point Procedure / A. Molnar, Z. Domozi, I. Lovas // Sensors. – 2021. – Vol. 21 (14). – Pp. 2-15. DOI: 10.3390/s21144930.
7. Ahmad, M. I. Ionizing Radiation Monitoring Technology at the Verge of Internet of Things /M. I. Ahmad, M. H. Ab. Rahim, R. Nordin, F. Mohamed, A. Abu-Samah, N. F Abdullah // Sensors. – 2021. – Vol. 21 (22). – Pp. 1-29. DOI: 10.3390/s21227629.
8. Vetter, K. Gamma-ray Imaging Methods [Electronic resource] / K. Vetter, L. Mihalescu, K. Nelson, J. Valentine, D. Wright. – Lawrence Livermore national laborator, 2006. – 70 p. – Access mode: [https://www.researchgate.net/publication/241908137\\_Gamma-ray\\_Imaging\\_Methods](https://www.researchgate.net/publication/241908137_Gamma-ray_Imaging_Methods).
9. Amgarou, K. A comprehensive experimental characterization of the iPIX gamma imager / K. Amgarou, V. Paradiso, A. Patoz, F. Bonnet, J. Handley, P. Couturier, F. Beckerc, N. Menaa // Journal of Instrumentation. – 2016. – Vol. 11. – Pp. 1-35. DOI: 10.1088/1748-0221/11/08/P08012.
10. Paradiso, V. A panoramic coded aperture gamma camera for radioactive hotspots localization. Journal of Instrumentation / V. Paradiso, K. Amgarou, N. Blanc De Lanaute, V. Schoepff, G. Amoyal, C. Mahe, O. Beltramello, E. Liénard // Journal of Instrumentation. – 2017. – Vol. 12. – Pp. 1-16. DOI:10.1088/1748-0221/12/11/P11010.
11. Махньов, О. І. Система візуалізації гамма-випромінювання : дипломний проект ... бакалавра : 6.050902 Радіоелектронні апарати [Електронний ресурс] / Олександр Ігорович Махньов. – Київ, 2019. – 94 с. – Режим доступу: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28084/1/Makhnov\\_bakalavr.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28084/1/Makhnov_bakalavr.pdf).

12. Gordon, G. Practical Gamma-ray Spectrometry [Electronic resource] / G. Gordon. – 2nd Edition. – Access mode: <https://nna1989.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/05/gordon-gilmore-practical-gamma-ray-spectroscopy-2008.pdf>.
13. Yuki, S. Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone / S. Yuki, O. Shingo, T. Yuta, K. Masaaki, T. Yuta, K. Kuniaki, N. M. Hiroko, I. Ryo, S. Toshikazu, T. Tatsuo // *Journal of Nuclear Science*. – 2018. – Vol. 55 (1). – Pp. 90-96. DOI:10.1080/00223131.2017.1383211.
14. Burtniak, V. Application of a territorial remote radiation monitoring system at the Chornobyl nuclear accident site / V. Burtniak, Yu. Zabulonov, Ma. Stokolos, Le. Bulavin, V. Krasnoholovet // *Remote Sens*. – 2018. – Vol. 12 (4). – Pp.1-13. DOI: 10.1117/1.JRS.12.046007.
15. Woodbridge, E. Airborne gamma-ray mapping using fixed-wing vertical take-off and landing (VTOL) uncrewed aerial vehicles / E. Woodbridge, Connor, D.T., Y. Verbelen, D. Hine, T. Richardson, T.B. Scott // *Front. Robot. AI* 10:1137763. – Pp.1-15. DOI: 10.3389/frobt.2023.113776.
16. Chierici, A. A High-Performance Gamma Spectrometer for Unmanned Systems Based on Off-the-Shelf Component / A. Chierici, A. Malizia, D. Giovanni, R. Ciolini, F. d'Errico // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22 (3). – Pp. 1-18. DOI:10.3390/s22031078.
17. In-Flight Performance of the Advanced Radiation Detector for UAV Operations (ARDUO) [Electronic resource] / C. M. Chena, L. E. Sinclair, R. Fortinc, M. Coylec, C. Samson // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – Vol. 954. – Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900218316772?via%3Dihub>.
18. Gamma Radiation Source Localization for Micro Aerial Vehicles with a Miniature Single-Detector Compton Event Camera [Electronic resource] / Tomas Báča, Petr Štibinger, Daniela Doubravova, Daniel Turecek, Jaroslav Solc Jan Rusnak, Martin Saska, Jan Jakubek // 2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), IEEE. – Access mode: [https://www.researchgate.net/publication/345554999\\_Gamma\\_Radiation\\_Source\\_Localization\\_for\\_Micro\\_Aerial\\_Vehicles\\_with\\_a\\_Miniature\\_Single-Detector\\_Compton\\_Event\\_Camera](https://www.researchgate.net/publication/345554999_Gamma_Radiation_Source_Localization_for_Micro_Aerial_Vehicles_with_a_Miniature_Single-Detector_Compton_Event_Camera).

### References

1. *Pasport spetsialnosti 05.24.01 - heodeziya, fotohrammetriya ta kartohrafiya, v0047330-07-BP [Specialty passport 05.24.01 - geodesy, photogrammetry and cartography]*. (2007). <https://zakkon.rada.gov.ua/rada/show/v0047330-07#Text>.
2. Widodo, S., Abimanyu, A., & Apribra R. (2020). Development of drone mounted aerial gamma monitoring system for environmental radionuclide surveillance in BATAN. *IOP Journal of Physics: Conf. Series, 1436*, 1-7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012126>.
3. Tereshchuk, O., Kryachok, S., Belenok, V., Mamontova, L., & Boyko. (2021). Prystriy vyznachennya polozhennya vertykali na bezpilotnykh lital'nykh aparatakh, pryznachenykh dlya aeroznimannya [Device for determining the vertical position on unmanned aerial vehicles intended for aerial photography]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii - Technical sciences and technologies, 3(25)*, 273-287. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3\(25\)-273-287](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3(25)-273-287).
4. Chierici, A., Malizia, A., Di Giovanni, D., Ciolini, R., & d'Errico, F. (2022). High-Performance Gamma Spectrometer for Unmanned Systems Based on Off-the-Shelf Components. *Sensors, 3(22)*, 1-18. <https://doi.org/10.3390/s22031078>.
5. Makhnev, O. I. (2019). Rozrobka optimal'noyi konstruktsiyi systemy vizualizatsiyi hamma-vyprominyuvannya [Development of the optimal design of the gamma radiation imaging system]. *Elektronni systemy ta syhnaly - Electronic systems and signals, 3(2)*, 6-10.
6. Molnar, A., Domozi, Z., & Lovas, I. (2021). Drone-Based Gamma Radiation Dose Distribution Survey with a Discrete Measurement Point Procedure. *Sensors, 21(14)*, 2-15. <https://doi.org/10.3390/s21144930>.
7. Ahmad, M.I., Ab. Rahim, M.H., Nordin, R., Mohamed, F., Abu-Samah, A., & Abdullah, N.F. (2021). Ionizing Radiation Monitoring Technology at the Verge of Internet of Things. *Sensors, 21(22)*, 1-29. <https://doi.org/10.3390/s21227629>.
8. Vetter, K., Mihailescu, L., Nelson, K., Valentine, J., & Wright, D. (2006). *Gamma-ray Imaging Methods*. [https://www.researchgate.net/publication/241908137\\_Gamma-ray\\_Imaging\\_Methods](https://www.researchgate.net/publication/241908137_Gamma-ray_Imaging_Methods).
9. Amgarou, K., Paradiso, V., Patoz, A., Bonnet, F., Handley, J., Couturier, P., Beckerc, F., & Mena, N. (2016). *A comprehensive experimental characterization of the iPIX gamma imager*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/11/08/P08012/pdf>.

10. Paradiso, V., Amgarou, K., Blanc De Lanaute, N., Schoepff, V., Amoyal, G., Mahe, C., Beltramello, O., & Liénard, E. (2017). *A panoramic coded aperture gamma camera for radioactive hotspots localization*. *Journal of Instrumentation*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/12/11/P11010/pdf>.
11. Makhnyeva, O. I. (2019). *Systema vizualizatsiyi hamma-vyprominyuvannya [Gamma radiation imaging system]*. [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28084/1/Makhnov\\_bakalavr.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28084/1/Makhnov_bakalavr.pdf)
12. Gordon, G. (2008). *Practical Gamma-ray Spectrometry*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470861981/>
13. Yuki, S., Shingo, O., Yuta, T., Masaaki, K., Yuta, T., Kuniaki, K., Hiroko, N. M., Ryo, I., Toshikazu, S., & Torii Tatsuo. (2018). Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone. *Journal of Nuclear Science*, 55(1), 90-96. <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1383211>.
14. Burtniak, V., Zabulonov, Yu., Stokolos, Ma., Bulavin, Le., & Krasnoholovet, V. (2018). Application of a territorial remote radiation monitoring system at the Chernobyl nuclear accident site. *Remote Sens*, 12(4), 1-13. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.046007>.
15. Woodbridge, E., Connor, D., Verbelen, Y., Hine, D., Richardson, T., & Scott, T. (2023). *Airborne gamma-ray mapping using fixed-wing vertical take-off and landing (VTOL) uncrewed aerial vehicles*. <https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2023.1137763/full>.
16. Chierici, A., Malizia, A., Giovanni, D., Ciolini, R., & d'Errico, F. (2022). A High-Performance Gamma Spectrometer for Unmanned Systems Based on Off-the-Shelf Components. *Sensors*, 22(3), 1-18. <https://doi.org/10.3390/s22031078>.
17. Chena, C.M., Sinclair, L.E., Fortinc, R., Coylec, M., & Samson, C. (2020). *In-Flight Performance of the Advanced Radiation Detector for UAV Operations (ARDUO)*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900218316772?via%3Dihub>.
18. Baca, T., Stibinger, P., Doubravova, D., Turecek, D., Solc, J., Rusnak, J., Saska, M., Jakubek, J. (2021). *Gamma Radiation Source Localization for Micro Aerial Vehicles with a Miniature Single-Detector Compton Event Camera*. [https://www.researchgate.net/publication/345554999\\_Gamma\\_Radiation\\_Source\\_Localization\\_for\\_Micro\\_Aerial\\_Vehicles\\_with\\_a\\_Minature\\_Single-Detector\\_Compton\\_Event\\_Camera](https://www.researchgate.net/publication/345554999_Gamma_Radiation_Source_Localization_for_Micro_Aerial_Vehicles_with_a_Minature_Single-Detector_Compton_Event_Camera).

Отримано 25.09.2024

UDC 528.83

### **Sergiy Kryachok**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)  
E-mail: [geodesist2015@gmail.com](mailto:geodesist2015@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5633-1501>  
ResearcherID: [N-3061-2016](https://orcid.org/0000-0001-5633-1501). SCOPUS Author ID: [57204332476](https://orcid.org/0000-0001-5633-1501)

## **APPLICATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR RADIATION MONITORING**

Currently, there is an intensification of existing and the emergence of new terrorist regimes. This may provoke their use of means of mass destruction, including nuclear charges. Therefore, the development of means of remote sensing of the Earth for monitoring radioactive radiation on UAV platforms is relevant. Monitoring combines the search for sources of radioactive radiation, mapping of the natural elevated radiation background, and territories contaminated with radionuclides.

Research, diagnosis, and detection of radiation become effective with the development of methods of its visualization. Visualization includes detection and computer processing of count and spectral information about radiation. This makes it possible to obtain an optical image of radiation, study the structures of the radiation source, and localize its location.

The purpose of this work is to analyze the features of the application of remote sensing of the Earth for gamma monitoring in the form of Compton visualization systems and with mobile detectors located on UAV platforms.

The article provides an overview of existing radiation imaging systems with collimated detectors, coded aperture, rotary modulation, Compton visualization, with moving detectors. It has been established that Compton visualization and systems with moving detectors are capable of operating in a remote radiation field, have low weight, and are therefore most suitable for use on UAV platforms.

Analysis of research and publications on the application of currently existing Compton visualization systems and mobile detectors on UAV platforms allows us to draw the following conclusions. Compton imaging systems are effective only for detecting radiation sources in local locations of the urban environment and premises. Systems with mobile detectors allow gamma monitoring to be carried out in full-on large areas.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles; radiation monitoring; visualization systems; remote sensing of the Earth.

Fig.: 12. Table: 1. References: 18.



**Денис Васильович Кухтар**

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії та землеустрою  
Інституту будівництва, архітектури та енергетики

Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (Івано-Франківськ, Україна)

E-mail: denys.kukhtar@nung.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2839-4318>

**ДЖЕРЕЛА ДАНИХ СУПУТНИКОВОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ЗНІМАННЯ**

*Стаття є викладом здобутих знань щодо використання різних джерел даних супутникового радіолокаційного знімання для моніторингу природних та техногенних геодинамічних явищ. Розглянуто ресурси для завантаження, візуалізації та попереднього опрацювання радіолокаційних даних. Наведено перелік супутникових місій, дані яких представлено у вільному доступі на сайті активного архівного центру Alaska Satellite Facility. Виконано огляд комерційних радіолокаційних місій та особливості результатів їхнього знімання. Розглянуто можливості розширення кола джерел радарних знімків, які можуть бути використані для науково-дослідних цілей, у межах програми Європейської космічної агенції «Місії третьої сторони». Викладена інформація буде корисною для науковців, науково-педагогічних та педагогічних працівників, які використовують дані дистанційного зондування, зокрема радіолокаційні знімки, для освітніх та наукових потреб.*

**Ключові слова:** радіолокаційні знімки; комерційні знімки; супутникові місії; metalink; EO Browser; Copernicus Browser; ASF; EGMS.

Табл.: 2. Рис.: 2. Бібл.: 19.

**Актуальність теми дослідження.** Протягом останнього десятиліття спостерігається тенденція щодо збільшення наукового зацікавлення пов'язаного з використанням супутникових радіолокаційних даних. Вважаємо, що це зв'язано з постійним накопиченням все більшої кількості даних [1; 2], систематичністю проведення спостережень, а основне – з політикою відкритого доступу до цього типу даних [3; 4]. Одним з основних рушіїв у цій роботі є програма Copernicus. Вона була створена 2014 р. у межах продовження ініціативи Європейського союзу (ЄС) щодо дослідження навколишнього середовища та питань безпеки. Діяльність програми Copernicus спрямована на безперервний, всеосяжний та високоякісний моніторинг Землі, який забезпечується даними супутникових, наземних, повітряних та морських спостережень. Актуальність теми використання супутникових радіолокаційних знімків та радіолокаційної інтерферометрії підтверджується великою кількістю публікацій у рейтингових виданнях і журналах. Основні напрями досліджень пов'язані з вивченням природних та техногенних геодинамічних процесів, а також їхній вплив на інженерну інфраструктуру.

**Постановка проблеми.** Проте представники наукової спільноти в Україні часто задаються запитанням щодо способів та засобів для доступу до даних супутникового радіолокаційного знімання з метою їхнього використання для розв'язку різних наукових, навчально-методичних та прикладних задач.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Предметом дослідження для переважної більшості публікацій є особливості методики опрацювання радіолокаційних даних та порівняння отриманих результатів з іншими геодезичними методами. Тому очевидно, що джерела даних радіолокаційних знімків не описуються детально і представляються у декларативній формі.

Якщо розглядати освітню компоненту досліджень, пов'язаних з використанням супутникових радіолокаційних даних, то кількість контенту в матеріалів для вивчення в Україні складає лише незначну частину серед усіх доступних (зокрема англійських) джерел інформації. Сюди можемо віднести спеціалізовані курси та заходи спрямовані на популяризацію використання даних дистанційного зондування, які проводяться Малою академією наук України [5, 6].

Завданнями європейської програми Copernicus є не лише збір та розповсюдження даних, але й реалізація освітньої діяльності. Ця робота направлена на навчання і залучення якнайширшого кола користувачів, які будуть використовувати накопичені дані якісно та професійно. Реалізація цього напрямку проводиться через освітні проекти, семінари, майстер-класи. У результаті отримано базу даних навчальних матеріалів [7], відеоуроків

[8], інструкцій та презентацій. Матеріали тренінгів (навчальні посібники, відеоінструкції, дані для практичних завдань) структуровані за кількома напрямками: земна поверхня, океани та узбережжя, моніторинг ризиків, гідрологія, геологія та кріосфера, атмосфера. Результати радіолокаційного знімання використовуються як вхідні дані для більшості зазначених напрямків досліджень.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Різноманіття методів опрацювання даних супутникового радіолокаційного знімання передбачає використання радарних знімків, які розповсюджуються у вільному доступі та на комерційній основі. При цьому користувач може отримувати дані у вигляді певного типу радіолокаційного знімку (RAW, SLC, GRD та ін.), або уже наперед опрацьовані дані у вигляді сформованих інтерферограм. При цьому, представники наукової спільноти в Україні часто ставляться запитанням щодо способів та засобів для доступу до даних супутникового радіолокаційного знімання з метою їхнього використання для розв'язку різних наукових, навчально-методичних та прикладних задач.

**Метою** цієї статті є систематизація накопиченого досвіду з пошуку та використання радіолокаційних знімків. Пропонується огляд джерел даних радіолокаційного знімання, що можуть бути використані при опрацюванні багаточасових рядів супутникових знімків, створення диференціальних інтерферограм за парами різночасових знімань, а також для аналізу окремих знімків або їхньої візуалізації.

**Виклад основного матеріалу.** Важливим кроком на шляху інтеграції України до космічної інфраструктури ЄС та сприянні у використанні даних та ресурсів, наданих програмою Copernicus, було підписання угоди про співпрацю між Європейською Комісією (ЄК) та Державним космічним агентством України, яке відбулося 25 травня 2018 р. [5]. Ця угода стала частиною європейської політики сусідства та східного партнерства для отримання переваг програми Copernicus завдяки спостереженням та використанням даних наземного знімання територій за межами ЄС. У результаті укладання угоди про співробітництво українські державні, академічні та приватні установи отримали вільний доступ до завантаження, опрацювання та аналізу даних та продуктів програми Copernicus. Також дані відкриті та доступні для пересічного користувача.

**Радіолокаційні знімки у відкритому доступі.** Завданнями програми Copernicus є не лише збір та поширення даних, але й реалізація освітньої діяльності. Ця робота направлена на навчання і залучення якнайширшого кола користувачів, які будуть використовувати накопичені дані якісно та професійно. Реалізація цього напрямку проводиться через освітні проекти, семінари, майстер-класи. У результаті отримано базу даних навчальних матеріалів [6], відеоуроків [7], інструкцій та презентацій. Матеріали тренінгів (навчальні посібники, відеоінструкції, дані для практичних завдань) структуровані за кількома напрямками: земна поверхня, океани та узбережжя, моніторинг ризиків, гідрологія, геологія та кріосфера, атмосфера. Результати радіолокаційного знімання використовуються як вхідні дані для більшості зазначених напрямків досліджень.

Завантаження даних супутникового радіолокаційного знімання пропонується виконувати через геопортал Copernicus Open Access Hub. Цей ресурс вказується як основне джерело даних у більшості навчальних матеріалів. Проте варто зазначити, що платформа Copernicus Open Access Hub припинила свою роботу наприкінці жовтня 2023 р. Як і було анонсовано раніше, у січні 2023 р., сервіс Copernicus Open Access Hub продовжував працювати в повному обсязі до кінця червня 2023 р., після чого розпочалась фаза поступового скорочення, яка завершилась у вересні 2023 р.

Починаючи з 2015 року Copernicus Open Access Hub підтримував пряме завантаження супутникових даних Sentinel для виконання широкого спектра задач на основі даних дистанційного зондування. Сотні тисяч користувачів скористалися ресурсом протягом останнього десятиліття. Однак розвиток технологій потребував переходу на оновлену платформу. Тому сьогодні дані супутників Sentinel, разом з даними інших комерційних та державних супутників, повністю доступні на Copernicus Data Space

Ecosystem (<https://dataspace.copernicus.eu/>) після безкоштовної реєстрації. Миттєвий доступ до повних і завжди оновлених архівів даних спостереження Землі підтримується новим, більш інтуїтивно зрозумілим, інтерфейсом браузера Copernicus Browser.

#### *Візуалізація знімків.*

Одним зі способів попередньої перевірки відповідності даних користувацьким запитам є їхня візуалізація. Браузер Copernicus пропонує простий і швидкий спосіб візуалізації результатів, отриманих за пошуковим запитом. Немає потреби завантажувати повний знімок. Візуалізація дає змогу проводити аналіз попередньо визначених шарів, області інтересу або окремих пікселів безпосередньо в браузері. Такий підхід виявився зручним та ефективним для аналізу зворотного розсіювання на різних територіях при проектуванні та (або) розгортанні наземних кутових відбивачів радіолокаційного сигналу [8].

Браузер Copernicus та його функціонал для аналізу та візуалізації знімків з'явився як нова версія ресурсу Earth Observation Browser (EO Browser). Цей ресурс був запущений у січні 2017 р. і розроблявся за сприяння Європейської космічної агенції як простий у використанні та безкоштовний інструмент на основі браузера для доступу користувачів до десятків петабайт даних дистанційного зондування Землі. Відтоді EO Browser став одним з основних інструментів для вивчення супутникових даних. На початку 2023 р. ресурс приймав понад 150 тис. відвідувачів щомісяця, які обробляли близько 60 млн запитів [9]. Впродовж періоду його функціонування було створено велику кількість оглядів [10; 11; 12] та відеоматеріалів [13], які дозволили користувачам швидко опанувати роботу з ресурсом. EO Browser продовжує функціонувати і зараз. Проте розробники вважають, що немає потреби у двох платформах із подібним набором функцій. Тому планується об'єднати EO Browser та Copernicus Browser протягом наступних кількох років [9].

#### *Завантаження знімків через графічний інтерфейс.*

Завдяки браузеру Copernicus можна отримати доступ до актуального архіву даних радіолокаційних знімків (вкладка «Пошук»). Повне завантаження продуктів та широкі можливості опрацювання безпосередньо в браузері (функціонал якого, за словами розробників, постійно оновлюватиметься), робить його потужним інструментом не лише для любителів, але й для експертів у галузі дистанційного зондування.

Браузер Copernicus підтримує різні способи завантаження зображень та даних через графічний інтерфейс користувача (GUI – graphical user interface), включаючи швидкий перегляд зображень з низькою роздільною здатністю, аналітичні набори даних, анімацію часових рядів або завантаження неопрацьованих (сирих) знімків.

#### *Завантаження знімків через текстовий інтерфейс.*

Практика показала низьку ефективність, а подекуди неможливість, використання програмного забезпечення SNAP на операційній системі Windows для опрацювання супутникових радіолокаційних знімків. Тому більш поширеним для роботи з радарними знімками є використання операційної системи Linux.

Подібним чином це стосується завантаження супутникових знімків. Використання графічного типу інтерфейсу (напр. в Copernicus Browser) суттєво знижує швидкість завантаження даних, а також унеможлиблює автоматизацію цього процесу. Альтернативним рішенням є завантаження даних радіолокаційного знімання через текстовий інтерфейс або інтерфейс командного рядка (Non GUI – Non graphical user interface). Це особливо актуально при завантаженні великих часових серій, які містять кілька десятків знімків (розмір файлу – до 8Gb).

Реалізацію такого підходу до завантаження файлів рекомендуємо виконувати шляхом формування файлу метаданих у форматі metalink. Metalink – це формат файлів на основі XML, який призначений для формування списку посилань на файли для завантаження за протоколами HTTP, FTP, BitTorrent та ін. Перевагами такого способу є висока швидкість завантаження даних, автоматичне виявлення та усунення помилок, відновлення завантаження після втрати мережевого з'єднання.

Широкі можливості для автоматизації завантаження архівних файлів (у т.ч. за допомогою файлу metalink) доступні на сайті Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu>). Alaska Satellite Facility (ASF) – це активний архівний сервіс, який працює за сприяння Геофізичного інституту університету Аляски. ASF передає, опрацьовує, архівує та розповсюджує дані дистанційного зондування серед наукових користувачів у всьому світі. Важливою місією також є популяризація та сприяння у розвитку дистанційного зондування для підтримки національних і міжнародних наукових досліджень Землі, польових операцій і комерційних застосувань. Саме завдяки активній освітній діяльності, на сайті доступні навчальні матеріали для ознайомлення з архівом радіолокаційних знімків та автоматизації процесу їх завантаження. На рис. 1 представлено скриншот вебсторінки архіву ASF, у якій виконується пошук та завантаження радіолокаційних знімків супутника Sentinel-1.

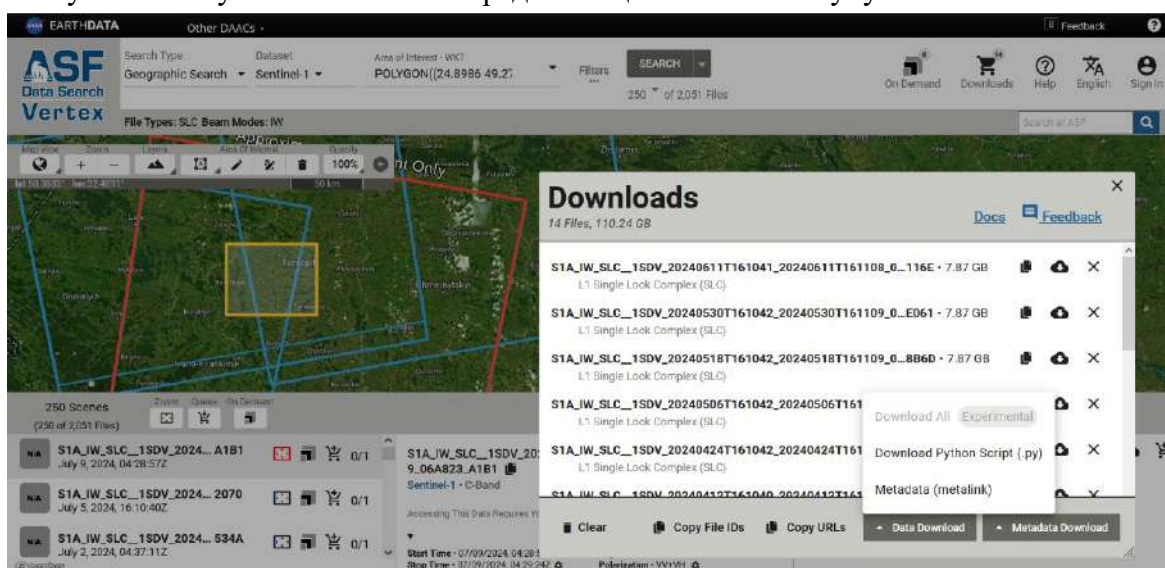


Рис. 1. Вікно архіву Alaska Satellite Facility для пошуку та завантаження результатів дистанційного зондування

Ресурс надає доступ до даних діючих та вже завершених супутникових та аерознімальних радіолокаційних місій. У табл. 1 представлено просторово-часові характеристики доступних радіолокаційних даних.

Крім цього, очікується, що ASF стане центром розповсюдження даних нової супутникової радіолокаційної місії NISAR. Це спільний проект США та Індії, який буде зосереджений на вивченні небезпечних процесів та глобальних змін навколишнього середовища. Радар супутника проводитиме знімання в L- та S-діапазоні (довжина хвилі 24 см та 9 см відповідно) з періодичністю 12 днів. Результати знімання будуть представлені у відкритому доступі.

**Комерційні радіолокаційні знімки.** Серед усіх діючих нині супутникових місій, які оснащені радаром із синтезованою апертурою, лише невелика частина розповсюджує дані у відкритому доступі. Більшість із них є комерційними, або працюють на забезпечення даними відповідні уряди та їхні військові потреби.

Завдяки очевидним перевагам радіолокаційних знімків у порівнянні з оптичними та зростанню запиту на розвідувальні дані зі супутників, продовжується стрімкий розвиток відповідних комерційних компаній, проєктів та стартапів. У табл. 2 представлено перелік успішних комерційних компаній, які експлуатують супутники та поширюють дані дистанційного зондування [14]. Серед них компанії, які відіграли важливу роль у підтримці оборони України: Capella Space, Umbra Space, ICEYE [15].

Таблиця 1 – Набори даних радіолокаційного знімання доступні в архіві Alaska Satellite Facility

№	Назва місії	Провайдер даних	Період експлуатації	Частотний діапазон	Частота знімання	Територія знімання
Супутникові сенсори						
1	ALOS PALSAR	Агентство аеро-космічних досліджень Японії (JAXA)	2006-2011 рр.	L-діапазон	46 днів	Північна і Південна Америки, та інші регіони світу
2	SENTINEL-1	Європейська космічна агенція (ESA)	2014 р. – по теперішній час	C-діапазон	6-12 днів	Вся планета
3	ERS-1 ERS-2	Європейська космічна агенція (ESA)	1991-2000 рр., 1995-2011 рр.	C-діапазон	35 днів	Територія від Аляски до Антарктиди (станція Мак-Мердо)
4	SMAP	NASA, США	Квітень – Серпень 2015 р.	L-діапазон	3 дні	Вся планета
5	SEASAT	NASA, США	1978 р.	L-діапазон	17 днів	Над північними океанами
6	RADARSAT-1	Канадське космічне агентство (CSA)	1995-2013 рр. (дані на ASF доступні до 2008 р.)	C-діапазон	24 дні	Вся планета
Аерознімальні сенсори						
7	AIRSAR	NASA, США	1988-2004 рр.	C-діапазон L-діапазон P-діапазон	-	Сполучені Штати Америки
8	UAVSAR	NASA, США	2008 р. – по теперішній час	L-діапазон	-	Північна, Центральна та Південна Америка, Гренландія та Ісландія

Джерело: розроблено автором.

За назвою компанії або супутникової місії можна віднайти електронну сторінку з контактною інформацією. Крім цього, компанії пропонують завантажити зразки радіолокаційних зображень для оцінки їхньої відповідності користувацьким запитам. Також надається інформація стосовно параметрів знімання та характеристик радара. Окремі компанії ведуть відкриту політику щодо вартості радіолокаційних зображень (AirBus: <https://radar.oneatlas.airbus.com>).

Таблиця 2 – Огляд діючих комерційних супутникових радіолокаційних місій

Назва компанії (супутникова місія)	Країна походження	Частотний діапазон	Максимальна роздільна здатність, м
AirBus (TerraSAR)	Німеччина	X-діапазон	0,72
e-Geos (CosmoSkyMed)	Італія	X-діапазон	1,0
Capella Space	США	X-діапазон	0,5
MDA (RCM)	Канада	C-діапазон	3,0
ICEYE	Фінляндія	X-діапазон	0,5
Umbra Space	США	X-діапазон	0,16
Synspective	Японія	X-діапазон	1,0
iQPS	Японія	X-діапазон	0,75
Spacety	Китай	C-діапазон	3,0
China's L-SAR 01	Китай	L-діапазон	3,0
Huanjing Juanjing	Китай	S-діапазон	20,0

Джерело: [14].

Важливо відзначити, що при формуванні запиту на комерційні радіолокаційні зображення, необхідно чітко вказувати напрямки подальшого застосування та методи опрацювання даних. Так не всі компанії можуть запропонувати часові серії радарних знімків для

ефективного використання інтерферометричного аналізу. Здебільшого це пов'язано з недостатньою точністю позиціонування супутника на орбіті, що приводить до збільшення базису на знімках до кількох сотень метрів.

**Програма Європейського космічного агентства «Місії третьої сторони»,** або Third Party Missions (TPM) data – це програма сторонніх місій Європейського космічного агентства (ESA), що складається з понад 50 супутникових місій (близько 60 інструментів) з усього світу. Програма «Місії третьої сторони» діє вже понад 45 років і складається з серії супутників, спеціально орієнтованих на спостереження Землі. Через угоди з міжнародними публічними та комерційними організаціями, ESA сприяє доступності їхніх даних для науково-дослідних цілей через єдину програму для полегшення доступу. Мета програми полягає в тому, щоб запропонувати додаткові дані з широкого кола місій, які сприятимуть міжнародній співпраці та отриманню корисного досвіду для подальших розробок нових місій.

Відповідні супутникові місії, які розглядалися в підрозділі «Комерційні радіолокаційні знімки», залучені до програми «Місії третьої сторони». Тому в рамках проведення наукових досліджень (розробки додатків, прототипів і тестових проєктів) їхні дані можуть бути надані безкоштовно.

Передумовою доступу до колекції даних Програми є подання проєктної заявки, яка розглядається впродовж 4-6 тижнів. ESA підтримує якнайбільше високоякісних та інноваційних проєктів у межах загальної доступної квоти. Тому для кожного проєкту дозволяється лише обмежена кількість продуктів. Крім того, надання радіолокаційних знімків на вимогу (особливо високої роздільної здатності), підпадає під геообмеження. Наприклад надання даних TerraSAR-X підпадає під геообмеження через особливості угоди з постачальником – компанією Airbus. Перелік «Місій третьої сторони», а також покроковий спосіб формування заявки представлено в розробленому ESA документі [16].

З урахуванням широкого набору даних, який постійно зростає, може бути важко визначити, яка місія чи набір даних найкраще відповідають потребам користувача. Для попереднього перегляду та порівняння радіолокаційних даних було опубліковано зразки програми «Місії третьої сторони» [17].

Зразки для завантаження є у вільному доступі та містять вибрані приклади з наборів даних місії. Зразки впорядковані відповідно до структури продукту, що використовується постачальниками даних, точно імітуючи, чого очікувати від повної колекції. Усі зразки радіолокаційних даних були отримані на випробувальному полігоні в м. Нойштреліц, Німеччина. Отримання зображень на одному майданчику дозволяє порівнювати те, як різні супутники «бачать» ту саму територію, допомагаючи вирішувати, які місії та їхня роздільна здатність, тип продукту, візуальні діапазони, режими отримання та поляризації можуть відповідати користувацьким запитам. Зразки наборів даних доступні для завантаження на спеціальних сторінках відповідних місій, які містять список файлів для завантаження. Після вибору необхідної місії, за посиланням на повні колекції даних, можна дізнатися більше про їхні атрибути, включаючи часове та просторове покриття, і про те, як отримати доступ до продуктів.

**Європейська служба моніторингу руху земної поверхні (EGMS).** У відповідь на потреби користувачів, які були озвучені на форумі, проведеному в межах програми Copernicus, було створено Європейську службу моніторингу руху земної поверхні (EGMS - European Ground Motion Service). Цей ресурс являє собою передову технологію космічного дистанційного зондування, яка використовує дані радіолокаційної інтерферометрії, отримані з Sentinel-1, для виявлення та вимірювання рухів землі з міліметровою точністю. Тому EGMS є ще одним новим та унікальним джерелом даних, яке може бути використано як кінцевий продукт опрацювання радіолокаційних даних для аналізу природних та антропогенних геодинамічних проявів. Переглянути та завантажити дані ресурсу EGMS можна за посиланням <https://egms.land.copernicus.eu/>.

Відкриваючи нові шляхи та можливості використання даних супутникового спостереження Землі, EGMS надає безкоштовні та відкриті дані вимірювання руху землі лише на території країн Європейського союзу та ряду країн-партнерів Європейського екологічного агентства (рис. 2).



*Рис. 2. Територія покриття послуги Європейської служби моніторингу руху земної поверхні (EGMS) [18]*

На сьогодні Україна не входить до переліку країн, на території яких розповсюджуються дані сервісу. Проте в перспективі, ми очікуємо розширення зони діяльності сервісу над територією України, враховуючи рішучі кроки нашої держави на шляху євроінтеграції. На цьому етапі EGMS може бути використаний у межах представленої території для аналізу та інтерпретації даних, узгодження даних наземних геодезичних спостережень, порівняння моделей деформацій на інженерних об'єктах з подібними умовами або режимами експлуатації [19].

EGMS оновлюється щорічно і може використовуватися для широкого кола завдань, оскільки надає перевірені продукти, які проходять поглиблену незалежну перевірку. Міські, регіональні чи державні органи влади можуть використовувати його дані для моніторингу цілісності інфраструктурних та інженерних об'єктів (дамби, мости, залізниці і будівлі). Це дає змогу міським планувальникам приймати рішення на основі даних про те, де будувати нові об'єкти, оцінюючи ймовірність природних небезпек (зсуви або просідання). Дослідники можуть використовувати дані EGMS для вивчення наслідків зміни клімату, таких як танення вічної мерзлоти та опускання берегів. Завдяки відносно довгим часовим рядам записів зсуву рельєфу в усіх продуктах EGMS можна виявити часові характеристики та закономірності, такі як лінійне осідання, або специфічні явища, такі як прискорене осідання, пов'язане з підземними будівельними роботами. Доступність різних часових зміщень дозволяє користувачеві вирішувати конкретні проблеми, такі як дослідження геонебезпек шляхом відстеження еволюції деформації або прогнозування аналізу тенденцій на основі історії зміщень. Користувачі можуть посилатися на свої індивідуальні дослідження деформації або дослідження в EGMS, підтверджувати результати опрацювання або навіть порівнювати результати на місці з інформацією та продуктами EGMS.

European Ground Motion Service надає три основні продукти InSAR для візуалізації, аналізу та завантаження користувачами:



1. *Базовий продукт EGMS (Basic)* – це карти швидкості деформацій уздовж лінії візування супутника на висхідній і низхідній орбітах з анотованою геолокацією та показниками якості для кожної точки вимірювання. Лінія візування супутника це уявна лінія, яка з'єднує супутник із точкою на земній поверхні. Для визначення векторів деформацій, визначене значення потрібно попередньо спроектувати, щоб перейти до значення вертикального/горизонтального зміщення. Продукт надається як двовимірний продукт точок вимірювання із кольоровим кодуванням середньої швидкості. З кожною точкою пов'язаний графік часового ряду. Важливо врахувати, що значення швидкостей деформацій Базового продукту просторово прив'язані до віртуальної контрольної точки, часові ряди якої виводяться шляхом статистичного аналізу набору даних. Як наслідок, надані вимірювання мають значення лише в контексті загальної площі.

Створення Базового продукту EGMS є необхідним першим кроком до більш досконалого Каліброваного продукту.

2. *Калібрований продукт EGMS (Calibrated)* вважається основним продуктом EGMS, оскільки він задовольняє потреби більшості користувачів. Принципово він такий самий, як і базовий продукт, але вдосконалений завдяки тому, що значення зміщення враховують модель, отриману з даними часових рядів GNSS. Це перетворює вимірювання на основі радіолокаційних даних з відносних на абсолютні (відносно систему відліку з початком в центрі мас Землі). Як і Базовий продукт, Калібрований надається як два дискретні набори даних, один для висхідної орбіти супутника, а інший – для низхідної. Деякі ізольовані території можуть не мати даних GNSS. Для цих областей калібровані продукти виробляються шляхом гармонізації Базових продуктів відносно один одного.

3. *Спроектований продукт EGMS (Ortho)* використовує дискретні дані обох геометрій, надані продуктом Calibrated, для створення двох додаткових шарів: вертикальних зміщень, та горизонтальних зміщень в східно-західному напрямку. Обидва шари проєктуються на вузли сітки, розміром 100 м. Компоненти зміщення по вертикалі та схід-захід можна оцінити, використовуючи переваги попередньої інформації, отриманої з даних GNSS. Основною перевагою Спроектованих продуктів є наочність результатів, оскільки не потрібно враховувати геометрію збору даних. Такі декомпозиційні дані можуть виявитися цінними при розгляді явищ, які можуть передбачати планові зміщення, пов'язані з тектонікою або зсувами ґрунту.

EGMS пропонує різні освітні ресурси, зокрема тренінги, презентації та навчальні матеріали. Організація регулярних семінарів сприяє підвищенню обізнаності та навичок користувачів у роботі з даними сервісу. Онлайн-курси доступні на навчальних платформах. Вони охоплюють основи роботи з даними EGMS та їхній аналіз, використання програмного забезпечення. EGMS пропонує різноманітні презентації, які можна знайти на їхньому офіційному сайті або YouTube-каналі. Ці презентації включають: вступні презентації (загальний огляд сервісу, його можливостей та переваг для користувачів); тематичні презентації (конкретні аспекти використання даних EGMS, такі як аналіз ризиків, моніторинг природних катастроф та ін.); виступи на конференціях (записи виступів на наукових та професійних конференціях, де обговорюються досягнення та інновації у сфері моніторингу руху земної поверхні). Усі ці освітні компоненти допомагають краще зрозуміти та використовувати дані сервісу для наукових та практичних потреб.

#### **Висновки.**

1. На сьогодні онлайн-платформи EO Browser та Copernicus Browser є зручними, доступними та безкоштовними джерелами даних для завантаження, візуалізації та попереднього опрацювання супутникових радіолокаційних даних. Про це свідчить велика кількість користувацьких запитів та зареєстрованих користувачів. Високий степінь зацікавлення до ресурсів підтримується шляхом різнобічної популяризації серед освітніх та наукових спільнот. А доступ до навчальних і практичних матеріалів робить ці сервіси популярними не лише серед початківців, але й серед експертів у галузі дистанційного зондування Землі.



2. Великий обсяг даних радіолокаційного знімання, які необхідно завантажити та опрацювати для виконання навіть найпростішого проєкту, вимагає автоматизації цих процесів. Практика показала високу ефективність використання текстового інтерфейсу у порівнянні з графічним при завантаженні радіолокаційних знімків. Такий підхід дозволяє досягати високої швидкості передачі даних та автоматизувати процес отримання часових серій знімків при роботі на операційній системі Linux.

3. Комерційні супутникові радіолокаційні місії – це зручне джерело даних радіолокаційних знімків високої та надвисокої роздільної здатності. Проте висока вартість результатів знімання та подекуди відсутність можливості використання довгих часових серій знімків місії для інтерферометричного аналізу, потребує пошуку альтернативних рішень. Таким рішенням є використання даних програми Європейської космічної агенції «Місії третьої сторони» (Third Party missions). Завдяки цій програмі наукова спільнота має можливість отримати доступ до понад 50 супутникових місій на некомерційній основі.

4. Інтеграція України в європейський простір відкриє нові можливості не лише для економіки та оборони, але й надаватиме переваги повного використання сервісів програми Copernicus. Вважаємо, що розширення Європейської служби моніторингу руху земної поверхні (EGMS) на територію України, матиме взаємну ефективність. З одного боку, зросте інформативність та достовірність даних, представлених в EGMS, за рахунок поширення зони інтересу на схід та збільшення кількості перманентних GNSS станцій, що використовуються для верифікації результатів. З іншого боку, Україна отримає цінний інструмент для вирішення різноманітних геодезичних завдань на інженерних об'єктах і техногенно навантажених територіях.

#### Список використаних джерел

1. Zhu, X. X. A Review of Ten-Year Advances of Multi-Baseline SAR Interferometry Using TerraSAR-X Data / X. X. Zhu, Y. Wang, S. Montazeri, N. Ge // *Remote Sensing*. – 2018. – № 10. – P. 1374. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10091374>.
2. Torres, R. Overview of Copernicus SAR Space Component and its Evolution / R. Torres, M. Davidson // IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Yokohama, Japan, 2019. – Pp. 5381-5384. DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8899134.
3. SAR Analysis Ready Data and Tools for the Open Data Cube / A. Rosenqvist, B. D. Killough, A. M. Lubawy, J. C. Rattz // IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Waikoloa, HI, USA, 2020. – Pp. 3391-3394, DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323781.
4. Making SAR Accessible: Education & Training in Preparation for Nisar / F. J. Meyer, P. A. Rosen, A. Flores, E. R. Anderson, E. A. Cherrington // 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. – Brussels, Belgium. – Pp. 6-9. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554822.
5. Press Release [Electronic resource] / European Commission. – 2018, May 25. – Accessed mode: <https://www.copernicus.eu/sites/default/files/PRESS%20RELEASE%20-%20Copernicus%20Cooperation%20Arrangement%20with%20Ukraine%20-%2025%20May%202018.doc.pdf>.
6. Copernicus RUS Training Materials [Electronic resource] / EO Science For Society. – 2024, July 30. – Accessed mode: <https://eo4society.esa.int/resources/copernicus-rus-training-materials>.
7. Research user support Copernicus Training [Electronic resource] // YouTube. – 2024, July 30. – Accessed mode: <https://www.youtube.com/@ruscopernicustraining5404/videos>.
8. Kukhtar, D. Experience in deploying radar corner reflectors for InSAR monitoring / D. Kukhtar, V. Hlotov, O. Zayats // *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. – 2023. – Vol. 98. – Pp. 42-49. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.98.042>.
9. Milcinski, G. EO Browser joins Copernicus Data Space Ecosystem – meet the Copernicus Browser [Electronic resource] / G. Milcinski, M. Devaraju // *Medium*. – 2023. – Access mode: <https://medium.com/sentinel-hub/eo-browser-joins-copernicus-data-space-ecosystem-meet-the-copernicus-browser-537a22d9cb>.
10. Кухтар, Д. В. Аналіз радіолокаційних знімків супутника Sentinel-1 за допомогою вебресурсу EO Browser / Д. В. Кухтар, // *Український журнал прикладної економіки та техніки*. – 2023. – Том 8. – № 4. – С. 258-263. DOI: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-4-42>.

11. Застосування супутникових знімків у дослідницьких роботах учнів Малої академії наук України / С. О. Довгий, С. М. Бабійчук, Л. Я. Юрків, Т. Л. Кучма, О. В. Томченко, С. О. Данилов // Інформаційні технології і засоби навчання. – 2020. – № 80(6). – С. 21-38. DOI: 10.33407/itlt.v80i6.4053.
12. Бабійчук, С. М. (2021). Спеціалізовані курси з основ ДЗЗ для освітян системи Малої академії наук України / С. М. Бабійчук, О. В. Томченко // Наукові записи Малої академії наук України. – 2021. – № 1 (20). – С. 13-27.
13. Sentinel Hub [Electronic resource] // YouTube. – 2024, July 30. – Access mode: <https://www.youtube.com/@Sentinel-Hub/videos>.
14. SAR Satellite Companies [Electronic resource] // SAR Journal. – 2024, July 30. – Access mode: <https://syntheticapertureradar.com/sar-satellite-missions>.
15. Reflecting on Ukraine, New Space, and the Future of War from Space [Electronic resource] // SAR Journal. – 2024, July 10. – Access mode: <https://syntheticapertureradar.com/reflecting-on-ukraine-new-space-and-the-future-of-war-from-space>.
16. ESA's Earth Observation Third Party Missions (2023, December). Data Access Guide Current and Heritage Missions. European Space Agency [Electronic resource]. – Access mode: <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/Third-Party-Mission-Data-Access-Guide.pdf>.
17. Discover and download the Earth observation data [Electronic resource] // Earth Online. – 2024, July 30. – Access mode: <https://earth.esa.int/eogateway/search?text=third+party+mission&category=Data&instrument=imaging-radars>.
18. Capes, R. EGMS, Urban areas and infrastructure [Electronic resource] / R. Capes. – Access mode: [https://land.copernicus.eu/en/events/egms-urban-areas-and-infrastructure/urban-and-infrastructure\\_v1-0\\_07jun2023.pdf/@download/file](https://land.copernicus.eu/en/events/egms-urban-areas-and-infrastructure/urban-and-infrastructure_v1-0_07jun2023.pdf/@download/file).
19. Tretyak, K. Assessing Reservoir Dam Stability Using C-band Permanent Scatterers InSAR / K. Tretyak, D. Kukhtar, T. Lipecki // *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. – 2024. – Vol. 99. – Pp. 5-14. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2024.99.005>.

### References

1. Zhu, X.X., Wang, Y., Montazeri, S., Ge, N. (2018). A Review of Ten-Year Advances of Multi-Baseline SAR Interferometry Using TerraSAR-X Data. *Remote Sensing* 10, 1374. <https://doi.org/10.3390/rs10091374>.
2. Torres, R. and Davidson, M. (2019). Overview of Copernicus SAR Space Component and its Evolution. *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Yokohama, Japan. pp. 5381-5384. doi: 10.1109/IGARSS.2019.8899134.
3. Rosenqvist, A., Killough, B. D., Lubawy, A. M. and Ratz, J. C. (2020). SAR Analysis Ready Data and Tools for the Open Data Cube. *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 3391-3394). Waikoloa, HI, USA. doi: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323781.
4. Meyer, F.J., Rosen, P.A., Flores, A., Anderson, E.R., Cherrington, E. A. (2021). Making SAR Accessible: Education & Training in Preparation for Nisar. *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS* (pp. 6-9). Brussels, Belgium. doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554822.
5. European Commission (2018, May 25). *Press Release*. <https://www.copernicus.eu/sites/default/files/PRESS%20RELEASE%20-%20Copernicus%20Cooperation%20Arrangement%20with%20Ukraine%20-%2025%20May%202018.doc.pdf>
6. *EO Science For Society* (2024, July 30). *Copernicus RUS Training Materials*. <https://eo4society.esa.int/resources/copernicus-rus-training-materials>.
7. *YouTube* (2024, July 30). *Research user support Copernicus Training*. <https://www.youtube.com/@ruscopernicustraining5404/videos>.
8. Kukhtar D., Hlotov V., Zayats O. (2023). Experience in deploying radar corner reflectors for InSAR monitoring. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 98, 42-49. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.98.042>.
9. *Milcinski, G. and Devaraju, M. (2023). EO Browser joins Copernicus Data Space Ecosystem – meet the Copernicus Browser. Medium*. <https://medium.com/sentinel-hub/eo-browser-joins-copernicus-data-space-ecosystem-meet-the-copernicus-browser-537a22d9cb>.
10. Kukhtar, D. (2023). Analiz radiolokatsiynykh znmkiv sputnyka Sentinel-1 za dopomohoiu vebresursu EO Browser [Analysis of radar images of the Sentinel-1 satellite using the EO Browser web resource]. *Ukrainskyi zhurnal prykladnoi ekonomiky ta tekhniky – Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology*, 8(4), 258-263. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-4-42>.

11. Dovhyj, S.O., Babijchuk, S.M., Yurkiv, L.Ya., Kuchma, T.L., Tomchenko, O.V., Danylov, S.O. (2020). Zastosuvannia suputnykovykh znimkiv u doslidnytskykh robotakh uchniv Maloi akademii nauk Ukrainy [Application of satellite images in research works of students of the Small Academy of Sciences of Ukraine]. *Informatsiini tekhnolohii i zasoby navchannia – Ukrainian journal of applied economics and technology*, (80(6)), 21-38. <https://doi.org/10.33407/itlt.v80i6.4053>.
12. Babijchuk, S.M., Tomchenko, O.V. (2021). Spetsializovani kursy z osnov DZZ dlia osvitiany systemy Maloi akademii nauk Ukrainy [Specialized courses on the basics of DZZ for educators of the system of the Small Academy of Sciences of Ukraine]. *Naukovi zapysy Maloi akademii nauk Ukrainy – Scientific records of the Small Academy of Sciences of Ukraine*, (1(20)), 13-27.
13. YouTube (2024, July 30). *Sentinel Hub*. <https://www.youtube.com/@Sentinel-Hub/videos>.
14. SAR Journal (2024, July 30). *SAR Satellite Companies*. <https://syntheticapertureradar.com/sar-satellite-missions>.
15. SAR Journal (2024, July 10). *Reflecting on Ukraine, New Space, and the Future of War from Space*. <https://syntheticapertureradar.com/reflecting-on-ukraine-new-space-and-the-future-of-war-from-space>.
16. ESA's Earth Observation Third Party Missions (2023, December). Data Access Guide Current and Heritage Missions. *European Space Agency*. <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/Third-Party-Mission-Data-Access-Guide.pdf>.
17. Earth Online (2024, July 30). Discover and download the Earth observation data. <https://earth.esa.int/eogateway/search?text=third+party+mission&category=Data&instrument=imaging-radars>.
18. Capes, R. (2023). EGMS, Urban areas and infrastructure. [https://land.copernicus.eu/en/events/egms-urban-areas-and-infrastructure/urban-and-infrastructure\\_v1-0\\_07jun2023.pdf/@@download/file](https://land.copernicus.eu/en/events/egms-urban-areas-and-infrastructure/urban-and-infrastructure_v1-0_07jun2023.pdf/@@download/file).
19. Tretyak K., Kukhtar D., Lipecki, T. (2024). Assessing Reservoir Dam Stability Using C-band Permanent Scatterers InSAR. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 99, 5-14. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2024.99.005>.

Отримано 01.10.24

UDC 528.8.044.2

### **Denys Kukhtar**

PhD in Technical Sciences, Department of Geodesy and Land Management  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
(Ivano-Frankivsk, Ukraine)

E-mail: [denys.kukhtar@nung.edu.ua](mailto:denys.kukhtar@nung.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2839-4318>

### **DATA SOURCES OF SATELLITE RADAR IMAGING**

*In the past decade, there has been a growing scientific interest in the use of satellite radar data. However, representatives of the scientific community in Ukraine frequently inquire about the methods and means of accessing satellite radar data to address various scientific, educational, and applied challenges. This article provides a comprehensive overview of the knowledge acquired regarding the use of various sources of satellite radar imagery for monitoring natural and anthropogenic geodynamic phenomena.*

*The aim of this article is to systematize the accumulated experience in searching for and utilizing radar images. It offers an in-depth review of radar data sources that can be employed for processing multi-temporal series of satellite images, creating differential interferograms from image pairs, as well as analyzing and visualizing individual Synthetic Aperture Radar (SAR) images. Detailed resources for downloading and visualizing radar data are also reviewed. The article lists freely available satellite missions accessible through the Alaska Satellite Facility's active archive center. The article also provides an overview of commercial radar missions and their acquisition features. Additionally, it explores the potential for expanding the range of radar image sources available for research under the European Space Agency's Third Party Missions program. The prospects of extending the European Ground Motion Service (EGMS) coverage to include the territory of Ukraine are analyzed.*

*The presented information is intended to be a valuable resource for scientists, educators, and pedagogical professionals who rely on remote sensing data, particularly radar images, for educational and research purposes. By systematizing the available sources and methods for accessing satellite radar data, this article aims to facilitate more effective utilization of these resources in various scientific and practical contexts.*

**Keywords:** SAR; commercial images; satellite missions; metalink; EO Browser; Copernicus Browser; ASF; EGMS.

**Олександр Миколайович Лопушанський<sup>1</sup>, Катерина Богданівна Смолій<sup>2</sup>,  
Роман Богданович Ванчура<sup>3</sup>, Марія Романівна Лопушанська<sup>4</sup>,  
Юлія Миколаївна Лопушанська<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук,  
доцент кафедри економічної експертизи та землевпорядкування  
Західноукраїнський національний університет (Тернопіль, Україна)  
E-mail: [o.lopushanskyi@wunu.edu.ua](mailto:o.lopushanskyi@wunu.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9363-2979>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук,  
старший викладач кафедра лісової таксації та лісовпорядкування  
Національний лісотехнічний університет України (Львів, Україна)  
E-mail: [kateryna.smoliy@gmail.com](mailto:kateryna.smoliy@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6731-1557>

<sup>3</sup>кандидат технічних наук,  
старший викладач кафедра лісової таксації та лісовпорядкування  
Національний лісотехнічний університет України (Львів, Україна)  
E-mail: [r.vanchura@gmail.com](mailto:r.vanchura@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2782-2405>

<sup>4</sup>аспірантка, аспірантка кафедри конструктивної географії і картографії  
Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів, Україна)  
E-mail: [mariia.lopushanska.agrn@lnu.edu.ua](mailto:mariia.lopushanska.agrn@lnu.edu.ua) ORCID ID: 0000-0002-0557-1609

<sup>5</sup>магістр, випускниця кафедри вищої геодезії та астрономії  
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)  
E-mail: [Julia@melnychuk.me](mailto:Julia@melnychuk.me)

## ПОБУДОВА ТОПОГРАФІЧНОЇ ПОВЕРХНІ СВІТОВОГО ОКЕАНУ В РЕГІОНІ ПІВНІЧНОГО МОРЯ

Широке застосуванням сучасних космічних методів дослідження поверхні Світового океану дозволило отримувати дані про цю поверхню з точністю в 1-5 см. Такий результат можна отримати за допомогою простого методу супутникової альтиметрії, який базується на альтиметричних вимірах відповідних супутників. Визначати дистанцію від бортового альтиметра супутникової місії до поверхні Океану та отримання його положення в просторі базуючись на даних SLR, GNSS, або DORIS технологій дає можливість обчислення висот SSH (Sea Surface Heights) океанічної поверхні над прийнятим референс-еліпсоїдом [9]. При попередньому дослідженні отриманих даних SSH ввівши поправки за вплив середовища та різних геофізичних чинників до вихідної інформації, які залежать від часу, у результаті обраховуються виправлені висоти рівня океанічної поверхні  $CorSSH$ . За останню чверть століття результати опрацювання із супутникових альтиметричних місій стали дієвим засобом побудови геоїда на водних акваторіях земної поверхні. Дані супутникової альтиметрії стали вихідними даними для знаходження середніх рівнів морів та океанів на різних ділянках планети і нульових точок відліку висот. Крім того, вивчення поверхні Світового океану за даними альтиметричних місій відкрило можливість обчислення достатньо надійної оцінки середнього значення потенціалу сили ваги  $W_0$  на його поверхні. Ці значення своєю чергою мають ключове значення для реалізації світової вертикальної системи висот, пов'язаної з гравітаційним полем Землі.

**Ключові слова:** вища геодезія; геодезія; альтиметрія; картографія; морська топографія; квазігеоїд; математична обробка геодезичних вимірів; комп'ютерна графіка; супутникові навігаційні системи.

Рис.: 4. Бібл.: 9.

**Актуальність теми дослідження.** Метод супутникової альтиметрії, як відносно новий підхід, широко розвинувся за останні 25 років. Високоточне супутникове знімання забезпечує широкий спектр досліджень про Землю детальною інформацією про стан океану та його зміни в часі. Отримані дані використовується, зокрема, у наукових роботах геодезії, океанографії та кліматології. Моделі динамічної топографії океану базуються головним чином на даних альтиметрії. Незбурена поверхня Світового океану має назву геоїд, водночас ця поверхня є основною рівневою поверхнею і є однією з найбільш вагомих референсних поверхонь у науках про Землю. Враховуючи, що до 1983 року при побудові поверхні геоїда не брали до уваги будь-які ефекти, пов'язані з припливами. У 1983 р. згідно з резолюцією IAG поверхню геоїда стали обчислювати з урахуванням непрямого припливу твердої Землі.

**Постановка проблеми.** Усереднені висоти морської поверхні є основним продуктом та результатом методу супутникової альтиметрії. Висоти отримані з опрацювання супутникових альтиметричних місій відповідають висотам геоїда та середній динамічній топографічній поверхні, осередненій за відповідний період часу і відносяться до поверхні

© О. М. Лопушанський, К. Б. Смолій, Р. Б. Ванчура, М. Р. Лопушанська, Ю. М. Лопушанська, 2024

геоїда [7; 8]. Опрацьовані результати альтиметра активно використовують для побудови та моделювання фігури Землі – геоїда. Геоїд, як відомо, служить референчною поверхнею відліку висот. Перед Україною вже давно постала ключова проблема оновлення системи висот, яку треба вирішувати якомога швидше. Відповідно до майбутніх проєктів, сучасна висотна мережа України буде відноситись до Амстердамської системи висот, що дасть змогу поєднати вітчизняну висотну систему з єдиною європейською системою висот EUVN (European Vertical Network). При цьому важливу роль буде відігравати поточний стан топографічної поверхні Північного моря [1; 2; 3], оскільки ця поверхня буде ключовою при побудові як європейського, так і загальноземного геоїда (квазігеоїда).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Шалене зростання різноманітних геодезичних технологій супроводжується не лише збільшенням типів вимірів із традиційним підвищенням їх рівня точності, але й вирішенням основної задачі геодезії - визначення фігури та гравітаційного поля Землі на більш якісному та точному рівні. Гравітаційне поле Землі ілюструє розподіл мас і перенесення їх як усередині, так і на поверхні Землі. Розмови про безперервне уточнення форми Землі не зникають багато десятиліть і є традиційними темами для наукових звершень та досліджень. Ці супутникової альтиметрії для дослідження геоїда й будуть відправною точкою для цього дослідження.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Побудова поля висот SSH для різних регіонів є постійною та актуальним завданням для дослідження топографії світового океану, аби розширити відомості про цей регіон. Вирішення цієї задачі з використанням конкретних даних альтиметрії є складним завданням, оскільки вони розташовані в основному вздовж супутникових трас (нерегулярно та не рівномірно). Пошук оптимальних способів та математичних рішень, аби отримати найбільш достовірне значення топографії Північного моря є головною проблемою, яку вирішено в цьому дослідженні.

**Мета дослідження.** З часом з'являється дедалі більше математичних та технічних рішень для опрацювання великого об'єму специфічних геодезичних даних. Супутникові дані, а особливо дані супутникової альтиметрії мають свою специфіку, адже ці дані складаються зі спостережень різних супутників. У кожного супутника своя орбіта, відповідно, перед нами постає задача якісного об'єднання даних та побудова за цими спостереження якісної мапи висот топографії світового океану в регіоні Північного моря.

**Виклад основного матеріалу.** Вихідною інформацією для побудови поля висот SSH (CorSSH) на регіон Північного моря, були альтиметричні виміри із семи супутникових місій, таких як: ERS-1, ERS-2, Envisat, GFO, Topex/Poseidon, JASON-1, JASON-2, які були попередньо опрацьовані на рівномірну сітку  $2' \times 2'$  за період з 1992 по 2007 рр.

Проте коли ми маємо досліджуваний масив даних із такою складною та не рівномірною геометрією розташування, завдання ускладнюється. Тому, використовуючи світовий досвід, ми переінтерполювали супутникові дані з альтиметра на вузли регулярної сітки з кроком ( $2' \times 2'$ ). Аби реалізувати такий підхід, ми застосовували програмний пакет GMT, а для побудови сітки скористались методом мінімальної кривини. Цей метод має низку вагомих козирів порівняно з іншими методами ґрдування, такими як: метод середньої квадратичної колокації, метод радіальних базисних функцій, метод найближчого сусіда і.т.д. Важливою і найбільш визначальною перевагою цього підходу є його висока швидкість порівняно з усіма вищепереліченими методами. Хоча цей метод і не відноситься до методів точної інтерполяції, а є ітеративним, задаючи певну точність остаточних результатів інтерполяції (яка звісно визначається точністю вихідної інформації) можна досить швидко отримати якісні результати. Важливо сказати, що точні інтерполяційні способи потребують розв'язання великих систем лінійних рівнянь. При значній кількості вихідних даних може займати багато часу.

Для вирішення поставленої задачі необхідно привести всі дані до системи еліпсоїда WGS84 ( $a_{WGS84}=6378137$  м;  $f_{WGS84}=1/298.257223563$ ), у якій задано висоти квазігеоїда.

На першому етапі весь масив альтиметричних даних був приведений у єдину систему відліку, оскільки центр AVISO виконує обробку вихідної інформації відносно еліпсоїда AVISO:  $a_{AVISO}=6378136,3$  м;  $f_{AVISO}=1/298,257$ , прийнятого для системи TOPEX [4].

У цьому випадку трансформацію достатньо виконати за формулами:

$$CorSSH_{WGS84}=(r_{AVISO}-r_{WGS84})+CorSSH_{AVISO}, \tag{1}$$

$$r_{AVISO}=a_{AVISO}(1-f_{AVISO} \sin^2 B), r_{WGS84}=a_{WGS84}(1-f_{WGS84} \sin^2 B), \tag{2}$$

де  $CorSSH_{WGS84}$ ,  $CorSSH_{AVISO}$  – висоти поверхні океану відносно еліпсоїда WGS84 та AVISO відповідно;  $B$  – широта,  $a_{WGS84}$ ,  $f_{WGS84}$ ,  $a_{AVISO}$ ,  $f_{AVISO}$  – параметри відповідних еліпсоїдів (велика піввісь і стиснення);  $r_{WGS84}$ ,  $r_{AVISO}$  – значення геоцентричних радіусів цих еліпсоїдів.

Остаточна регулярна сітка простягалась від 50 градуса пн. широти до 63 градуса пн. широти та від 355 градуса східної довготи до 12 градуса західної довготи, що охоплює площину досліджуваної території. Значення SSH вузлів сітки, які потрапляли на суходіл були вилучені із сітки. При цьому в сітці залишилися тільки дані на територію Північного моря (рис. 1).

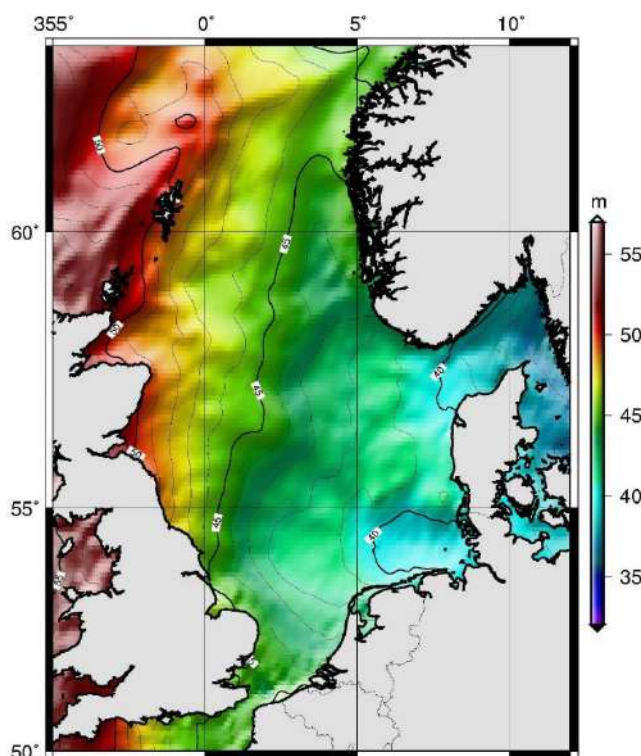


Рис. 1. Значення висот SSH [м] на регіон Північного моря

Рисунок 1 демонструє відфільтровані дані SSH для обчислення висот рівня моря на рівномірній сітці зі значеннями  $SSH_0$ , що одержані за альтиметричними вимірами. Після приведення  $CorSSH$  та висот квазігеоїда до єдиної системи (статистики наведені в табл. 1) та їх осереднення на вибрану рівномірну сітку, можливою стає побудова поля висот моделі топографії досліджуваного регіону [5].

Таблиця 1 – Статистичні характеристики даних SSH

Статистики	Північне море $CorSSH$ , м
Мінімальне значення	35
Максимальне значення	55
Середнє значення	44,73
Стандартне відхилення	4,34

Далі отримані значення були приведені до припливної системи ZFTS (zero frequency time system). Для цього ми скористались формулою (3).

$$N_{MTS} = N_{ZFTS} - 0,198 \left( \frac{3}{2} \sin^2 B \right), \tag{3}$$

Наведемо таблицю статистичних характеристик, трансформованих даних WGS84 в систему ZFTS.

Таблиця 2 – Статистичні характеристики, трансформованих даних WGS84 в систему ZFTS

Статистики	Північне море ZFTS, м
Мінімальне значення	35,53
Максимальне значення	55,03
Середнє значення	45,05
Стандартне відхилення	4,35

Ці припливні ефекти мають бути враховані з метою приведення параметрів, що порівнюються в єдину припливну систему. Зауважимо, що редукція (3) сягає максимального значення – 0.5 м. Після приведення SSH до середньої припливної системи, можна отримати висоти топографії моря (рис. 2) для досліджуваного регіону на основі такого співвідношення:

$$SST = CorSSH - \xi_{MTS}, \tag{4}$$

де *CorSSH* є значеннями висот рівня моря з альтиметричних вимірів у системі MTS,  $\xi_{MTS}$  – висота квазігеоїда відповідно.

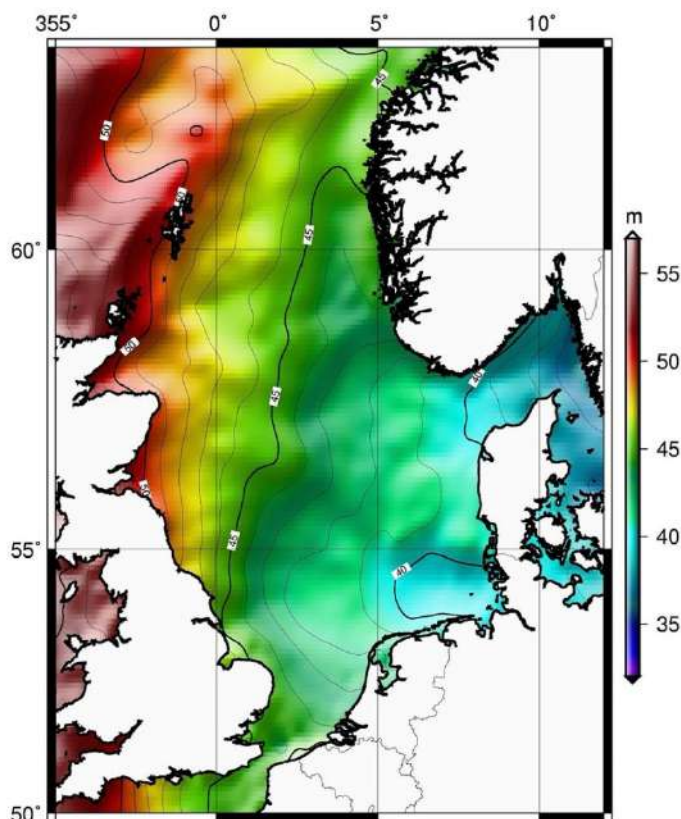


Рис. 2. Наближений геоїд [м], отриманий згладжуванням за Гауссом в регіоні Північного моря

Значення SSH вузлів сітки, які потрапляли на суходіл були вилучені. При цьому в сітці залишились тільки дані на територію Північного моря.



З огляду, що у значеннях вихідних даних існує присутність високочастотних остаточно залишків різних редукцій, що залежать від часу, необхідною є фільтрація даних одним із відомих методів. Ці залишки були видалені застосуванням відомого фільтра Гаусса [6]. Цей цифровий фільтр належить до такого типу фільтрів, який відмежовує високочастотні шуми із сигналу. При цьому центральний елемент має найбільше значення і відповідає піку розподілу Гаусса. У межах обраного вікна значення решти елементів зменшуються по мірі віддалення від центрального елемента згідно з розподілом Гаусса. Після проведеної процедури фільтрації нами отримано модель топографії океану SST (рис. 3). Черговий крок дозволяє вирішити поточну задачу побудови високоточної моделі висот поверхні моря SST, враховуючи наявність Північноатлантичної течії з висотами меншими ніж 2 м відносно поверхні геоїда [7; 8]. Усе це зумовлено доволі мілководним регіоном Північного моря у порівнянні з іншими морями.

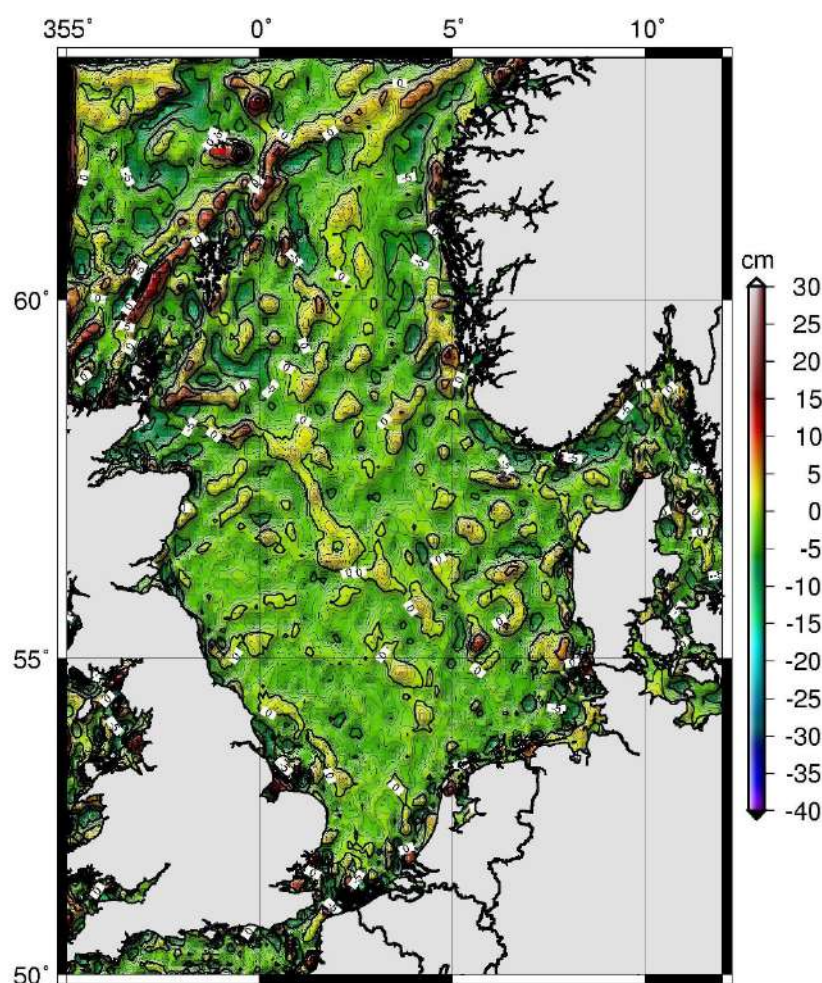


Рис.3. Значення висот топографії [см] Північного моря  $SST = SSH - N$

У процесі цієї стадії ми порівняли отриману сітку SSH з даними Європейського квазі-геоїда EGM08, щоб перевірити чи збігається вона з середнім рівнем моря. EGM08 є сучасною гравіметричною моделлю європейського квазігеоїда, яка була побудована за незалежними даними морської гравіметрії. Крім цього, при побудові EGM08 не залучалось ніяких даних супутникової альтиметрії. Для побудови моделі топографії Північного моря необхідно від висот SSH відняти висоти квазігеоїда N [9]. Модель топографії моря обчислена за



різницею між SSH-EGM08. Оскільки Північне море є калібрувальним полігоном для супутників Європейського космічного агентства (ESA), то дослідження в цьому регіоні є актуальними і мають наукове підґрунтя. Отримана модель топографії Північного моря SSTM дає можливість виконати незалежну перевірку даних висот геоїда. У результаті згладження за Гауссом було отримано модель стаціонарної частини топографії океану SSTM (4).

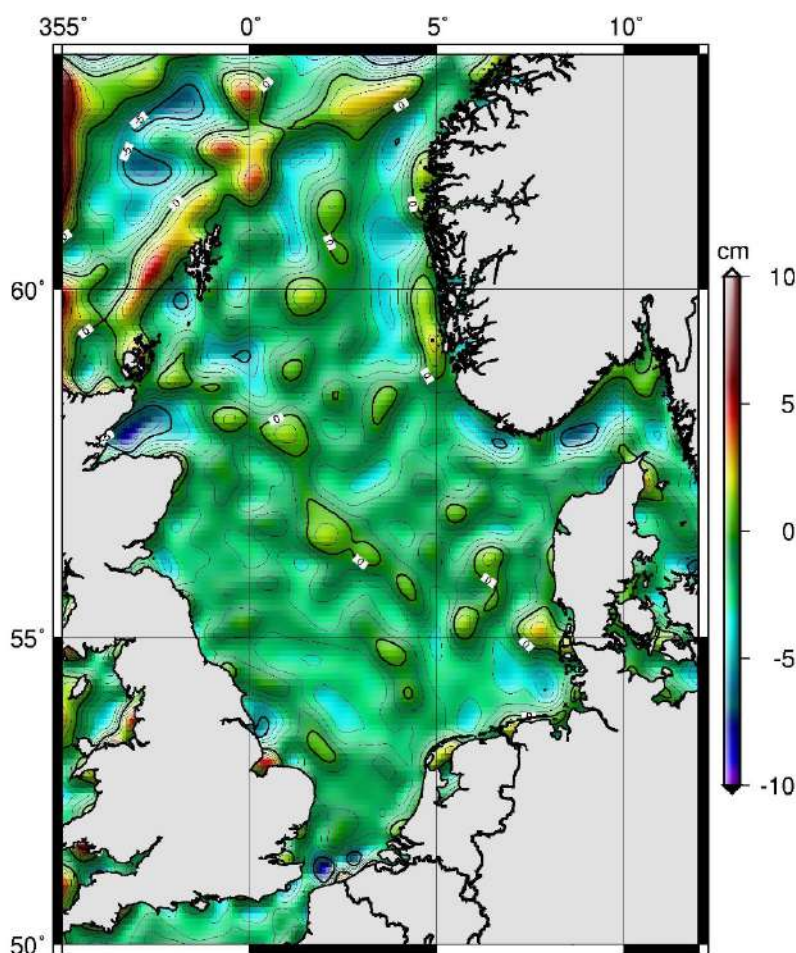


Рис. 4. Модель висот SSTM [см] обчислена фільтрацією за Гауссом

**Висновки.** У результаті виконаних досліджень було проаналізовано дані супутникової альтиметрії на регіоні Північного моря. Усього використано близько 2 млн вимірів за період з 1992р. до 2007р. Виконана фільтрація нерегулярних даних SSH та проінтерполяція на вузли регулярної сітки 2'x2' з використанням методу мінімальної кривини. Для побудови моделі топографічної поверхні моря обчислено значення висот топографії моря  $SST = SSH - N$ . Фільтровані SST дали можливість отримати стаціонарну поверхню топографії моря в регіоні Північного моря SSTM. Розроблена методика дає можливість підтвердити чи відображає високу кореляцію морських течій отриману за традиційними методами та методом супутникової альтиметрії в регіоні Північного моря.

#### Список використаних джерел

1. Третяк Н. П. Модельовання гравітаційного поля та топографії океану в регіоні Антарктики : дис. на здоб. наук. ступ. канд. техн. наук: спец. 05.24.01 — геодезія, фотограметрія і картографія / Н. П. Третяк ; Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2008.

2. Марченко, О. М. Моделивання топографії регіону Антарктики / О. М. Марченко, Н. П. Третяк // Вісник геодезії та картографії. – 2008. – № 4. – С. 7-10.
3. Ярема, Н. П. Основні етапи підготовки вихідних даних для побудови топографічної поверхні моря, УМНТЗ / Н. П. Ярема, О. М. Лопушанський, Т. Р. Павлів // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2011. – Вип. 74. – С. 60-64.
4. Andersen, O. B. The DNSC08MDT Mean Dynamic Topography, (DTU-SPACE) / O. B. Andersen, P. Knudsen. – Danish National Space Center, 2008.
5. Andersen, O. B. Improved high resolution altimetric gravity field mapping (KMS2002 Global Marine Gravity Field) / O. B. Andersen, P. Knudsen, R. Trimmer // IAG Symposia 128:326-331, Springer Verlag, 2005.
6. Хеммінг, Р. В. Цифрові фільтри / Р. В. Хеммінг ; пер. с англ. ред. пер. О.А. Потапов. – Москва : Недра, 1987. – Пер. изд.: США, 1983. – 221 с.
7. Rio M.-H. The estimation of the ocean Mean Dynamic Topography through the combination of altimetric data, in-situ measurements and GRACE geoid: From global to regional studies / Rio M.-H., P. Schaeffer, et al // Proceedings of the GOCINA international workshop, Luxembourg, 2005.
8. Rio M.-H. A new Mean Dynamic Topography computed over the global ocean from GRACE data, altimetry and in-situ measurements / Rio M.-H., P. Schaeffer, G. Moreaux, J-M Lemoine, E. Bronner // Paper presented at OceanObs09 symposium, 21-25 September 2009, Venice.
9. Seeber G. Satellite Geodesy 2<sup>nd</sup> completely revised and extended edition. Walter de Gruyter, Berlin New York, 2003 – 589 p.

### References

1. Tretiak, N.P. (2008). *Modeliuvannia hrovitatsiinoho polia i topohrafii okeanu v rehioni Antarktyky* [Modelling the gravitational field and ocean topography in the Antarctic region] [PhD dissertation, National University “Lviv Polytechnics”].
2. Marchenko O.M., Tretiak N.P. Modeliuvannia topohrafii rehionu Anktarktyky [Modelling the topography of the Antarctic region]. *Visnyk heodezii ta kartohrafii – Bulletin of Geodesy and Cartography*, (4), 7-10.
3. Yarema, N.P., Lopushanskyi, O.M., Pavliv, T.R. (2011). Osnovni etapy pidhotovky vykhidnykh danykh dlia pobudovy topohrafichnoi poverkhni moria [The main stages of preparing the initial data for building the topographic surface of the sea]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia – Geodesy, cartography and aerial photography*, 74, 60-64.
4. Andersen, O.B., Knudsen, P. (2008). *The DNSC08MDT Mean Dynamic Topography, (DTU-SPACE)*. Danish National Space Center.
5. Andersen, O.B., P. Knudsen, R. (2005). *Trimmer. Improved high resolution altimetric gravity field mapping (KMS2002 Global Marine Gravity Field)*. IAG Symposia 128:326-331, Springer Verlag.
6. Khemminh, R.V. (1987). *Tsyfrovi filtry [Digital filters]* [Translation from English]. Edited in English by O.A. Potapov. Nedra, 1987.
7. Rio, M.-H., P. Schaeffer, et al. (2005). The estimation of the Ocean Mean Dynamic Topography through combination of altimetric data, in-situ measurements and GRACE geoid: From global to regional studies. *Proceedings of the GOCINA international workshop*, Luxembourg.
8. Rio, M.-H., Schaeffer, P., Moreaux, G., Lemoine, J-M, Bronner, E. (21-25 September 2009). A new Mean Dynamic Topography computed over the global ocean from GRACE data, altimetry and in-situ measurements. *Paper presented at OceanObs09 Symposium*, Venice.
9. Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy 2<sup>nd</sup> completely revised and extended edition*. Walter de Gruyter, Berlin New York, 2003 – 589 p.

Отримано 08.08.2024

UDC 528.4

**Oleksandr Lopushanskyi<sup>1</sup>, Kateryna Smolij<sup>2</sup>, Roman Vanchura<sup>3</sup>,  
Mariia Lopushanska<sup>4</sup>, Yulia Lopushanska<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Science,  
Associate Professor of Economic Expertise and Land Management Department  
West Ukrainian National University (Ternopil, Ukraine)

**E-mail:** [o.lopushanskyi@wunu.edu.ua](mailto:o.lopushanskyi@wunu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-9363-2979>

<sup>2</sup>PhD in Technical science,  
Senior Lecturer, Department of Forest Taxation and Forest Management  
National Forestry University of Ukraine (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [kateryna.smolij@gmail.com](mailto:kateryna.smolij@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6731-1557>

<sup>3</sup>PhD in Technical Science,  
Senior Lecturer, Department of Forest Taxation and Forest Management  
National Forestry University of Ukraine (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [r.vanchura@gmail.com](mailto:r.vanchura@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2782-2405>

<sup>4</sup>PhD Student, PhD student at the Department of Constructive Geography and Cartography,  
Ivan Franko National University of Lviv (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [mariia.lopushanska.agrn@lnu.edu.ua](mailto:mariia.lopushanska.agrn@lnu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0557-1609>

<sup>5</sup>Master of Geodesy, Student graduate of Department of Higher Geodesy and Astronomy  
National University "Lviv Polytechnics" (Lviv, Ukraine)

**E-mail:** [Julia@melnychuk.me](mailto:Julia@melnychuk.me)

## CONSTRUCTION OF THE TOPOGRAPHIC SURFACE OF THE WORLD OCEAN IN THE NORTH SEA REGION

*Satellite altimetry is somewhat unique among ocean remote sensing techniques because it provides much more than surface observations. By measuring sea surface topography and its change in time, altimeters provide information on the Earth's gravity field, the shape and structure of the ocean bottom, the integrated heat and salt content of the ocean, and geostrophic ocean currents. Much progress has been made in the development of operational ocean applications, and altimeter data are now routinely assimilated in near-real-time to help forecast El Niño, monitor coastal circulation, and predict hurricane intensity. Although past missions have been flown largely for research purposes, altimetry is rapidly moving into the operational domain and will become a routine component of international satellite systems during the twenty-first century.*

*Regarding the rapidly growing satellite altimetry database and corresponding products worldwide, the investigation of different mean dynamic ocean topography (MDT) models was carried out, which was assessed to be important for further use in geodetic applications. The efficiency and quality of different MDT models are discussed in view of the adopted geoids as reference surfaces.*

*The region of the North Sea area was applied for the construction of the SST (Sea Surface Topography) model based on the altimetry data from 6 satellites for the total period of 15 years. Gravimetric quasigeoid and SST model were used for the comparison with independent data from 5 tide-gauges and led to the conclusion on the 44.73 cm level of accuracy of discussed models. Similar comparison of EGM2008 and computed normal heights for well-determined GPS-sites led to the low accuracy of this MDT.*

**Keywords:** higher geodesy; geodes; mathematical processing of geodetic data; altimetry; cartography; satellite navigation systems; sea surface topography; computer graphics; quasigeoid.

*Fig.: 4. References: 9.*

**Любов Олексіївна Маслій**

аспірантка III курсу кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем  
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)

E-mail: [gnomimir@gmail.com](mailto:gnomimir@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3844-462X>

**ОСНОВИ ФОРМАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЗНАЇ  
ПРО ЗЕМЕЛЬНЕ АДМІНІСТРУВАННЯ В УКРАЇНІ**

У статті досліджується можливість побудови «колективного розуму» на основі вчення Вернадського В. І. та значних досягнень у розвитку геоінформаційних технологій. Запропоновано створення Центру обробки кадастрової інформації, в основу якого покладено базу знань і кадастр інтелектуальних ресурсів держави. Структура бази знань має специфіку, яка представлена на основі теорії категорій та функторів, що дозволяє на різних рівнях її ієрархії використовувати як мови загальної алгебри й формальної логіки, так і відомих евристичних конструкцій. Визначається доцільність практичної реалізації пропозицій доказу гіпотези про можливість створення «колективного розуму» на прикладі земельного адміністрування.

**Ключові слова:** центр обробки; кадастрова інформація; кадастрові системи; геоінформаційні технології; база знань; теорія категорій; моделі знань; інтегрований інтелект; загальна алгебра; колективний розум; земельне адміністрування.

Рис. 3. Бібл.: 13.

**Актуальність теми дослідження.** Нині людство наближається до стану інформаційної сингулярності й у зв'язку з цим дедалі більше актуалізується задача, про яку в середині минулого століття говорив академік В. І. Вернадський, розробляючи вчення про перехід біосфери Землі до ноосфери. По суті, у межах цього вчення було сформульовано гіпотезу про можливість створення колективного розуму. На жаль, у середині минулого століття лише починався розвиток інформаційних та геоінформаційних систем і технологій, тому за таких умов гіпотеза В. І. Вернадського про створення колективного розуму була безпідставною. На сьогодні бурхливий розвиток геоінформаційних систем, теоретична база яких поповнюється новими методами і моделями та термінологією, надає можливість сформулювати гіпотезу про можливе створення колективного розуму.

Також вчення В. І. Вернадського про ноосферу та роль людини в розвитку біосфери надає сучасну основу для осмислення питань земельного адміністрування в контексті стійкого розвитку суспільства. Вернадський підкреслював взаємозв'язок між людиною і природою, наголошуючи на тому, що людська діяльність, зокрема господарська та управлінська, стає основним чинником розвитку планети Земля [1].

В умовах глобальних екологічних викликів, земельні ресурси України є важливим елементом сталого розвитку, а ефективне адміністрування земельних ресурсів стає невід'ємною частиною забезпечення гармонійної взаємодії між суспільством і природою. Також вчення Вернадського закликає до раціонального використання природних ресурсів і впровадження наукових підходів у державну політику, що робить питання формалізації знань про земельне адміністрування надзвичайно актуальним.

На сьогодні в Україні, враховуючи реформу земельних відносин, постає необхідність у створенні надійної системи управління землями на основі сучасних технологій та даних. Формальне представлення знань у сфері земельного адміністрування дозволить підвищити ефективність управління земельними ресурсами, зменшити екологічне навантаження та створити передумови для збалансованого розвитку територій.

**Постановка проблеми.** В контексті земельного адміністрування можна провести паралелі з ноосферним підходом до управління природними ресурсами, де знання, наукові досягнення та інтелектуальна діяльність людства відіграють ключову роль у формуванні стійких та гармонійних відносин між людиною та природним середовищем.

Земля, як основний ресурс та фундамент для існування людства, є важливою складовою біосфери, яку Вернадський визначав як «область життя». Для сталого розвитку суспільства необхідно вдосконалювати процеси управління земельними ресурсами, що вимагає нових підходів до формалізації знань у цій сфері. Вернадський вважав, що перехід людства до ноосфери – сфери розуму – передбачає глибоке розуміння природних процесів, системний підхід до використання ресурсів та інтеграцію наукового знання в управлінську діяльність.

Таким чином, проблема формального представлення знань про земельне адміністрування в Україні полягає у необхідності створення ефективної системи управління земельними ресурсами, яка б враховувала сучасні наукові підходи, забезпечувала прозорість, точність і системність у прийнятті рішень, а також сприяла збереженню природного середовища в умовах його інтенсивного використання. Це потребує нових методів формалізації знань, які були б доступними для широкого кола фахівців та враховували сучасні технології, інформаційні системи та принципи сталого розвитку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням формалізації представлення знань займаються як вітчизняні, так і закордонні науковці. Наприклад, у роботі [2] науково обґрунтовано термін «ноогеоматика», дефініція якого враховує глобальні ідеї В. І. Вернадського про перехід біологічної сфери Землі до ноосфери. Перехід людства до ноосфери передбачає глибоке розуміння природних процесів, а системний підхід до використання ресурсів передбачає розвиток кадастрових систем. У Європейському Союзі безперервно розвивають та модернізують кадастрові системи [3]. Кабінет Міністрів України робить спробу модернізувати земельний кадастр України та висуває вимоги щодо створення електронної взаємодії державних інформаційних ресурсів [4]. У статті [5] обговорюється проблема розширення можливостей кадастрових систем, де пропонується до складу кадастрових систем включити систему підтримки прийняття рішень і за рахунок синергії отримати принципово нову кадастрову систему, засновану на принципах використання інтегрованого інтелекту. Крім того, у роботі запропонована класифікація математичного апарату для формального представлення знань у базах знань інтелектуальних кадастрових системах, де виділено такі класи математичних методів: обчислювальної; інтерпретаційної математики; метаматематики; м'яка математика Заде. Питанням формалізації земельних відносин присвячені роботи [6-8], а моделі комп'ютерної підтримки ухвалення рішень системи земельних відносин загалом представлені у дисертації [9]. Складність, різноманіття та слабка структурованість земельних відносин привели автора роботи до використання найбільш абстрактних методів теорії категорій та функторів, які є основою топології та загалом метаматематики.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що на даний час не повною мірою і з малою продуктивністю використовуються знання експертів для вирішення практичних, складних багатокритеріальних задач, які виникають у різних предметних галузях. Здебільшого знання експертів використовуються під час захисту дисертацій, рецензуванні результатів монографічних досліджень та наукових статей, і тільки теоретично.

Результати децентралізації місцевого самоврядування [10], а також використання знань експертів на порталі «Децентралізація» призвели до думки про створення кадастру інтелектуальних ресурсів (КІР) держави, який ґрунтується на експертних знаннях науковців ВНЗ, НДІ та профільних організацій.

**Метою статті** є формальне представлення знань про земельне адміністрування в Україні на основі розробки моделі знань, яка відповідала б глобальному уявленню В. І. Вернадського про процеси переходу біосфери в ноосферу й підтверджувала його гіпотезу про можливе створення колективного розуму на Землі.

**Виклад основного матеріалу.** Викладене вище дозволило дійти висновку про створення Центру обробки кадастрової інформації (ЦОКІ), який може функціонувати на основі інтегрованого інтелекту [5; 11].

Основні елементи ЦОКІ показані рис. 1, де позначені:  $A_c$  – агломерація сільського рівня;  $A_{pc}$  – агломерація рівня селищ;  $A_g$  – міська агломерація;  $A_r$  – агломерація району;  $A_{rg}$  – агломерація регіону (області). На рисунку також зазначено: БЗВ – база знань В. І. Вернадського, БД – база даних, БТМ – база типових моделей, R – вирішувач, I – інтелектуальний інтерфейс.

Важливим елементом ЦОКІ є база знань, якій присвоїмо ім'я академіка В. І. Вернадського, оскільки його знання і мислення пов'язані з глобальними процесами формування ноосфери. Також він є засновником таких наук, як геохімія, біогеохімія та радіогеологія.

Виходячи з вищесказаного, визначимо вимоги до бази знань Вернадського (БЗВ). По-перше, вона повинна мати багатшарову ієрархічну структуру. По-друге, мати можливість зберігати й використовувати, як логічні, так і евристичні моделі знань.

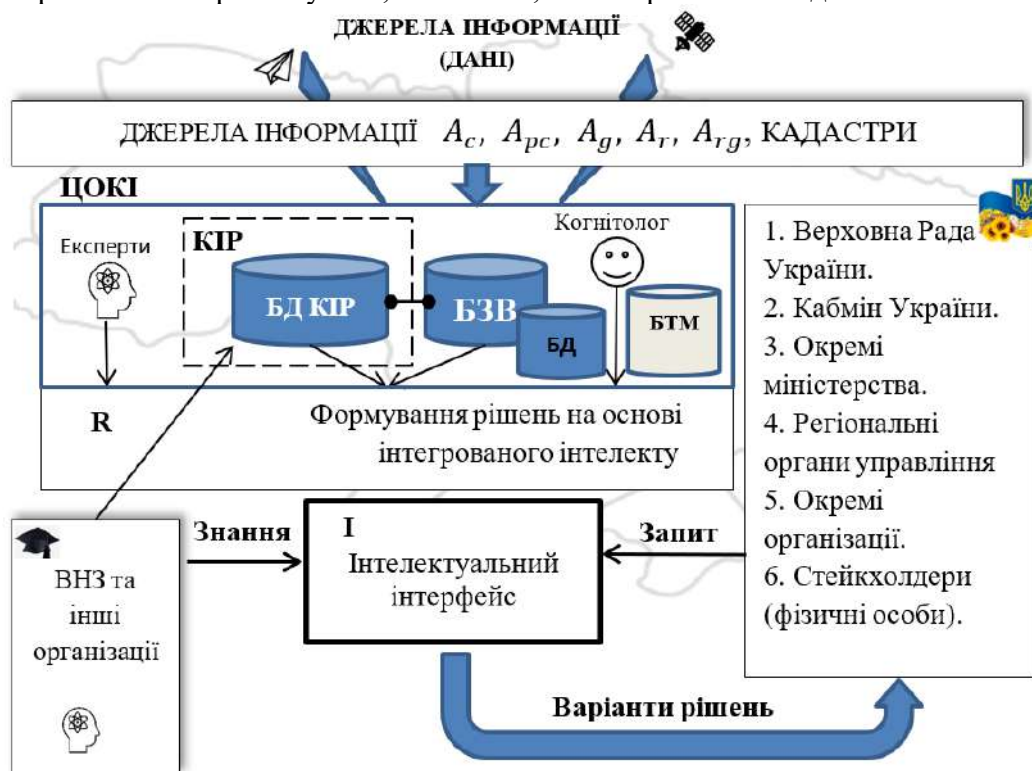


Рис. 1. Узагальнена схема Центру обробки кадастрової інформації  
Джерело: розроблено автором.

По-третє, дозволяти зберігати моделі знань різного рівня абстракції та узагальнення. По-четверте, формувати логічний висновок чи результати розрахунків на кожному рівні ієрархії її побудови. По-п'яте, забезпечувати заданий час обробки запиту. Це лише основні вимоги, які можна визначити на початковому етапі побудови БЗВ.

Важливо зауважити, що зазначені вище вимоги зумовлюють вибір мови формалізації побудови моделей предметних областей, об'єктів, процесів та явищ з погляду ноосферного вчення. На наш погляд, окремі положення вчення Вернадського щодо еволюції біосфери в ноосферу безпосередньо пов'язані із сучасними земельними відносинами в Україні [12]. Тому прийняте в топології поняття «морфізм» та його похідні (ізоморфізм, мономорфізм, автоморфізм та інше) називатимемо нооморфізмами та позначатимемо у нашому випадку земельні відносини:



$$\mathcal{K} : Y \rightrightarrows X, \mathcal{K}o : Y \Leftarrow X, \tag{1}$$

де готичною літерою  $\mathcal{K}$  і потрійною стрілкою  $\rightrightarrows$  позначається конус нооморфізмів деякої категорії  $\mathbb{Z}$ , що складається з шести, за кількістю груп користувачів ЦОКІ (див. рис. 1) підкатегорій  $\mathbb{Z} = \{Z_i, i = \overline{1,6}\}$ .

Конус нооморфізмів  $\mathcal{K}o$  і зворотна потрійна стрілка  $\Leftarrow$  показує зворотні відображення від підкатегорії  $Z_6$  до підкатегорії  $Z_1$ .

Всередині підкатегорії  $\mathbb{Z} = \{Z_i, i = \overline{1,6}\}$  нооморфізми між їх об'єктами позначимо  $\mathcal{K} : Z_1 \xrightarrow{noosf} Z_i, i = \overline{2,6}$ . Позначимо:

$Ob_{Z_1}$  – основні положення Земельного кодексу України;

$Ob_{Z_2}$  – об'єкти, процеси та явища, пов'язані із земельним адмініструванням в агломерації  $A_{rg}$ ;

$Ob_{Z_3}$  – галузеві об'єкти, процеси та явища, пов'язані із земельним адмініструванням в агломерації  $A_r$ ;

$Ob_{Z_4}$  – регіональні об'єкти, процеси та явища, пов'язані із земельним адмініструванням в агломерації  $A_g$ ;

$Ob_{Z_5}$  – об'єкти, процеси та явища, пов'язані з адмініструванням земельних відносин на територіях  $A_{rg}, A_r, A_g, A_{pc}$ ;

$Ob_{Z_6}$  – об'єкти, процеси та явища, пов'язані з використанням земельних ресурсів особами, які проживають на території  $A_c$ , а також іншими фізичними особами.

Геометрична інтерпретація категорної моделі з введеними позначеннями наведена рис. 2, на якому показано, що  $\{Z_i\} \in \mathbb{Z}$ , а кожна з підкатегорій може містити деякі об'єкти у вигляді фізичних об'єктів, процесів або явищ. Також будемо розрізняти математичний об'єкт, що належить категорії, наприклад  $Ob_{Z_6}$  і фізичні об'єкти, наприклад, земельна ділянка, процес реєстрації земельної ділянки, атмосферні явища тощо.

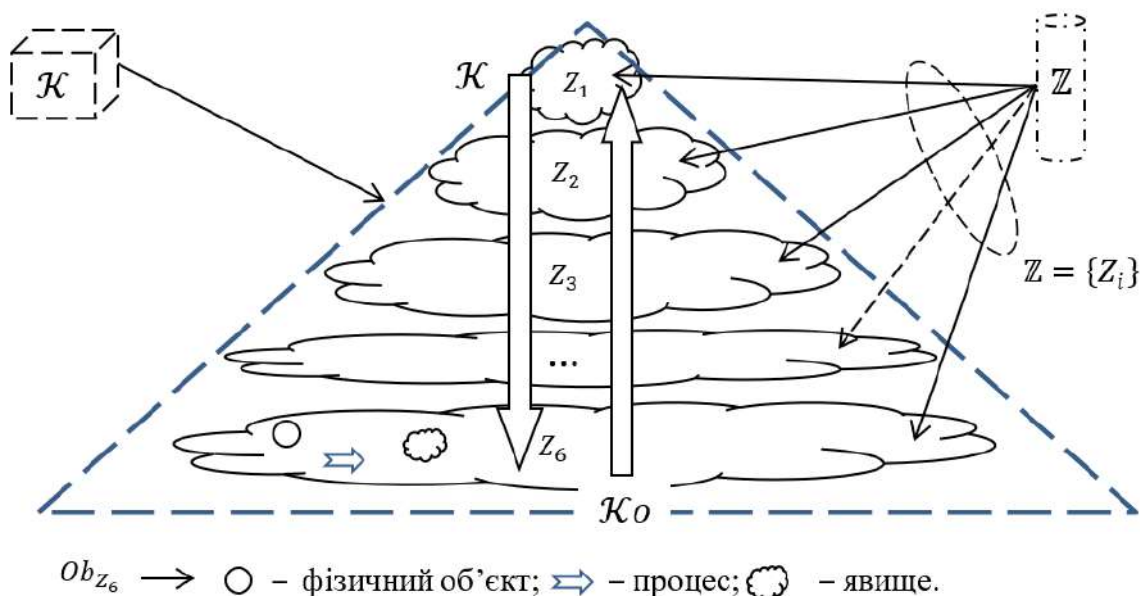


Рис. 2. Геометрична інтерпретація категорної моделі земельного адміністрування в Україні

Джерело: розроблено автором.

Її аналітичне уявлення, використовуючи термінологію теорії категорій, запишемо у вигляді вежі множин і конусів нооморфізмів:

$$\left( \left( \left( \left( \left( (Z_6) \subset Z_5 \right) \subset Z_4 \right) \subset Z_3 \right) \subset Z_2 \right) \subset Z_1 \right) \subset \mathbb{Z}. \quad (2)$$

Тоді у гранично узагальненому вигляді та на високому рівні абстракції запишемо модель земельного адміністрування України у вигляді наступної формули:

$$M(admin) = \langle \mathbb{Z}, \mathcal{K}, \mathcal{K}_0, T \rangle, \quad (3)$$

де  $T$  – час існування фізичних об’єктів, процесів або явищ.

Введені позначення дозволяють формально уявити різноманітність процесів і явищ у сфері земельних відносин і створювати моделі знань, що записані як відомими евристиками (продукційними правилами, семантичними мережами, фреймами), так і алгебраїчними конструкціями. У роботі [13] запропоновано технологію формалізації слабоструктурованих процесів, засновану на методах формальної логіки, зокрема побудови формалізованих теорій. Недоліком даної технології є її обмеженість використання лише теоретико-множинними уявленнями. У теорії категорій множинні уявлення позначаються – **Set**.

Велике різноманіття еволюційних процесів і явищ, а також впливу на ці процеси природного інтелекту людини, на наш погляд, зумовлює вдосконалення технології формалізації. Тому запропоновано використовувати в ній уявлення знань на основі методів та формальних уявлень загальної алгебри, яка вивчає алгебраїчні системи: «алгебру груп» (**Grp**), «векторні простори» (**Vect**), топологічні простори (**Top**), метричні простори (**Met**), «алгебру Лі» та інші. Наведені у дужках позначення використовуються в теорії категорій та функторів. Удосконалена структура технології формалізації наведена рис. 3.

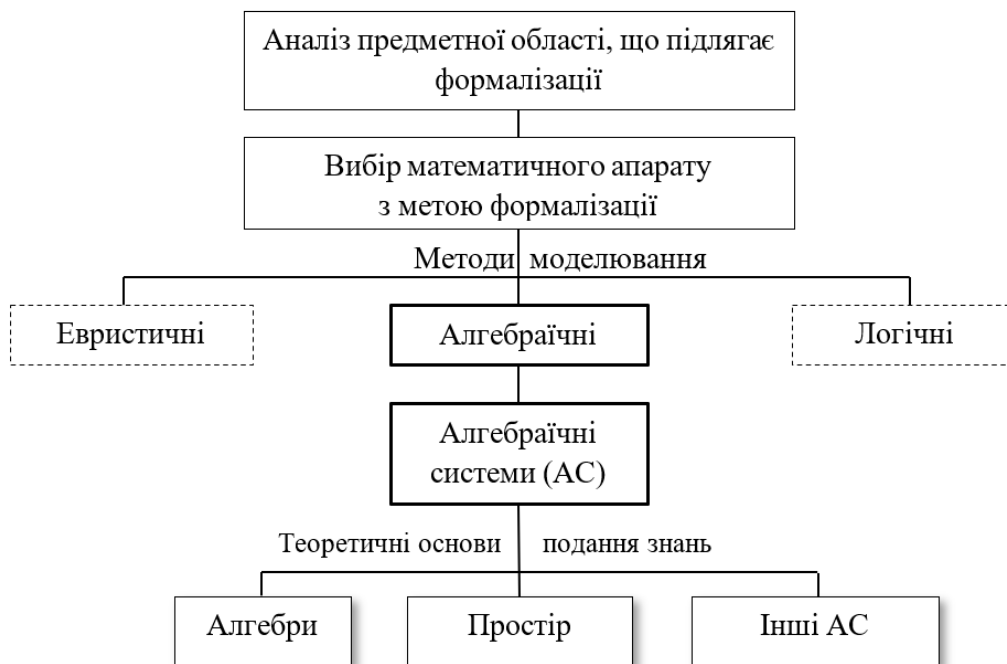


Рис. 3. Удосконалена структура технології формалізації

Джерело: розроблено автором.

Вдосконалення технології формалізації уявлення знань на основі методів та формальних уявлень загальної алгебри, обґрунтовується ще й тим, що в геодезії – науці про форму Землі та її гравітаційну складову часто використовується тензорний аналіз, в основі якого лежать перетворення топологічних та метричних просторів. Крім того, нині набули розвитку «ґрід» і «сплайн», а також хмарні технології, які дозволяють ство-



ривати 3D моделі складних об'єктів, процесів земельного адміністрування у взаємозв'язку із суміжними предметними областями, а також явищ, пов'язаних з природними та соціальними катаклізмами. Реалістичність моделей предметної області можуть забезпечувати інструментальні програмні засоби, які побудовані на методах фрактальної геометрії [2].

**Висновки.** У роботі вперше на основі положень вчення В. І. Вернадського про еволюційний розвиток біосфери та роль людини у перетворенні біосфери на ноосферу сформульовано гіпотезу про можливе створення колективного розуму. Передумовами на підтвердження гіпотези слугують наступні зазначені факти. По-перше, наближення людства до порогу інформаційної сингулярності. По-друге, стрімкий розвиток сучасних інформаційних та геоінформаційних систем та технологій. По-третє, значні результати у розвитку приладобудування, зокрема, фотограмметричного, здатного зондувати поверхню Землі та створювати хмари даних. По-четверте, отримано значні теоретичні результати щодо створення систем зі штучним та інтегрованим інтелектом. По-п'яте, переглянуто вимоги до побудови кадастрових систем. Ці передумови дозволили запропонувати створення Центру обробки кадастрової інформації у складі з кадастром інтелектуальних ресурсів та бази знань, названої на честь академіка В. І. Вернадського. Для створення такої бази знань запропоновано в основу її моделі покласти формалізми топології, саме теорії категорій і функторів, властивості якої дозволяють всередині категорій представляти (описувати), як евристичними, і логічними методами. У цій роботі обґрунтовується використання технології формалізації та алгебраїчні методи.

З іншого боку, створення кадастру інтелектуальних ресурсів з урахуванням Центру обробки кадастрової інформації, і навіть розробка у перспективі методики відбору експертів для вирішення складних практичних задач, остаточно покаже спроможність гіпотези В. І. Вернадського про можливе створення колективного розуму.

#### Список використаних джерел

1. В. І. Вернадський. Електронна колекція [Електронний ресурс] // Національна бібліотека України ім. В. І. Вернадського. – Режим доступу: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_eav/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=F&I21DBN=NAV&P21DBN=EAV&Z21ID=](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_eav/cgiirbis_64.exe?C21COM=F&I21DBN=NAV&P21DBN=EAV&Z21ID=).
2. Метешкін, К. А. Параллели и меридианы геодезии и информатики или основы ноогеоматики : учеб. пособие / К. А. Метешкін, А. Р. Левченко ; Харьков. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова. – Харьков : ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2019. – 203 с.
3. Метешкін, К. О. Порівняльний аналіз характеристик кадастрових систем країн Європейського Союзу / К. О. Метешкін, М. О. Пілічева, Л. О. Маслій // Комунальне господарство міст. Сер.: Технічні науки та архітектура. – 2023. – Вип. 3 (177). – С. 85-91.
4. Деякі питання електронної взаємодії електронних інформаційних ресурсів [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України від 08.09.2016 р. № № 606-КМУ. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/606-2016-п#Text>.
5. Пілічева, М. О. Комплексна проблема розширення можливостей кадастрових систем і шляхи її вирішення / М. О. Пілічева, К. О. Метешкін, Л. О. Маслій // Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура. – 2023. – Вип. 180(6). – С. 110-117.
6. Кухар, М. А. Алгоритм функціонування системи підтримки прийняття рішень в земельних відносинах [Електронний ресурс] / М. А. Кухар // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2017. – № 4(7). – С. 325–332. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Itmm\\_2017\\_7\\_4\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Itmm_2017_7_4_11).
7. Метешкін, К. О. Формалізація процесів у земельних відносинах України / К. О. Метешкін, М. А. Кухар // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – 2017. – № 2(1). – С. 139-143. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu\\_2017\\_2\(1\)\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2017_2(1)_25).
8. Метешкін К. О. Розробка формальної теорії статті земельного кодексу України та її алгоритмізація [Електронний ресурс] / К. О. Метешкін, К. А. Кухар // Scientific Journal «ScienceRise». – 2018. – № 1(42). – С. 37–39. – Режим доступу: <http://surl.li/bmyprdr>.

9. Кухар, М. А. Моделі комп'ютерної підтримки прийняття рішень системи земельних відносин в Україні: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Кухар Максим Анатолійович ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків, 2018. – 155 с.

10. Децентралізація [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://web.archive.org/web/20201006065420/https://decentralization.gov.ua/>.

11. Маслій, Л. О. Ноогеоматика як основа комплексного дослідження просторових процесів і явищ, що впливають на розвиток територій землі / Л. О. Маслій // Вплив кліматичних змін на просторовий розвиток територій Землі: наслідки та шляхи вирішення: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції (Херсон, 10 червня 2024 року). – Херсон: ХДАЕУ, 2024. – С. 30-35.

12. Земельний кодекс України [Електронний ресурс] : Закон України від 21.09.2024 р. № 2768-III-ВР. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>.

13. Метешкин, К. А. Кибернетическая педагогика: теоретические основы управления образованием на базе интегрированного интеллекта / К. А. Метешкин; Международный славянский ун-т. – Харків : Международный Славянский университет, 2004. – 400 с.

### References

1. *Natsionalna biblioteka Ukrainy im. V. I. Vernadskoho [National Library of Ukraine named after V. I. Vernadskyi]*. (n.d.). V. I. Vernadskyi – V. I. Vernadskyi. [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_eav/cgiir-bis\\_64.exe?&I21DBN=EAV&P21DBN=EAV&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=online\\_book&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=FF=&S21STR=00000837](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_eav/cgiir-bis_64.exe?&I21DBN=EAV&P21DBN=EAV&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=online_book&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=FF=&S21STR=00000837).

2. Meteshkyn, K.A., & Levchenko, A.R. (2019). *Paralleli i meridiany geodezii i informatiki ili osnovy noogeomatiki [Parallels and meridians of geodesy and informatics or the foundations of geogeomatics]*. KhNUHKh ym. A. N. Beketova.

3. Meteshkin, K.O., Pilicheva, M.O., & Maslii, L.O. (2023). Porivnialnyi analiz kharakterystyk kadastryvykh system krain Yevropeiskoho Soiuzu [Comparative analysis of the characteristics of cadastral systems of the countries of the European Union]. *Komunalne hospodarstvo mist. Serii: Tekhnichni nauky ta arkhitektura – Municipal management of cities. Ser.: Technical sciences and architecture*, 177(3), 85–91.

4. *Deiaki pytannia elektronnoi vziaiemodii elektronnykh informatsiinykh resursiv № 606-KMU [Some issues of electronic interaction of electronic information resources]*. (2016) (Ukraine) <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/606-2016-%D0%BF#Text>.

5. Pilicheva, M.O., Meteshkin, K.O., & Maslii, L.O. (2023). Kompleksna problema rozshyrennia mozhlyvosti kadastryvykh system i shliakhy yii vyryshennia [The complex problem of expanding the capabilities of cadastral systems and ways to solve it]. *Komunalne hospodarstvo mist. Serii: Tekhnichni nauky ta arkhitektura – Municipal management of cities. Ser.: Technical sciences and architecture*, 180(6), 110–117.

6. Kukhar, M.A. (2017). Alhorytm funktsionuvannia systemy pidtrymky pryiniattia rishen v zemelnykh vidnosynakh [Algorithm of the functioning of the decision-making support system in land relations]. *Informatyka ta matematychni metody v modeliuvanni – Informatics and mathematical methods in modeling*, 4(7), 325–332. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Itmm\\_2017\\_7\\_4\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Itmm_2017_7_4_11).

7. Meteshkin, K.O., & Kukhar, K.A. (2017). Formalizatsiia protsesiv zemelnykh vidnosynakh Ukrainy [Formalization of processes in land relations of Ukraine]. *Visnyk ZhDTU. Serii: «Tekhnichni nauky» – Bulletin of the Zhytomyr State Technological University. Series: Technical sciences*, 80(2), 139–143. [https://doi.org/10.26642/tn-2017-2\(80\)-139-143](https://doi.org/10.26642/tn-2017-2(80)-139-143).

8. Meteshkin, K.O., & Kukhar, K.A. (2018). Rozrobka formalnoi teorii statti zemelnoho kodeksu Ukrainy ta yii alhorytmizatsiia [Development of the formal theory of the article of the Land Code of Ukraine and its algorithmization]. *Scientific Journal «ScienceRise»*, 1(42), 37–39. <http://surl.li/bmypadr>.

9. Kukhar, M.A. (2018). *Modeli kompiuternoi pidtrymky pryiniattia rishen systemy zemelnykh vidnosyn v Ukraini [Models of computer decision-making support of the system of land relations in Ukraine]* [PhD dissertation, Kharkivskiy natsionalnyi universytet miskoho hospodarstva im. O. M. Beketova].

10. Internet archive. (n.d.). Detsentralizatsiia [Decentralization]. <https://web.archive.org/web/20201006145019/https://decentralization.gov.ua/>

11. Maslii, L.O. (2024). Nooheomatyka yak osnova kompleksnoho doslidzhennia prostorovykh protsesiv i yavyschch, shcho vplyvaiut na rozvytok terytorii zemli [Noogeomatics as the basis of a complex study of spatial processes and phenomena affecting the development of the territories of the earth]. *Vplyv klimatychnykh zmin na prostorovyi rozvytok terytorii zemli: Naslidky ta shliakhy vyrishennia: materialy VI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – The influence of climatic changes on the spatial development of the territories of the Earth: consequences and solutions: materials VI International Scientific and Practical Conference* (pp. 30–35). Khersonskyi derzhavnyi ahrarno-ekonomichnii universytet.

12. Zemelnyi kodeks Ukrainy [Land Code of Ukraine], № 2768-III-VR (2001) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>.

13. Meteshkyn, K.A. (2004). *Kiberneticheskaia pedagogika: teoreticheskie osnovy upravleniia obrazovaniem na baze integrirovannogo intellekta*. KhMSU.

Отримано 26.09.2024

UDC 332.3

**Liubov Maslii**

PhD student, 3rd year, Department of Land Administration and Geoinformation Systems  
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)  
E-mail: [gnomimir@gmail.com](mailto:gnomimir@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3844-462X>

## PRINCIPLES OF FORMAL KNOWLEDGE REPRESENTATION ON LAND ADMINISTRATION IN UKRAINE

Currently, humanity is approaching the state of informational singularity. In this regard, the task mentioned by academician V. I. Vernadsky, who developed the theory on the transition of Earth's biosphere to the noosphere, is becoming increasingly relevant. This includes the rational use of natural resources and the implementation of scientific approaches in state land policy. Today in Ukraine, considering the reform of land relations, there is a need to create a reliable land management system based on modern technologies and data. The formal representation of knowledge in land administration will allow for more efficient management of land resources, reduce environmental pressure, and create prerequisites for the balanced development of territories. Therefore, the issue of formalization of knowledge about land management is becoming more and more urgent.

It lies in the need to create an efficient land resource management system, taking into account modern scientific approaches that ensure transparency, accuracy, and systematization in decision-making and contribute to preserving the natural environment under conditions of its intensive use. New methods of knowledge formalization must be accessible to a wide range of specialists and consider modern technologies, information systems, and the principles of sustainable development.

The article aims to formally represent knowledge about land administration in Ukraine based on the development of a knowledge model that aligns with V. I. Vernadsky's global concept of the processes of transition from the biosphere to the noosphere and confirms his hypothesis about the possible creation of a collective mind on Earth.

Based on the teachings of V. I. Vernadsky and the formal representation of knowledge in the field of land administration, the paper proposes a Cadastral Information Processing Center that can operate based on integrated intelligence. The requirements for Vernadsky's knowledge base are defined. An improvement in the formalization technology is proposed, utilizing knowledge representation methods based on general algebra's formal models and methods.

In this work, for the first time, based on the provisions of V. I. Vernadsky's teaching on the evolutionary development of the biosphere and the role of man in the transformation of the biosphere into the noosphere, a hypothesis was formulated about the possible creation of a collective mind on the example of the implementation of the Center for the Processing of Cadastral Information, which includes the cadastral of intellectual resources, Vernadsky's knowledge base, databases and databases of typical models. The creation of a cadastral of intellectual resources taking into account the Center for the Processing of Cadastral Information, and even the development in the future of a method of selecting experts to solve complex practical problems, will finally show the ability of V. I. Vernadsky's hypothesis about the possible creation of a collective mind.

**Keywords:** processing centre; cadastral information; cadastral systems; geoinformation technologies; knowledge base; theory of categories; knowledge models; integrated intelligence; general algebra; collective mind; land administration.

Fig.: 3. References.: 13.

**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:

- **80 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам потрібна паперова версія журналу);
- **60 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.: (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*

*№ 3(37)*

Технічний редактор, відповідальна за випуск  
Редактор  
Комп'ютерна верстка

Н. В. Мороз  
О. С. Смелова  
О. П. Журко

Заснований у 2015 році. Ідентифікатор медіа  
відповідно до Реєстру суб'єктів у сфері медіа від 31.08.2023 р. № 782 R30-01210

Підписано до друку 30.10.2024. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 33,71.  
Тираж 100 пр. Замовлення № 28/24.

---

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.